

Trabajo Fin de Máster  
Máster Ingeniería Industrial

**Desarrollo de la Ingeniería Front-End  
(FEED) para una planta de producción  
de hidrógeno verde híbrida con  
tecnología solar fotovoltaica**

Autor: Juan José Muñoz Marchena

Tutor: Antonio Carmona Ruiz



**Dpto. Ingeniería**  
Sevilla 2026

Proyecto Fin de Máster  
Máster Ingeniería Industrial

# **Desarrollo de la Ingeniería Front-End (FEED) para una planta de producción de hidrógeno verde hibridada con tecnología solar fotovoltaica**

Autor:

Juan José Muñoz Marchena

Tutor:

Antonio Carmona Ruiz

Dpto. de Ingeniería

Universidad Loyola

Sevilla, 2026

Proyecto Fin de Máster: Desarrollo de la Ingeniería Front-End (FEED) para una planta de producción de hidrógeno verde hibridada con tecnología solar fotovoltaica

Autor: Juan José Muñoz Marchena

Tutor: Antonio Carmona Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2026

El Secretario del Tribunal

# Agradecimientos

---

*A mis padres y hermana  
A mi familia y amigos  
A mis compañeros  
A mi tutor Antonio Carmona Ruiz  
A mi tío José Luis del Río*

*Este logro es también suyo, ya que ustedes han sido una parte fundamental de mi vida y de mi formación. Espero que este trabajo sea una muestra de mi gratitud y amor por cada uno de ustedes.*

*Agradezco a Dios por haberme permitido contar con una familia tan maravillosa y unida.*

*Juan José Muñoz Marchena  
Sevilla, 2026*

# Resumen

---

El proyecto de “Desarrollo de la Ingeniería Front-End (FEED) para una planta de producción de hidrógeno verde hibridada con tecnología solar fotovoltaica” tiene como objetivo diseñar y desarrollar una planta de producción de hidrógeno verde que combine la tecnología solar fotovoltaica con la producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua. La ubicación se plantea en la provincia de Sevilla cuya elección de dicha localización se debe al alto recurso de irradiación solar y la disponibilidad de suelo apto para instalaciones fotovoltaicas.

La instalación considerada está formada por una planta fotovoltaica de 23 MWp y un sistema de electrólisis de 20 MW. La planta fotovoltaica presenta una generación anual aproximada de 38,26 GWh, donde el sistema de electrólisis es alimentado por esta energía y por la importación de energía eléctrica de la red.

La metodología que se va a aplicar se basa en la recopilación de información técnica y normativa, el desarrollo de balances de materia y energía, el dimensionamiento de los equipos principales (como la planta fotovoltaica y el sistema de producción de hidrógeno) y la elaboración de la documentación característica de una ingeniería FEED. De igual manera, se realiza un análisis preliminar de la viabilidad económica donde se estima la inversión y los costes de operación y mantenimiento y el estudio de diferentes estrategias de funcionamiento.

Se estudian dos escenarios: El primero prioriza la producción de hidrógeno durante 24 h, alcanzando una producción anual estimada de 3.101 t H<sub>2</sub>/año y un coste nivelado del hidrógeno de 7,51 €/kg. El segundo caso plantea un análisis de sensibilidad, de tal manera que se variará el precio de venta del hidrógeno, coste de la electricidad importada de red, el CAPEX y la tasa de descuento y cómo afectan a la rentabilidad del escenario base. Según las hipótesis económicas adoptadas, el primer escenario tiene un comportamiento técnico-económico desfavorable, ya que el precio de venta considerado de 6 €/kg H<sub>2</sub> es insuficiente para alcanzar la rentabilidad económica.

Como resultado, se obtiene un diseño básico y conceptual con un grado de desarrollo propio de una ingeniería FEED de una planta capaz de producir hidrógeno verde a partir de energía eléctrica de la red y energía solar fotovoltaica, adaptadas a las condiciones de Sevilla, generando un primer paso para la ingeniería de detalle y la ejecución del proyecto.

# Abstract

---

The project “Front-End Engineering Design (FEED) Development for a Green Hydrogen Production Plant Hybridized with Solar Photovoltaic Technology” aims to design and develop a green hydrogen production plant that combines solar photovoltaic technology with hydrogen production through water electrolysis. The proposed location is the province of Seville, selected due to its high solar irradiation resource and the availability of suitable land for photovoltaic installations.

The proposed facility consists of a 23 MWp photovoltaic plant and a 20 MW electrolysis system. The photovoltaic plant has an estimated annual electricity generation of approximately 38,26 GWh, with the electrolysis system being supplied by both this energy and electricity imported from the grid.

The methodology to be applied is based on the collection of technical and regulatory information, the development of mass and energy balances, the sizing of the main equipment (such as the photovoltaic plant and the hydrogen production system), and the preparation of the documentation typically required at the FEED engineering stage. In addition, a preliminary economic feasibility analysis is carried out, including estimates of capital investment and operation and maintenance costs, as well as an assessment of different operating strategies.

Two scenarios are examined: The first prioritises hydrogen production over a 24-hour period, achieving an estimated annual production of 3,101 t H<sub>2</sub>/year and a levelized cost of hydrogen of €7,51/kg. The second scenario involves a sensitivity analysis, in which the selling price of hydrogen, the cost of electricity imported from the grid, CAPEX and the discount rate are varied to assess how they affect the profitability of the base case. According to the economic assumptions adopted, the first scenario performs poorly from a technical and economic perspective, as the assumed selling price of 6 €/kg H<sub>2</sub> is insufficient to achieve economic viability.

As a result, a basic and conceptual design at a level of development consistent with FEED engineering is obtained for a plant capable of producing green hydrogen using grid electricity and solar photovoltaic energy, adapted to the specific conditions of Seville. This design provides an initial basis for the subsequent detailed engineering phase and project execution.

# Índice

---

|                                                                               |             |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Agradecimientos</b>                                                        | <b>iv</b>   |
| <b>Resumen</b>                                                                | <b>v</b>    |
| <b>Abstract</b>                                                               | <b>vi</b>   |
| <b>Índice</b>                                                                 | <b>vii</b>  |
| <b>Índice de Tablas</b>                                                       | <b>xiii</b> |
| <b>Índice de Ilustraciones</b>                                                | <b>xv</b>   |
| <b>1 Introducción</b>                                                         | <b>17</b>   |
| <b>2 Objeto de proyecto</b>                                                   | <b>18</b>   |
| <b>3 Alcance</b>                                                              | <b>18</b>   |
| <b>4 Estado tecnológico y situación actual</b>                                | <b>19</b>   |
| 4.1 <i>El hidrógeno</i>                                                       | 19          |
| 4.1.1 Contexto histórico                                                      | 19          |
| 4.1.2 Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno                                | 19          |
| 4.1.3 Producción de hidrógeno, sus aplicaciones y clasificación del hidrógeno | 20          |
| 4.1.4 Contexto nacional e internacional del hidrógeno                         | 21          |
| 4.1.5 La electrólisis                                                         | 23          |
| 4.1.6 Almacenamiento y transporte                                             | 28          |
| 4.1.7 Normativa                                                               | 29          |
| 4.2 <i>Energía solar fotovoltaica</i>                                         | 29          |
| 4.2.1 Principio de funcionamiento                                             | 29          |
| 4.2.2 Componentes de una instalación fotovoltaica                             | 30          |
| 4.2.3 Producción eléctrica                                                    | 32          |
| <b>5 Bases de diseño</b>                                                      | <b>33</b>   |
| 5.1 <i>Introducción</i>                                                       | 33          |
| 5.2 <i>Datos generales del proyecto</i>                                       | 33          |
| 5.3 <i>Condiciones de diseño del emplazamiento</i>                            | 33          |
| 5.4 <i>Emplazamiento</i>                                                      | 34          |
| 5.4.1 Situación y accesibilidad de la planta fotovoltaica                     | 34          |
| 5.4.2 Datos ambientales del emplazamiento                                     | 34          |
| <b>6 Descripción del proceso</b>                                              | <b>35</b>   |
| 6.1 <i>Introducción</i>                                                       | 35          |
| 6.2 <i>Filosofía general del proceso</i>                                      | 35          |
| 6.3 <i>Descripción de los subsistemas</i>                                     | 37          |
| 6.3.1 Unidad PV-100 – Sistema de generación fotovoltaica                      | 37          |
| 6.3.2 Unidad ELC-100 – Sistema eléctrico y distribución de potencia           | 38          |
| 6.3.3 Unidad WT-100 – Sistema de tratamiento de agua                          | 39          |
| 6.3.4 Unidad EL-100 – Sistema de electrólisis                                 | 40          |
| 6.3.5 Unidad HY-100 – Sistema de tratamiento de hidrógeno                     | 41          |

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.3.6    | Unidad CP-100 – Sistema de compresión                           | 43        |
| 6.3.7    | Unidad ST-100 – Sistema de almacenamiento                       | 44        |
| 6.3.8    | Unidad OX-100 – Sistema de gestión de oxígeno                   | 45        |
| 6.3.9    | Unidad UT-100 – Servicios auxiliares                            | 46        |
| 6.4      | <i>Corrientes principales del proceso</i>                       | 47        |
| 6.5      | <i>Diagrama de flujo del proceso (PFD)</i>                      | 49        |
| <b>7</b> | <b>Balances de materia</b>                                      | <b>50</b> |
| 7.1      | <i>Introducción</i>                                             | 50        |
| 7.2      | <i>Hipótesis de cálculo</i>                                     | 51        |
| 7.2.1    | Condiciones generales de cálculo                                | 51        |
| 7.2.2    | Criterio energético adoptado                                    | 52        |
| 7.2.3    | Criterio de consumo de agua                                     | 53        |
| 7.2.4    | Criterio de producción y pureza del hidrógeno                   | 53        |
| 7.2.5    | Aplicación de las hipótesis al proyecto                         | 53        |
| 7.3      | <i>Reacciones químicas</i>                                      | 53        |
| 7.3.1    | Reacciones electroquímicas                                      | 54        |
| 7.3.2    | Relación estequiométrica                                        | 54        |
| 7.3.3    | Aplicación al caso nominal de diseño                            | 54        |
| 7.3.4    | Diferencia entre consumo estequiométrico y agua de alimentación | 55        |
| 7.4      | <i>Balance global</i>                                           | 56        |
| 7.4.1    | Producción nominal de hidrógeno                                 | 56        |
| 7.4.2    | Agua total de alimentación                                      | 56        |
| 7.4.3    | Agua consumida en la electrólisis                               | 56        |
| 7.4.4    | Producción de oxígeno                                           | 57        |
| 7.4.5    | Balance global de la planta                                     | 57        |
| 7.4.6    | Consideraciones sobre la producción anual                       | 58        |
| 7.5      | <i>Balance de materia por unidades</i>                          | 58        |
| 7.5.1    | Unidad WT-100 – Tratamiento y acondicionamiento de agua         | 58        |
| 7.5.2    | Unidad EL-100 – Sistema de electrólisis                         | 61        |
| 7.5.3    | Unidad HY-100 – Tratamiento de hidrógeno                        | 62        |
| 7.5.4    | Unidad ST -100 – Almacenamiento intermedio de hidrógeno         | 65        |
| 7.5.5    | Unidad CP-100 – Sistema de compresión                           | 66        |
| 7.5.6    | Unidad OX-100 – Sistema de gestión de oxígeno                   | 67        |
| 7.6      | <i>Resumen de corrientes</i>                                    | 68        |
| 7.6.1    | Corrientes principales cuantificadas                            | 68        |
| 7.6.2    | Criterio adoptado para las corrientes de hidrógeno              | 69        |
| 7.6.3    | Criterio adoptado para las corrientes de oxígeno                | 69        |
| 7.7      | <i>Conclusiones del balance de materia</i>                      | 70        |
| <b>8</b> | <b>Balance de energía</b>                                       | <b>70</b> |
| 8.1      | <i>Introducción</i>                                             | 70        |
| 8.2      | <i>Bases e hipótesis de cálculo</i>                             | 71        |
| 8.2.1    | Condiciones generales de cálculo                                | 71        |
| 8.2.2    | Base energética del electrolizador                              | 72        |
| 8.2.3    | Límite de batería del consumo del electrolizador                | 73        |
| 8.2.4    | Consumos externos considerados                                  | 73        |
| 8.2.5    | Hipótesis para la planta fotovoltaica                           | 74        |
| 8.2.6    | Pérdidas eléctricas                                             | 74        |
| 8.2.7    | Consumo energético de compresión                                | 74        |
| 8.2.8    | Producción de hidrógeno en función de la energía disponible     | 75        |
| 8.2.9    | Operación a carga parcial                                       | 75        |
| 8.2.10   | Criterio para el balance anual                                  | 75        |
| 8.2.11   | Escenario energético considerado                                | 76        |

|        |                                                                            |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.3    | <i>Balance energético de la planta FV – PV-100</i>                         | 77 |
| 8.3.1  | Configuración energética de la planta                                      | 77 |
| 8.3.2  | Recurso solar disponible                                                   | 77 |
| 8.3.3  | Conversión de energía solar en electricidad                                | 78 |
| 8.3.4  | Pérdidas consideradas                                                      | 78 |
| 8.3.5  | Producción específica                                                      | 79 |
| 8.3.6  | Limitación por inversores                                                  | 79 |
| 8.3.7  | Acoplamiento PV-100/EL-100                                                 | 79 |
| 8.3.8  | Energía fotovoltaica aprovechable por el electrolizador                    | 79 |
| 8.3.9  | Parámetros de simulación                                                   | 80 |
| 8.4    | <i>Balance energético del sistema eléctrico – ELC-100</i>                  | 80 |
| 8.4.1  | Límites de batería del balance eléctrico                                   | 81 |
| 8.4.2  | Pérdidas de transformación                                                 | 81 |
| 8.4.3  | Pérdidas en distribución eléctrica                                         | 81 |
| 8.4.4  | Balance de potencia nominal                                                | 82 |
| 8.4.5  | Filosofía de alimentación adoptada                                         | 82 |
| 8.4.6  | Distribución de la energía eléctrica                                       | 82 |
| 8.4.7  | Consideraciones                                                            | 83 |
| 8.5    | <i>Balance energético del electrolizador - EL-100</i>                      | 83 |
| 8.5.1  | Consumo energético total del sistema                                       | 83 |
| 8.5.2  | Consumos auxiliares internos del sistema                                   | 83 |
| 8.5.3  | Energía química contenida en el hidrógeno                                  | 84 |
| 8.5.4  | Eficiencia energética                                                      | 84 |
| 8.5.5  | Balance energético nominal de EL-100                                       | 84 |
| 8.5.6  | Consumo energético diario a plena carga                                    | 85 |
| 8.5.7  | Producción específica por unidad de energía                                | 85 |
| 8.5.8  | Relación con la producción FV anual                                        | 85 |
| 8.5.9  | Operación a carga parcial                                                  | 85 |
| 8.5.10 | Resumen energético del EL-100                                              | 85 |
| 8.6    | <i>Balance energético de la unidad de tratamiento de agua - WT-100</i>     | 86 |
| 8.6.1  | P-101 A/B – Bombas de recirculación                                        | 86 |
| 8.6.2  | AC-101 – Air cooler                                                        | 86 |
| 8.6.3  | WTP-101 – Tratamiento de agua                                              | 87 |
| 8.6.4  | IX-101 – Intercambio iónico                                                | 87 |
| 8.6.5  | Resumen de balance eléctrico WT-100                                        | 87 |
| 8.7    | <i>Balance energético del sistema de tratamiento de hidrógeno - HY-100</i> | 87 |
| 8.7.1  | Definición del límite de batería                                           | 87 |
| 8.7.2  | Separador de hidrógeno                                                     | 88 |
| 8.7.3  | Intercambiador de calor                                                    | 88 |
| 8.7.4  | Sistema de refrigeración Chiller                                           | 88 |
| 8.7.5  | Deoxidiser                                                                 | 89 |
| 8.7.6  | Sistema de secado                                                          | 89 |
| 8.7.7  | Consumo eléctrico externo de HY-100                                        | 89 |
| 8.7.8  | Relación con el balance global                                             | 89 |
| 8.8    | <i>Balance energético de sistema de compresión – CP-100</i>                | 90 |
| 8.8.1  | Condiciones de cálculo                                                     | 90 |
| 8.8.2  | Relación de compresión                                                     | 90 |
| 8.8.3  | Trabajo específico de compresión                                           | 91 |
| 8.8.4  | Potencia requerida por el compresor                                        | 91 |
| 8.8.5  | Consumo energético diario                                                  | 91 |
| 8.8.6  | Comparación con el límite termodinámico                                    | 92 |
| 8.8.7  | Resumen energético                                                         | 92 |
| 8.9    | <i>Balance energético de servicios auxiliares – UT-100</i>                 | 92 |

|          |                                                                                                |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 8.10     | <i>Balance energético global</i>                                                               | 93        |
| 8.10.1   | Demanda mínima cuantificada                                                                    | 94        |
| 8.11     | <i>Análisis de los escenarios de operación</i>                                                 | 94        |
| 8.11.2   | Coste de oportunidad de producir hidrógeno                                                     | 95        |
| 8.11.3   | Precio eléctrico de indiferencia                                                               | 96        |
| 8.11.4   | Energy Balance Summary                                                                         | 96        |
| <b>9</b> | <b>Dimensionamiento y especificaciones de equipos principales</b>                              | <b>98</b> |
| 9.1      | <i>Introducción y criterios generales de dimensionamiento</i>                                  | 98        |
| 9.1.1    | Nomenclatura e identificación de equipos                                                       | 98        |
| 9.1.2    | Contenido de las especificaciones preliminares                                                 | 99        |
| 9.2      | <i>Dimensionamiento y especificación de PV-100 – Planta solar fotovoltaica</i>                 | 100       |
| 9.2.1    | Criterios de diseño ambiental                                                                  | 100       |
| 9.2.2    | Criterio general de diseño                                                                     | 100       |
| 9.2.3    | Criterio de diseño eléctrico                                                                   | 100       |
| 9.2.4    | Descripción de la planta fotovoltaica                                                          | 101       |
| 9.2.5    | Cálculos eléctricos                                                                            | 101       |
| 9.2.6    | Cálculo de los circuitos de Baja Tensión                                                       | 104       |
| 9.2.7    | Cálculos de los circuitos de MT                                                                | 107       |
| 9.2.8    | Componentes principales                                                                        | 109       |
| 9.2.9    | Estructuras de apoyo de los módulos                                                            | 111       |
| 9.2.10   | Inversores string                                                                              | 112       |
| 9.2.11   | Centros de transformación                                                                      | 113       |
| 9.2.12   | Cableado                                                                                       | 115       |
| 9.2.13   | Obra civil                                                                                     | 116       |
| 9.3      | <i>Dimensionamiento y especificación de ELC-100 – Sistema eléctrico de potencia</i>            | 117       |
| 9.3.1    | Dimensionamiento                                                                               | 117       |
| 9.3.2    | Transformador principal                                                                        | 117       |
| 9.3.3    | Transformación dedicada al electrolizador                                                      | 117       |
| 9.3.4    | Rectificadores AC/DC                                                                           | 117       |
| 9.3.5    | Transformador de SSAA                                                                          | 118       |
| 9.4      | <i>Dimensionamiento y especificación de EL-100–Sistema electrólisis PEM</i>                    | 118       |
| 9.4.1    | Dimensionamiento                                                                               | 118       |
| 9.5      | <i>Dimensionamiento y especificación de WT-100–Sistema de tratamiento de agua</i>              | 123       |
| 9.5.1    | Objeto y alcance                                                                               | 123       |
| 9.5.2    | TK-101 – Depósito de agua de alimentación                                                      | 123       |
| 9.5.3    | WTP-101 – Acondicionamiento del agua de alimentación                                           | 124       |
| 9.5.4    | V-101 – Separador O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O                                             | 124       |
| 9.5.5    | AC-101 – AIR-COOLER                                                                            | 125       |
| 9.5.6    | Dimensionamiento y especificación técnica de IX-101 – Ion-Exchanger                            | 126       |
| 9.5.7    | Dimensionamiento y especificación técnica de P-101 A/B                                         | 127       |
| 9.6      | <i>Dimensionamiento y especificación de HY-100 - Sistema de acondicionamiento de hidrógeno</i> | 127       |
| 9.6.1    | V-102 – Separador H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O                                             | 127       |
| 9.6.2    | E-102 – Heat Exchanger                                                                         | 129       |
| 9.6.3    | CH-101 – Chiller                                                                               | 129       |
| 9.6.4    | R-101 - Deoxidiser                                                                             | 130       |
| 9.6.5    | Dimensionamiento de DR-101 A/B – Sistema de secado de hidrógeno                                | 131       |
| 9.6.6    | Dimensionamiento y especificación técnica de Tanque buffer H <sub>2</sub>                      | 134       |
| 9.7      | <i>Dimensionamiento y especificación de CP-100 – Sistema de compresión de hidrógeno</i>        | 135       |
| 9.7.1    | Dimensionamiento                                                                               | 135       |
| 9.8      | <i>Dimensionamiento y especificación de ST-100 – Sistema de almacenamiento de hidrógeno</i>    | 138       |
| 9.8.1    | Dimensionamiento                                                                               | 138       |
| 9.8.2    | Volumen requerido a 350 barg                                                                   | 138       |

|           |                                                                    |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.8.3     | Densidad del H <sub>2</sub> a presión mínima                       | 139        |
| 9.8.4     | Capacidad útil                                                     | 139        |
| 9.8.5     | Comprobación de la capacidad de almacenamiento                     | 139        |
| 9.8.6     | Geometría del recipiente                                           | 139        |
| <b>10</b> | <b>P&amp;ID y LAYOUT</b>                                           | <b>140</b> |
| 10.1      | <i>Layout de la planta</i>                                         | 142        |
| <b>11</b> | <b>Evaluación técnico-económica y análisis de sensibilidad</b>     | <b>142</b> |
| 11.1      | <i>Objetivo y metodología de evaluación</i>                        | 142        |
| 11.2      | <i>Estrategia de operación adoptada</i>                            | 143        |
| 11.3      | <i>Bases e hipótesis económicas</i>                                | 143        |
| 11.3.1    | Economic Design Basis                                              | 143        |
| 11.4      | <i>Estimación del CAPEX</i>                                        | 144        |
| 11.4.1    | Costes directos                                                    | 144        |
| 11.4.2    | Resto de unidades                                                  | 144        |
| 11.4.3    | Costes indirectos y contingencias                                  | 145        |
| 11.4.4    | CAPEX total del proyecto                                           | 145        |
| 11.5      | <i>Estimación del OPEX</i>                                         | 146        |
| 11.5.1    | OPEX Fijo                                                          | 146        |
| 11.5.2    | Coste mantenimiento Planta FV                                      | 146        |
| 11.5.3    | Coste mantenimiento Electrolizador                                 | 147        |
| 11.5.4    | OPEX resto de equipos del electrolizador (sin stack)               | 147        |
| 11.5.5    | Seguros y administración                                           | 147        |
| 11.5.6    | OPEX Variable                                                      | 147        |
| 11.5.7    | OPEX escenario base                                                | 148        |
| 11.6      | <i>Evaluación económica del escenario base</i>                     | 149        |
| 11.6.1    | Escenario: Máxima producción de H <sub>2</sub>                     | 149        |
| 11.6.2    | Información técnica de escenario base                              | 150        |
| 11.6.3    | OPEX escenario base                                                | 150        |
| 11.6.4    | Producción e ingresos escenario base                               | 150        |
| 11.7      | <i>LCOH</i>                                                        | 151        |
| 11.8      | <i>Flujo de caja, VAN, TIR y Payback</i>                           | 152        |
| 11.9      | <i>Precio de equilibrio de H<sub>2</sub></i>                       | 152        |
| 11.10     | <i>Análisis de sensibilidad</i>                                    | 152        |
| 11.10.1   | Precio de venta del hidrógeno                                      | 153        |
| 11.10.2   | Coste de la electricidad de la red                                 | 153        |
| 11.10.3   | Tasa de descuento                                                  | 153        |
| 11.10.4   | Presentación de resultados                                         | 153        |
| 11.10.5   | Conclusión del análisis de sensibilidad                            | 153        |
| 11.11     | <i>Resultados definitivos</i>                                      | 154        |
| 11.12     | <i>Conclusión económica</i>                                        | 154        |
| <b>12</b> | <b>Tramitación administrativa y legalización de la instalación</b> | <b>155</b> |
| 12.1      | <i>Compatibilidad urbanística y disponibilidad de terrenos</i>     | 155        |
| 12.2      | <i>Tramitación ambiental</i>                                       | 155        |
| 12.3      | <i>Autorización de las instalaciones eléctricas</i>                | 156        |
| 12.4      | <i>Seguridad industrial de la instalación de hidrógeno</i>         | 156        |
| 12.5      | <i>Prevención de accidentes graves</i>                             | 157        |
| 12.6      | <i>Ejecución, certificación y puesta en servicio</i>               | 157        |
| <b>13</b> | <b>Anexos</b>                                                      | <b>159</b> |
| 13.1      | <i>Process Flow Diagram (PFD)</i>                                  | 160        |
| 13.2      | <i>Piping and Instrumentation Diagram (P&amp;ID)</i>               | 161        |
| 13.3      | <i>Balance de materia</i>                                          | 162        |

|           |                                                                |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------|------------|
| 13.4      | <i>Evaluación técnico económica y análisis de sensibilidad</i> | 165        |
| 13.5      | <i>Especificaciones técnicas de equipos principales</i>        | 171        |
| 13.6      | <i>Layout</i>                                                  | 204        |
| 13.7      | <i>Datasheet equipos</i>                                       | 205        |
| 13.8      | <i>Simulación PVGIS</i>                                        | 206        |
| <b>14</b> | <b>Bibliografía</b>                                            | <b>207</b> |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Datos principales de la planta.                                                                                                                     | 17 |
| Tabla 2. Propiedades físico-químicas del hidrógeno (National Institute of Standards and Technology, s. f.).                                                  | 20 |
| Tabla 3. Datos generales del proyecto.                                                                                                                       | 33 |
| Tabla 4. Condiciones generales del emplazamiento.                                                                                                            | 34 |
| Tabla 5. Datos ambientales.                                                                                                                                  | 35 |
| Tabla 6. Unidades del proceso.                                                                                                                               | 36 |
| Tabla 7. Variables unidad PV-100.                                                                                                                            | 37 |
| Tabla 8. Variables unidad ELC-100.                                                                                                                           | 39 |
| Tabla 9. Variables unidad WT-100.                                                                                                                            | 40 |
| Tabla 10. Variables unidad EL-100.                                                                                                                           | 41 |
| Tabla 11. Variables unidad HY-100.                                                                                                                           | 43 |
| Tabla 12. Variables unidad CP-100.                                                                                                                           | 44 |
| Tabla 13. Variables unidad ST-100.                                                                                                                           | 45 |
| Tabla 14. Variables unidad OX-100.                                                                                                                           | 46 |
| Tabla 15. Variables unidad UT-100.                                                                                                                           | 47 |
| Tabla 16. Identificación de corrientes.                                                                                                                      | 49 |
| Tabla 17. Parámetros de referencia del electrolizador Nel Hydrogen. Fuente: elaboración propia a partir de Nel Hydrogen (s. f.), ficha PD-0600-0145, rev. A. | 52 |
| Tabla 18. Masas molares. Fuente: NIST Chemistry WebBook.                                                                                                     | 54 |
| Tabla 19. Balance estequiométrico nominal de la electrólisis.                                                                                                | 55 |
| Tabla 20. Balance global de materia a capacidad nominal.                                                                                                     | 57 |
| Tabla 21. Balance preliminar de la unidad WT-100.                                                                                                            | 60 |
| Tabla 22. Balance de materia de la unidad EL-100.                                                                                                            | 62 |
| Tabla 23. Balance preliminar de la unidad HY-100.                                                                                                            | 65 |
| Tabla 24. Balance de materia de la unidad ST-100.                                                                                                            | 66 |
| Tabla 25. Balance de materia de la unidad CP-100.                                                                                                            | 67 |
| Tabla 26. Balance preliminar de la unidad OX-100.                                                                                                            | 68 |
| Tabla 27. Corrientes principales.                                                                                                                            | 69 |
| Tabla 28. Resumen del balance de materia nominal.                                                                                                            | 70 |
| Tabla 29. Criterio metodológico.                                                                                                                             | 71 |
| Tabla 30. Parámetros energéticos del sistema de electrólisis.                                                                                                | 73 |
| Tabla 31. Consumos externos considerados.                                                                                                                    | 74 |
| Tabla 32. Bases de cálculo energético adoptadas.                                                                                                             | 76 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 33. Parámetros principales de PV-100. Fuente: elaboración propia mediante PVGIS; configuración y resultado de la ejecución del proyecto. | 77  |
| Tabla 34. Pérdidas consideradas FV.                                                                                                            | 78  |
| Tabla 35. Parámetros de simulación PVGIS.                                                                                                      | 80  |
| Tabla 36. Distribución del consumo energético de EL-100.                                                                                       | 84  |
| Tabla 37. Balance del electrolizador.                                                                                                          | 86  |
| Tabla 38. Tratamiento energético de los equipos.                                                                                               | 88  |
| Tabla 39. Balance energético preliminar de HY-100.                                                                                             | 89  |
| Tabla 40. Condiciones de cálculo de compresión.                                                                                                | 90  |
| Tabla 41. Balance energético preliminar de sistema de compresión.                                                                              | 92  |
| Tabla 42. Resumen de consumos auxiliares.                                                                                                      | 93  |
| Tabla 43. Resumen balance consumos eléctricos de la planta.                                                                                    | 94  |
| Tabla 44. Resumen del balance energético de la planta.                                                                                         | 97  |
| Tabla 45. Equipment Tag.                                                                                                                       | 99  |
| Tabla 46. Contenido mínimo de las Preliminary Equipment Datasheet.                                                                             | 100 |
| Tabla 47. Características principales del módulo e inversor.                                                                                   | 102 |
| Tabla 48. Temperatura máxima y mínima en lugar de la implantación.                                                                             | 102 |
| Tabla 49. Intensidades de corto circuito a la entrada del inversor.                                                                            | 104 |
| Tabla 50. Resultados cálculos de MT.                                                                                                           | 109 |
| Tabla 51. Características principales del módulo fotovoltaico. Fuente: BiHiKu7 CS7N-640–665MB-AG, versión 2.1 EN (CSI Solar, s. f.)            | 110 |
| Tabla 52. Características de las estructuras.                                                                                                  | 112 |
| Tabla 53. Características del modelo de inversor seleccionado. Fuente: SG350HX Ficha Técnica.                                                  | 113 |
| Tabla 54. Características de los centros de transformación. Fuente: Datasheet Sungrow MVS4500-LV.                                              | 115 |
| Tabla 55. Etapas de compresión                                                                                                                 | 136 |
| Tabla 56. Economic Design Basis.                                                                                                               | 144 |
| Tabla 57. CAPEX resto de unidades.                                                                                                             | 145 |
| Tabla 58. CAPEX total del proyecto.                                                                                                            | 146 |
| Tabla 59. OPEX fijo anual.                                                                                                                     | 147 |
| Tabla 60. OPEX de los dos escenarios.                                                                                                          | 149 |
| Tabla 61. Comparación técnica de escenarios.                                                                                                   | 150 |
| Tabla 62. Comparación de escenarios.                                                                                                           | 151 |
| Tabla 63. LCOH Escenario base                                                                                                                  | 152 |
| Tabla 64. Flujo caja, VAN, TIR y Payback.                                                                                                      | 152 |
| Tabla 65. Análisis de sensibilidad.                                                                                                            | 153 |
| Tabla 66. Comparación definitiva.                                                                                                              | 154 |

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

|                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 1. Métodos de producción de Hidrógeno.                                                                                                                                            | 21  |
| Ilustración 2. Estrategia internacional del hidrógeno, octubre 2022 (World Energy Council).                                                                                                   | 23  |
| Ilustración 3. Funcionamiento del electrolizador con la temperatura.                                                                                                                          | 24  |
| Ilustración 4. Electrolizador alcalino. Fuente: John Cockeril.                                                                                                                                | 25  |
| Ilustración 5. Electrolizador PEM Qlsc-h1.                                                                                                                                                    | 26  |
| Ilustración 6. Resumen funcionamiento de los tipos de electrolizadores. Fuente: International Renewable Energy Agency (2020), figura 6, p. 31.                                                | 27  |
| Ilustración 7. Indicadores de tecnología de electrólisis en 2020 y proyecciones 2050. Fuente: International Renewable Energy Agency (2020), tabla ES1, p. 12.                                 | 28  |
| Ilustración 8. Funcionamiento del efecto fotoeléctrico.                                                                                                                                       | 30  |
| Ilustración 9. Módulo fotovoltaico.                                                                                                                                                           | 30  |
| Ilustración 10. Tracker 1V (seguidor un eje).                                                                                                                                                 | 31  |
| Ilustración 11. Inversor SUNGROW.                                                                                                                                                             | 31  |
| Ilustración 12. Centro de transformación SUNGROW.                                                                                                                                             | 32  |
| Ilustración 13. PFD.                                                                                                                                                                          | 50  |
| Ilustración 14. Dimensiones del módulo fotovoltaico.                                                                                                                                          | 111 |
| Ilustración 15. PYID del proceso.                                                                                                                                                             | 141 |
| Ilustración 16. Esquema resumido de la tramitación del proyecto. Fuente: Elaboración propia a partir de la Ley 2/2026, el Real Decreto Legislativo 1/2016 y la normativa sectorial aplicable. | 158 |



# 1 INTRODUCCIÓN

*"Creo que un día el agua será un carburante, que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados solos o conjuntamente, proporcionarán una fuente inagotable de energía y de luz, con una intensidad que el carbón no puede; dado que las reservas de carbón se agotarán, nos calentaremos gracias al agua. El agua será el carbón del futuro"*

*- Julio Verne, 1874 -*

El Trabajo Fin de Máster desarrolla la Ingeniería Front-End Engineering Design (FEED) de una planta de producción de hidrógeno verde alimentada mediante una instalación solar fotovoltaica ubicada en la provincia de Sevilla.

La planta se diseña para una potencia nominal del sistema de electrólisis de 20 MW, a partir de una planta fotovoltaica de 23 MW<sub>p</sub>, y una potencia nominal de inversores de 21,44 MW<sub>AC</sub>. La planta dispone de una producción anual de hidrógeno que es determinada a partir de las condiciones de operación y el recurso solar disponible. A partir de dichas condiciones, se establecen las bases de diseño de la planta, se estudia el proceso de producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua, se realizan los balances de materia y energía y se dimensionan y seleccionan los equipos y materiales necesarios.

El grado de definición corresponde a una ingeniería FEED, por lo que el objetivo no es alcanzar el grado de una ingeniería de detalle, sino definir una solución técnica suficiente de la instalación que posibilite evaluar su comportamiento, identificar sus principales equipos y condiciones operativas y hacer una estimación de la inversión y la explotación.

Además, la operación conjunta de la planta fotovoltaica y el sistema de producción de hidrógeno se analiza desde una perspectiva técnico-económica a través de una estrategia base haciendo una estimación preliminar de la inversión (CAPEX) y costes de operación (OPEX) para evaluar la viabilidad técnica y económica de instalación. De esta manera, el diseño obtenido es útil para un primer paso para el desarrollo de una posible fase de ingeniería de detalle y la construcción de la instalación.

| DATOS PRINCIPALES DE LA PLANTA                                  |                        |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------|
| Potencia pico planta FV                                         | 23 MW <sub>p</sub>     |
| Potencia en inversores (Cos $\phi$ = 1 y T <sup>a</sup> = 40°C) | 21,44 MW <sub>AC</sub> |
| Potencia en Electrolizadores                                    | 20 MW                  |

Tabla 1. Datos principales de la planta.

## 2 OBJETO DE PROYECTO

---

El objetivo de este documento es la elaboración del Proyecto de la Ingeniería Front-End (FEED) de la Planta de producción de Hidrógeno Verde de 20 MW a través de energía solar fotovoltaica mediante electrólisis del agua ubicada en Sevilla e importación de red eléctrica cuando el recurso solar sea insuficiente.

El proyecto tiene como finalidad definir las bases técnicas necesarias para un diseño conceptual y la ingeniería básica de la instalación, definiendo las principales características del proceso, los criterios de diseño, el dimensionamiento preliminar de los equipos principales y la integración del sistema fotovoltaico con el sistema de producción de hidrógeno.

Con la finalidad de analizar la estrategia de operación más adecuada para el proyecto, se estudia en detalle un escenario de operación base, evaluando su viabilidad técnica y económica y un posterior análisis de sensibilidad.

En el escenario estudiado, la totalidad de la energía eléctrica generada por la planta fotovoltaica durante todas las horas de sol es destinada a alimentar el sistema de electrólisis para la producción de hidrógeno y la importación de electricidad de la red cuando la generación fotovoltaica sea insuficiente. Este caso representa una operación basada en aprovechar el máximo recurso renovable disponible, posibilitando estudiar la capacidad de producción de hidrógeno y el rendimiento global de la instalación.

Se analiza el impacto que puede presentar sobre el factor de utilización del electrolizador, la producción anual de hidrógeno, el consumo energético y el coste nivelado del hidrógeno (LCOH), desarrollando la alternativa más beneficiosa para el desarrollo de la instalación.

Por último, se realiza otro escenario complementario basado en un análisis de sensibilidad para estudiar los diferentes factores que pueden variar con el objetivo de hacer rentable el proyecto.

## 3 ALCANCE

---

El alcance de dicho proyecto comprende el desarrollo de la ingeniería Front-End (Front-End Engineering Design, FEED) de una planta de producción de hidrógeno verde mediante electrólisis a partir de una planta fotovoltaica de 23 MWp y una potencia nominal de inversores de 21,44 MWAC. La planta se ubica en la provincia de Sevilla, para aprovechar las favorables condiciones de irradiación solar.

En este proyecto se incluye el desarrollo de una ingeniería conceptual y básica necesaria para definir las características más importantes de la instalación y así poder evaluar la viabilidad técnica y económica. Por tanto, se desarrollará:

- Recopilación y análisis de normativa, información técnica relacionada con la producción de hidrógeno y la tecnología fotovoltaica.
- Desarrollo del estado de las diferentes tecnologías de electrólisis, eligiendo una de ellas para el proyecto.
- Análisis de la ubicación seleccionada para el proyecto, incluyendo su recurso solar y sus condiciones medioambientales.
- Definición de las bases de diseño para el desarrollo de la ingeniería FEED.
- Descripción del proceso de electrólisis y sus sistemas auxiliares.
- Realización de los balances de materia y energía del proceso.
- Dimensionamiento preliminar de los principales equipos de la instalación, donde se incluyen, la planta fotovoltaica, el electrolizador, el sistema de tratamiento de agua, los sistemas de compresión, refrigeración y almacenamiento de hidrógeno.
- Elaboración de los diagramas de procesos (PFD) y del diagrama de tubería e instrumentación (P&ID), así como el layout básico de la planta.

- Estimación preliminar de la inversión (CAPEX) y operación y mantenimiento (OPEX), para estudiar la viabilidad técnica y económica.
- Análisis de una estrategia de operación basada en la producción continua de hidrógeno verde durante las horas de generación fotovoltaica (durante las horas de sol) e importación de la electricidad procedente de la red cuando no haya recurso solar, y un análisis de sensibilidad donde estudiar cómo la variación de diversos factores puede afectar a la rentabilidad de la instalación.

De igual manera, el proyecto incluye un estudio preliminar de legalización que tiene que ver con la seguridad industrial, el impacto ambiental y su normativa aplicable a estas instalaciones, con la finalidad de que el proyecto cumpla con los aspectos técnicos exigidos y la reglamentación vigente para su construcción.

Quedan fuera del alcance la ingeniería de detalle, diseño mecánico, estructural y de cimentaciones, los cálculos eléctricos de BT, dimensionamiento de protecciones eléctricas, planificación de la construcción, adquisición de equipos, puesta en marcha. Cabe destacar que tampoco se lleva a cabo aquellos estudios geotécnicos, topográficos y ambientales administrativos que sean característicos de fases posteriores.

## 4 ESTADO TECNOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

### 4.1 El hidrógeno

#### 4.1.1 Contexto histórico

A finales del siglo XVIII, el hidrógeno fue descubierto como un gas inflamable por el químico británico Henry Cavendish en 1766 (Royal Society of Chemistry, s. f.). Cavendish llamó al gas "aire inflamable" y realizó experimentos para determinar su composición.

El nombre hidrógeno hace referencia a su capacidad para formar agua al reaccionar con oxígeno (Royal Society of Chemistry, s. f.).

En 1800, el químico británico William Nicholson y el alemán Johann Ritter descubrieron de manera independiente que el agua se podía descomponer en hidrógeno y oxígeno, mediante un proceso llamado electrólisis (Carmo et al., 2013). Este descubrimiento sentó las bases para la producción de hidrógeno a gran escala como es conocida en la actualidad.

Entre las aplicaciones industriales del hidrógeno destacan la producción de amoníaco y el refinado de petróleo (International Energy Agency, 2025).

Durante el siglo XX, el hidrógeno siguió siendo objeto de investigación y desarrollo. Se establecieron métodos más eficientes para la producción de hidrógeno, como el reformado de gas natural y la electrólisis del agua, utilizando electricidad generada a partir de fuentes renovables.

En las últimas décadas del siglo XX, el hidrógeno cobró importancia como una fuente de energía limpia y alternativa. Las celdas de combustible de hidrógeno se desarrollaron para generar electricidad sin emisiones, utilizando hidrógeno y oxígeno para producir agua como subproducto.

En las últimas décadas, se ha avanzado significativamente en la investigación y desarrollo de tecnologías de hidrógeno, incluyendo la producción, almacenamiento y aplicaciones en la industria, el transporte y la generación de energía. El hidrógeno está siendo considerado como una opción clave para la transición hacia una economía más sostenible y libre de combustibles fósiles (International Energy Agency, 2025).

#### 4.1.2 Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más común en el Universo y en la corteza terrestre, ya que representa aproximadamente el 83.9% de toda la materia visible, además, es el elemento químico más simple en la tabla periódica, y no se encuentra en estado puro de forma natural en nuestro planeta. En la atmósfera, el hidrógeno

se encuentra como un gas incoloro, sin olor y altamente inflamable, en su forma molecular  $H_2$  (Royal Society of Chemistry, s. f.).

Un de las propiedades más destacables es su peso atómico, esto se debe a que el hidrógeno tiene un peso atómico de aproximadamente 1,008, lo que lo convierte en el elemento más ligero de todos (Royal Society of Chemistry, s. f.).

En cuanto a su punto de fusión y ebullición a presión atmosférica, el hidrógeno se encuentra en estado gaseoso. Su punto de fusión es de  $-259.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que significa que se vuelve líquido a temperaturas extremadamente bajas y su punto de ebullición es de  $-252.87\text{ }^{\circ}\text{C}$  (National Institute of Standards and Technology, s. f.).

El hidrógeno es un elemento sumamente poco denso ( $\rho=0,089\text{ kg/m}^3$ ), es menos denso que el aire, lo que significa que tiende a elevarse, también presenta una gran fugacidad por lo que tiende a dispersarse rápidamente en la atmósfera (National Institute of Standards and Technology, s. f.).

El hidrógeno destaca también al ser un elemento altamente reactivo, esto lo hace reaccionar con una amplia variedad de sustancias, como el oxígeno, el nitrógeno y el carbono, para formar compuestos químicos. Hay que tener en cuenta que el hidrógeno se encuentra presente en la mayoría de las sustancias orgánicas y en los ácidos.

Es significativo también la combustibilidad del hidrógeno ya que es extremadamente inflamable. El hidrógeno destaca como el elemento con la relación energía/peso más alto en comparación con cualquier otro combustible (alta densidad energética). Puede arder en presencia de una fuente de ignición, como una chispa, y formar agua como subproducto de la combustión.

El hidrógeno tiene tres isótopos principales: el protio ( $1H$ ), el deuterio ( $2H$ ) y el tritio ( $3H$ ). El protio es el isótopo más común y consiste en un solo protón y ningún neutrón. El deuterio es estable y se encuentra en la naturaleza en pequeñas cantidades. El tritio es radiactivo y se utiliza en aplicaciones especializadas.

Debido a su versatilidad y capacidad para formar compuestos con otros elementos, el hidrógeno tiene un amplio rango de aplicaciones industriales, desde el proceso de refinado de combustibles fósiles para mejorar su calidad y eliminar impurezas y la producción de amoníaco, que es esencial para la fabricación de fertilizantes y productos químicos.

|                                        |                                                                                         |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Densidad</b>                        | 0,0899 kg/Nm <sup>3</sup> (gas) / 0,0708 kg/l (líquido)                                 |
| <b>Poder calorífico inferior</b>       | 120 MJ/kg                                                                               |
| <b>Poder calorífico superior</b>       | 141,86 MJ/kg                                                                            |
| <b>Límite de explosión</b>             | 4 - 75 % (concentración de $H_2$ en aire)                                               |
| <b>Límites de detonación</b>           | 18,3 – 59 % (concentración de $H_2$ en aire)                                            |
| <b>Capacidad calorífica específica</b> | $C_p = 14,199\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ / $C_v = 10,074\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ |
| <b>Coefficiente de difusión</b>        | 0,61 cm <sup>2</sup> /s                                                                 |

Tabla 2. Propiedades físico-químicas del hidrógeno (National Institute of Standards and Technology, s. f.).

#### 4.1.3 Producción de hidrógeno, sus aplicaciones y clasificación del hidrógeno

Actualmente, existen diferentes métodos de producción de hidrógeno, cada uno con sus características y aplicaciones específicas. A continuación, se definen los métodos más utilizados en la actualidad:

- **Reformado:** Este es el método más común y ampliamente utilizado para la producción de hidrógeno. Se conoce como reformado catalítico y se basa en extraer hidrógeno de un combustible, típicamente gas natural. El proceso da lugar a reacciones químicas controladas en presencia de un catalizador, que descompone el gas natural en hidrógeno y dióxido de carbono. Aproximadamente el 95% del hidrógeno producido en la actualidad se obtiene mediante este método. En algunos casos, se agregan etapas adicionales de purificación, como el WGSR (Water-Gas Shift Reaction), COPrOX (Selective CO

oxidation), el uso de membranas o la tecnología PSA (Pressure Swing Adsorption) (International Energy Agency, 2025).

- **Electrólisis:** La electrólisis es otro método importante para producir hidrógeno (método a tratar en dicho proyecto). Consiste en utilizar electricidad para descomponer el agua en sus componentes, hidrógeno y oxígeno. Se requiere un electrolizador, que es un dispositivo que contiene electrodos sumergidos en agua y separados por una membrana. Al aplicar una corriente eléctrica al electrolizador, el agua se descompone en hidrógeno en el electrodo negativo (cátodo) y oxígeno en el electrodo positivo (ánodo) (Carmo et al., 2013). La electrólisis se considera una forma de producción de hidrógeno limpia y sostenible, especialmente si la electricidad utilizada proviene de fuentes renovables (como el objetivo de dicho proyecto). Hoy en día, la electrólisis representa aproximadamente el 5% de la producción mundial de hidrógeno.
- **Otros métodos:** Además del reformado y la electrólisis, existen varios métodos experimentales o en etapa de investigación y desarrollo (I+D) para la producción de hidrógeno. Algunos de estos métodos incluyen:
  - **Gasificación:** Este proceso implica convertir materiales carbonosos, como biomasa o carbón, en gas de síntesis, una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. Luego, el hidrógeno se separa del gas de síntesis (International Energy Agency, 2025).
  - **Crackeo:** El crackeo se refiere a la descomposición térmica de hidrocarburos, como el metano, para producir hidrógeno y carbono.
  - **Fotólisis:** En este enfoque, se utiliza la energía de la luz solar para descomponer moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. La fotólisis es un campo de investigación activo en la búsqueda de métodos más eficientes y económicos.
  - **Biohidrógeno:** Se refiere a la producción de hidrógeno mediante procesos biológicos, como la fermentación anaeróbica de materia orgánica por bacterias. Se considera una opción prometedora debido a su bajo impacto ambiental y su capacidad de utilizar biomasa como materia prima.
  - **Ciclos termoquímicos:** Estos métodos implican una serie de reacciones químicas que utilizan calor para descomponer agua u otros compuestos y producir hidrógeno. Algunos ciclos termoquímicos se consideran alternativas al water splitting o termólisis, que es el proceso convencional de descomposición térmica del agua mediante calor).

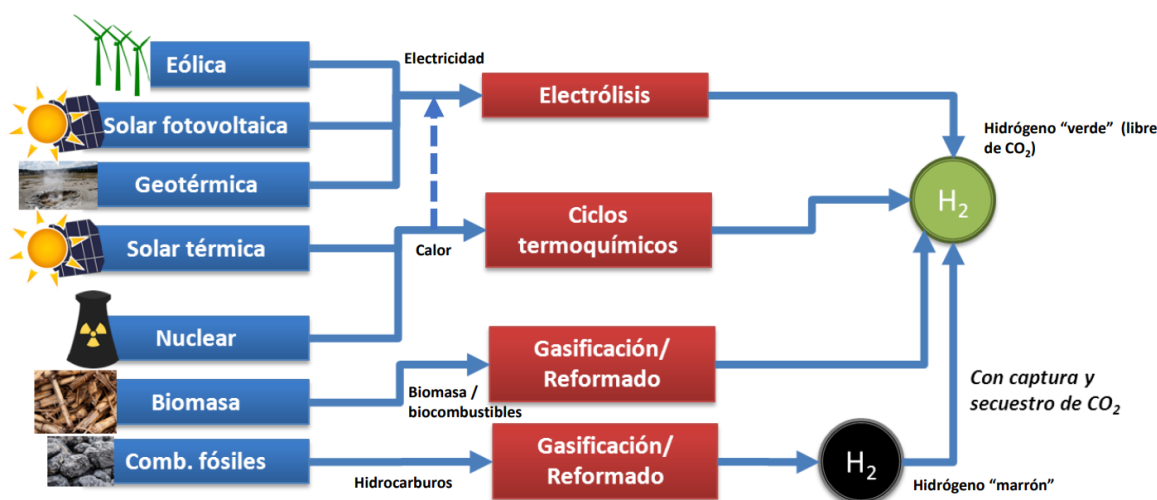


Ilustración 1. Métodos de producción de Hidrógeno.

#### 4.1.4 Contexto nacional e internacional del hidrógeno

El hidrógeno ha ganado una mayor atención tanto a nivel nacional como internacional debido a su potencial para abordar los desafíos energéticos y medioambientales de los diferentes países.

#### 4.1.4.1 Contexto internacional

A nivel internacional, el hidrógeno se ha convertido en un tema relevante en la agenda energética y climática. Varios países y regiones han desarrollado estrategias y políticas específicas para impulsar la producción, el uso y la investigación del hidrógeno (International Energy Agency, 2025).

La Unión Europea ha establecido una ambiciosa estrategia de hidrógeno como parte del Pacto Verde Europeo. Dicha Estrategia de Hidrógeno de la UE tiene como objetivo promover la producción de hidrógeno renovable, establecer una cadena de valor completa y fomentar su uso en sectores clave como el transporte, la industria y la generación de energía (Comisión Europea, 2020).

La comisión europea elabora una serie de puntos principales para abordar la estrategia del hidrógeno para una Europa climáticamente neutral estas fases corresponden:

- 2020-2024: Construcción de 6 GW de electrolizadores mediante fuentes renovables (Comisión Europea, 2020).
- 2025-2030: Implantación de 40 GW de electrolizadores mediante fuentes renovables y 10 M de toneladas de producción de H<sub>2</sub> renovable (Comisión Europea, 2020).
- 2030-2050: Alcanzar la madurez tecnológica de las tecnologías referentes al H<sub>2</sub> renovable y una expansión a gran escala en los sectores económicos con grandes emisiones (Comisión Europea, 2020).

#### 4.1.4.2 Contexto nacional

En España, la Hoja de Ruta del Hidrógeno de 2020 constituye un antecedente de planificación del despliegue del hidrógeno renovable. La actualización del PNIEC publicada en 2024 establece un objetivo de 12 GW de electrolizadores para 2030 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020, 2024).

Alemania ha establecido una Estrategia Nacional de Hidrógeno para desarrollar una economía del hidrógeno a gran escala. El país se ha comprometido a impulsar la producción de hidrógeno verde y ha destinado fondos significativos para proyectos de investigación y desarrollo.

Australia cuenta con grandes recursos naturales, como la energía solar y eólica, y está trabajando en el desarrollo de una economía del hidrógeno. El país tiene como objetivo convertirse en un importante exportador de hidrógeno verde y ha lanzado varios proyectos a gran escala.

Canadá ha establecido una Estrategia Nacional de Hidrógeno y está impulsando la producción y el uso de hidrógeno limpio. El país se ha centrado en el desarrollo de proyectos de hidrógeno basados en fuentes renovables, así como en la implementación de políticas y regulaciones favorables.

En este momento, el hidrógeno se ha convertido en un elemento clave en la transición hacia una economía baja en carbono. Tanto a nivel nacional como internacional, se están realizando inversiones significativas en investigación, desarrollo y proyectos piloto para impulsar la producción y el uso de hidrógeno limpio y renovable en diversos sectores. El objetivo es aprovechar su potencial para descarbonizar la energía, reducir las emisiones y promover la sostenibilidad energética.



Ilustración 2. Estrategia internacional del hidrógeno, octubre 2022 (World Energy Council).

## 4.1.5 La electrólisis

### 4.1.5.1 Historia

Los primeros antecedentes de la electrólisis del agua se remontan a finales del siglo XVIII. En 1789, Adriaan Paets van Troostwijk y Jan Rudolph Deiman consiguieron descomponer agua empleando un generador electrostático, obteniendo hidrógeno y oxígeno (Smolinka et al., 2022).

En 1800, Alessandro Volta inventó la batería y poco después se logró la primera descomposición del agua en oxígeno e hidrógeno mediante un proceso llamado electrólisis, realizado por William Nicholson y Anthony Carlisle (Smolinka et al., 2022).

En 1834, Michael Faraday publicó sus dos leyes sobre la electrólisis y fue el primero en utilizar ese término (Smolinka et al., 2022).

Desde la década de 1920 hasta la de 1970, se vivió una "época dorada" en la electrólisis industrial, siendo la industria de producción de amoníaco y fertilizantes su principal objetivo (Santos et al., 2013; Smolinka et al., 2022).

En 1939, se puso en funcionamiento una planta que producía 10,000 Nm<sup>3</sup>/h (Zoulias et al., 2002). En 1980, se instaló una planta en Aswan compuesta por 144 electrolizadores y con una capacidad de 162 MW (Santos et al., 2013, p. 1177).

### 4.1.5.2 La ecuación de Faraday y tipos de electrolizadores

#### 4.1.5.2.1 La ecuación de Faraday

La electrólisis, que es el proceso de descomposición electroquímica del agua, se utiliza ampliamente en la producción industrial de grandes cantidades de hidrógeno. En este proceso, se hacen reaccionar los iones del agua en electrodos polarizados utilizando corriente continua. Como resultado, en el electrodo negativo (cátodo), se obtiene hidrógeno molecular en forma gaseosa, mientras que en el electrodo positivo (ánodo) se obtiene oxígeno en las mismas condiciones (Carmo et al., 2013).

Es importante destacar que la electrólisis opera de manera inversa a una pila de combustible. Mientras que en una pila de combustible se combina hidrógeno y oxígeno para producir electricidad y agua, en la electrólisis se utiliza electricidad para descomponer el agua.

A continuación, se adjunta la ecuación de Faraday, donde se puede calcular la cantidad de hidrógeno producido a través de la corriente y el tiempo de operación del electrolizador entre otros factores (Carmo et al., 2013):

$$m(g) = \frac{PM \left[ \frac{g}{m} \right] * I [A] * t[s]}{z * F[C/mol]}$$

Donde:

PM: Peso molecular de la sustancia (en este caso Hidrógeno = 2g/mol).

I: Intensidad de corriente continua (A).

t: Tiempo (s).

z: N° de electrones por mol en la semirreacción (N° electrones: 2).

F: Constante de Faraday (96.500 C/mol).

Como se puede saber también, la electrólisis es un proceso donde la temperatura juega un papel importante ya que dicho proceso se ve favorecido por el incremento de temperatura y el rendimiento del electrolizador aumenta ya que la energía eléctrica demandada disminuye para unos rangos de temperatura, esto se puede ver en la siguiente ilustración (Buttler y Spliethoff, 2018):

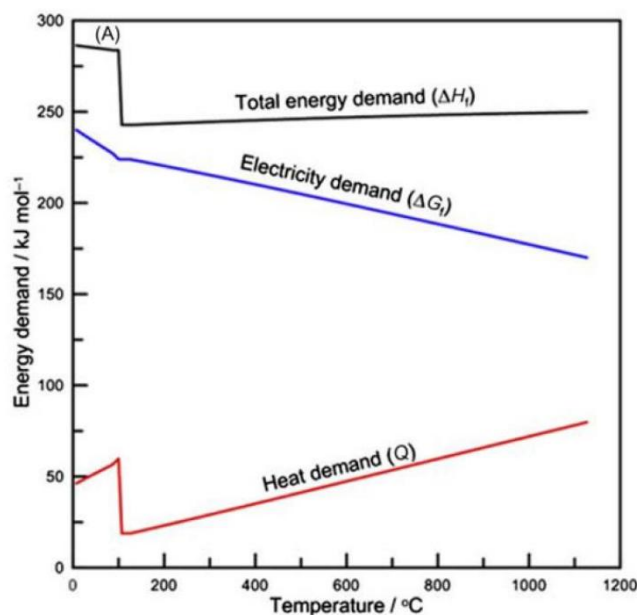


Ilustración 3. Funcionamiento del electrolizador con la temperatura.

#### 4.1.5.2.2 Tipos de electrolizadores

- **La electrólisis alcalina**

La electrólisis alcalina es una tecnología de producción de hidrógeno con amplia experiencia industrial. Sus prestaciones dependen del diseño y de las condiciones de operación, por lo que los rendimientos deben compararse con una base energética y unos límites de sistema comunes (Buttler y Spliethoff, 2018).

Un electrolizador alcalino convencional se compone de un ánodo y un cátodo, generalmente hechos de níquel, y un separador que permite el paso de iones de hidróxido y moléculas de agua entre las cámaras de ambos electrodos. Para que funcione en un entorno alcalino, se agrega un electrolito como el hidróxido de potasio (KOH) en una concentración de alrededor del 25-30% (Santos et al. 2013, p. 1187). Esto tiene como objetivo desviar la reacción en el ánodo hacia la producción de oxígeno. En el cátodo, se forman burbujas de hidrógeno, mientras que en el ánodo se generan burbujas de oxígeno, que se captura de manera independiente en cada una de las cámaras.

En una configuración de electrodos por inmersión, el hidrógeno y el oxígeno se mantienen separados por una membrana que no permite el paso de gases y divide la celda electrolítica. Sin embargo, las burbujas de gas que se forman en los electrodos reducen su superficie activa, lo que dificulta el paso del electrolito. Cuando se aplica una corriente eléctrica alta, el flujo de burbujas aumenta y cubre una parte significativa del electrodo, lo que hace que esta configuración sea inviable a gran escala (Buttler y Spliethoff, 2018).

La segunda configuración utiliza electrodos porosos para superar el problema de las burbujas. Se utiliza un material poroso, que contiene el electrolito absorbido y está colocado entre dos separadores hidrofílicos, que están presionados por el ánodo y el cátodo (Groot & Vreman, 2021). Esta configuración permite que el electrolito fluya a través de los electrodos porosos, lo que ayuda a reducir la resistencia de la solución. Además,

se logra una configuración llamada "zero gap" al utilizar electrodos porosos que son permeables al agua y al electrolito, lo que minimiza la resistencia (Brauns & Turek, 2021).

En la última configuración, se utilizan dos electrodos que constan de una red de níquel y una capa de difusión de gases hecha de níquel o acero inoxidable. Estos electrodos tienen conductos para el paso del gas y para purgar el electrolito que pueda filtrarse.



Ilustración 4. Electrolizador alcalino. Fuente: John Cockeril.

- **La electrólisis PEM**

La electrólisis PEM, también conocida como Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones, se basa en la conducción de protones a través de una membrana hecha de un polímero fluorado y sulfonado. La membrana puede tener diferentes grosores, que van desde 25 a 250 micrómetros (Carmo et al., 2013).

En una celda PEM se distinguen membrana, electrodos, capas de transporte poroso y placas bipolares, y los materiales y configuraciones pueden variar entre fabricantes (International Renewable Energy Agency, 2020, p. 32).

Los polímeros conductores de iones que forman la membrana tienen un doble propósito. En primer lugar, transportan cargas eléctricas entre el cátodo y el ánodo. También, separan los productos formados en cada electrodo. En el ánodo, el agua líquida se consume y se forma oxígeno. El protón resultante queda rodeado de moléculas de agua (proceso de solvatación) y se transfiere a través de la membrana debido a efectos eléctricos. Una vez en el cátodo, cesa la solvatación y se produce la reacción de formación de hidrógeno a partir de dos protones (Carmo et al., 2013).

La membrana, al ser tratada con un material ácido conductor de iones, limita el uso de catalizadores a metales de transición poco comunes que tienen un comportamiento estable en condiciones ácidas. Estos metales incluyen rodio, rutenio, platino, iridio y sus óxidos. En la tecnología actual, se utiliza platino en el cátodo y óxido de iridio en el ánodo (International Renewable Energy Agency, 2020, p. 32). Sin embargo, la investigación se centra en encontrar catalizadores que mejoren la eficiencia de ambos procesos (oxidación del agua y reducción del protón) y reduzcan los costos asociados.

Se emplean dos placas de titanio, aunque también pueden utilizarse otros materiales, como límites de la celda electroquímica. Entre estas placas se encuentra el ensamblaje de membrana-electrodo (MEA, por sus siglas en inglés, Membrane Electrode Assembly). El agua fluye a través de canales mecanizados en las placas de titanio. Las mezclas bifásicas de agua y oxígeno, así como agua e hidrógeno, se recolectan en los escapes del ánodo y del cátodo, respectivamente.

Entre las placas de titanio y el MEA, hay un espacio ocupado por colectores de corriente cuya función es transmitir la electricidad desde las placas de titanio hacia cada lado del MEA. Estos colectores de corriente también tienen porosidad que permite el paso del agua líquida y los gases. Esta capa suele estar compuesta por partículas de titanio u otro metal inerte.

La electrólisis PEM demanda agua desionizada como requisito para su funcionamiento, lo cual implica un costo adicional al sistema. Esto se debe a que los metales tienden a infiltrarse en la membrana, lo que resulta en un

aumento de la resistencia interna.

La electrólisis PEM permite una operación flexible, aunque el rango de funcionamiento continuo debe tomarse de la documentación del equipo seleccionado (Buttler y Spliethoff, 2018).

Esta tecnología ofrece la ventaja adicional de poder generar corrientes de hidrógeno a altas presiones. En comparación con la tecnología alcalina, la tecnología PEM es más adecuada para este propósito debido a que sus celdas son de menor tamaño en términos de superficie y presentan una integración mecánica más simple, gracias al uso de un electrolito sólido, como la membrana.

En la actualidad, se pueden alcanzar presiones de salida de 30-60 bares en electrolizadores PEM, lo que simplifica y reduce los costos de las soluciones de integración que requerirían etapas posteriores de compresión.



Ilustración 5. Electrolizador PEM Qlsc-h1.

- **La electrólisis SOEC**

La electrólisis de óxido sólido, una tecnología en fase de desarrollo presenta una diferencia fundamental en comparación con las otras tres tipologías mencionadas, que radica en su temperatura de operación. En este caso, dicha temperatura se sitúa en un rango de 600 a 850 grados Celsius. Esta alta temperatura conlleva una mayor eficiencia en el proceso, lo que implica un menor consumo eléctrico debido a la integración térmica que se logra. Explicado en otras palabras, la combinación de altas temperaturas en la electrólisis de óxido sólido permite alcanzar una mayor eficiencia y reducir el consumo eléctrico necesario.

A la temperatura mencionada, el suministro de agua al electrolizador se realiza en forma de vapor sobrecalentado. Cuando este vapor entra en contacto con el cátodo, experimenta una reducción, lo que da como resultado la formación de hidrógeno gaseoso y aniones de oxígeno. En este punto, los óxidos sólidos entran en juego, actuando como electrolito y separador entre los dos lados de la celda, al mismo tiempo que funcionan como conductores de iones.

Los iones de oxígeno migran hacia el ánodo, donde se produce la reacción de formación de oxígeno gaseoso (International Renewable Energy Agency, 2020, p. 31). En esta reacción anódica, también se generan electrones que circularán a través de un circuito externo, convirtiéndose en reductores en la reacción anódica en el lado opuesto.

En las investigaciones y avances actuales, la electrólisis de óxido sólido utiliza como electrolito una forma estabilizada de zirconia ( $ZrO_2$ ) con la adición de ytrio y óxidos de escandio. Este material exhibe una conductividad iónica satisfactoria cuando se encuentra expuesto a temperaturas elevadas.

Los componentes principales de la electrólisis de óxido sólido incluyen las placas bipolares fabricadas en acero inoxidable y el recubrimiento de manganita en el electrolito de zirconia. Aunque opera a altas temperaturas, no se elimina toda función catalítica (International Renewable Energy Agency, 2020, p. 32). Esto abre la posibilidad de utilizar electrodos que prescindan del platino, aunque actualmente se sigue utilizando para asegurar un buen

contacto eléctrico entre las celdas. En el cátodo, se emplea un cermet, que es una aleación de metal y cerámica, que contiene níquel y zirconio. En el ánodo, se utiliza platino dopado con manganita de lantano.

Esta tecnología no exige un alto grado de pureza del agua, aunque se ha comprobado que las impurezas presentes en el vapor utilizado como alimentación tienen un impacto significativo en la velocidad de degradación del sistema.

Es importante destacar que la tecnología de electrólisis de óxido sólido se encuentra en un estado de desarrollo industrial aún en proceso de maduración. En comparación con las tecnologías alcalina y polimérica, se encuentra en una etapa menos avanzada de desarrollo.

### • La electrólisis AEM

La tecnología AEM (Anion Exchange Membrane), actualmente en fase de desarrollo, combina los principios de las tecnologías alcalina y PEM (Proton Exchange Membrane), dando lugar a una variante que busca aprovechar las ventajas de ambas. Hay que tener en cuenta que esta tecnología aún se encuentra en una etapa de desarrollo y no ha alcanzado el nivel de industrialización de las dos primeras mencionadas (Enapter, s. f.).

La electrólisis AEM permite separar el agua en hidrógeno y oxígeno utilizando una membrana, al igual que en la electrólisis PEM. Sin embargo, en este caso, la membrana es de naturaleza aniónica. Los iones hidroxilo se difunden a través del sistema AEM hacia la sección del ánodo, mientras que los electrones son transportados a través de un circuito externo hasta el ánodo mismo, donde se produce la reacción de formación de moléculas de hidrógeno (Wang, 2020).

La electrólisis AEM combina un medio alcalino con una membrana de intercambio aniónico. Su configuración concreta debe describirse a partir del diseño considerado (Wang, 2020).

El agua ingresa a través del ánodo y alcanza el cátodo, donde ocurre su reducción, generando hidrógeno y iones hidroxilo mediante la aportación de electrones. La atracción positiva ejercida por el ánodo provoca la difusión de los iones hidroxilo a través de la membrana hacia el lado anódico de la celda. La reacción anódica implica la recombinación de los iones hidroxilo para formar agua y oxígeno.

A diferencia de la electrólisis alcalina, no se requiere una alta concentración de KOH en esta tecnología. En algunos desarrollos, se está utilizando una disolución al 1% de  $K_2CO_3$  para este propósito.

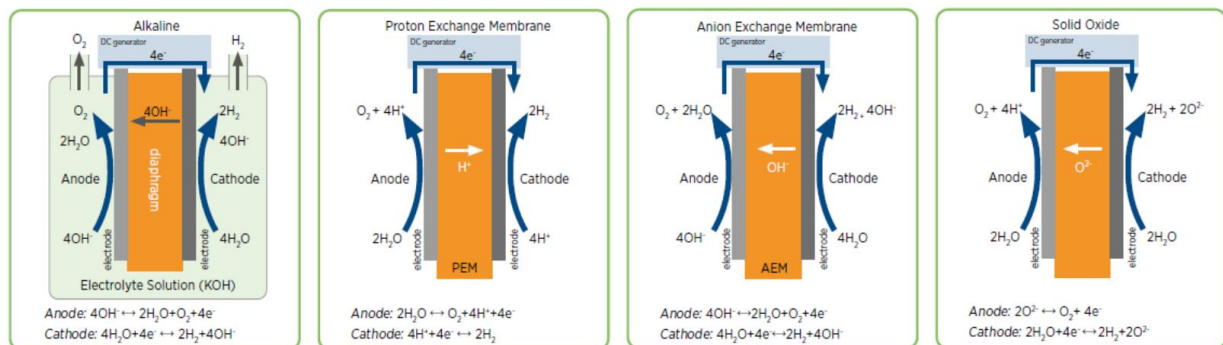


Ilustración 6. Resumen funcionamiento de los tipos de electrolizadores. Fuente: International Renewable Energy Agency (2020), figura 6, p. 31.

|                                                                                      | 2020     |          |       |         | 2050     |         |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|-------|---------|----------|---------|-------|-------|
|                                                                                      | Alkaline | PEM      | AEM   | SOEC    | Alkaline | PEM     | AEM   | SOEC  |
| Cell pressure [bara]                                                                 | < 30     | < 70     | < 35  | < 10    | > 70     | > 70    | > 70  | > 20  |
| Efficiency (system) [kWh/KgH <sub>2</sub> ]                                          | 50-78    | 50-83    | 57-69 | 45-55   | < 45     | < 45    | < 45  | < 40  |
| Lifetime [thousand hours]                                                            | 60       | 50-80    | > 5   | < 20    | 100      | 100-120 | 100   | 80    |
| Capital costs estimate for large stacks (stack-only, > 1 MW) [USD/kW <sub>el</sub> ] | 270      | 400      | -     | > 2 000 | < 100    | < 100   | < 100 | < 200 |
| Capital cost range estimate for the entire system, >10 MW [USD/kW <sub>el</sub> ]    | 500-1000 | 700-1400 | -     | -       | < 200    | < 200   | < 200 | < 300 |

Ilustración 7. Indicadores de tecnología de electrólisis en 2020 y proyecciones 2050. Fuente: International Renewable Energy Agency (2020), tabla ES1, p. 12.

#### 4.1.6 Almacenamiento y transporte

El almacenamiento y transporte del hidrógeno son aspectos críticos para el desarrollo de la economía del hidrógeno y su utilización como fuente de energía. Debido a su baja densidad energética por unidad de volumen y a sus propiedades físicas, el hidrógeno requiere de métodos especializados para su almacenamiento y transporte eficiente (Gardiner, 2009).

En cuanto al almacenamiento, existen varias opciones disponibles, cada una con sus ventajas e inconvenientes. Estas presentan el almacenamiento en forma comprimida, el almacenamiento criogénico y el almacenamiento en forma de compuestos químicos.

El almacenamiento en forma comprimida implica comprimir el hidrógeno a alta presión y almacenarlo en tanques adecuados. Los tanques de almacenamiento a alta presión pueden ser de acero reforzado o de materiales compuestos. Este enfoque es adecuado para aplicaciones estacionarias y de transporte a corta distancia. Sin embargo, la compresión del hidrógeno requiere una cantidad significativa de energía y los tanques de almacenamiento deben ser robustos y seguros.

El almacenamiento criogénico implica enfriar el hidrógeno a temperaturas extremadamente bajas (por debajo de -253 °C) para convertirlo en un líquido (Gardiner, 2009). Esto permite un almacenamiento más denso y eficiente en términos de volumen. Se utilizan tanques de almacenamiento criogénico aislados térmicamente para mantener el hidrógeno líquido a temperaturas bajas. Sin embargo, este enfoque también requiere una gran inversión energética para enfriar y mantener la temperatura, así como la necesidad de controlar las pérdidas por evaporación del hidrógeno líquido.

Otra opción de almacenamiento es a través de compuestos químicos. El hidrógeno puede combinarse con otros elementos para formar compuestos como hidruros metálicos, hidratos y amoníaco. Estos compuestos pueden almacenar hidrógeno de manera segura y a alta densidad, y pueden ser revertidos para liberar el hidrógeno cuando sea necesario. Sin embargo, este enfoque requiere sistemas específicos para la generación y recuperación del hidrógeno a partir de los compuestos, lo que agrega complejidad y costos adicionales.

En cuanto al transporte del hidrógeno, existen diferentes opciones según la distancia y el volumen requerido. El transporte a corta distancia generalmente se realiza mediante tuberías, utilizando tecnologías y materiales adecuados para evitar fugas y garantizar la seguridad. Para distancias más largas, se utilizan contenedores de alta presión o criogénicos, que pueden ser transportados en camiones, barcas o trenes. También se están

desarrollando tecnologías de transporte en forma de hidrógeno líquido a bordo de barcos especializados (International Energy Agency, 2025).

#### **4.1.7 Normativa**

En cuanto a la normativa aplicable en el transporte de hidrógeno es importante destacar:

- Reglamentación de Transporte de Mercancías Peligrosas (RID/ADR): Incluye disposiciones para el transporte seguro de hidrógeno en carreteras y ferrocarriles.
- Código Marítimo Internacional (IMO): Regula el transporte seguro de hidrógeno por mar.
- Reglamentación para el Transporte Aéreo de Mercancías Peligrosas (IATA-DGR): Establece requisitos para el transporte seguro de hidrógeno por vía aérea.
- Directiva sobre Energías Renovables (RED II): Establece objetivos y requisitos para la promoción de energías renovables, incluido el hidrógeno.
- Reglamento sobre Etiquetado y Clasificación de Sustancias y Mezclas (CLP): Define los criterios para la clasificación, etiquetado y envasado seguro del hidrógeno y otros productos químicos.
- Normas de Seguridad para la Producción, Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno (EN 14912): Proporciona directrices técnicas y de seguridad para instalaciones de hidrógeno.
- Directiva sobre Energías Renovables (RED II): Establece objetivos y requisitos para la promoción de energías renovables, incluido el hidrógeno.
- Reglamento sobre Etiquetado y Clasificación de Sustancias y Mezclas (CLP): Define los criterios para la clasificación, etiquetado y envasado seguro del hidrógeno y otros productos químicos.
- Normas de Seguridad para la Producción, Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno (EN 14912): Proporciona directrices técnicas y de seguridad para instalaciones de hidrógeno.

## **4.2 Energía solar fotovoltaica**

### **4.2.1 Principio de funcionamiento**

El funcionamiento de la tecnología solar fotovoltaica se basa en el principio fotoeléctrico, por el cual determinados materiales semiconductores son capaces de convertir la energía procedente de la radiación solar en energía eléctrica (U.S. Department of Energy, s. f.-c).

Las células fotovoltaicas están formadas principalmente por silicio semiconductor y tienen una unión tipo p-n formada por el dopado del material. Cuando los fotones de la radiación solar inciden en la célula con una energía superior a la energía de banda del semiconductor se generan unos pares electrón-huecos. El campo eléctrico interno que se encuentra en la unión p-n separa dichas cargas, dando lugar al movimiento de electrones a través de un circuito externo y originado corriente continua (U.S. Department of Energy, s. f.-c).

La tensión que se genera en una célula es muy pequeña, alrededor de 0,5-0,7 V. Debido a eso las células se conectan en serie y paralelo para dar lugar a los módulos fotovoltaicos de mayor tensión, y a su vez dichos módulos se conectan en unas cadenas denominadas strings para dar la potencia necesaria.

La energía producida por los módulos fotovoltaicos es corriente continua (CC), por tanto, es necesario equipos (inversores) que conviertan dicha corriente en corriente alterna (AC) para poder ser inyectada en la red (U.S. Department of Energy, 2019).

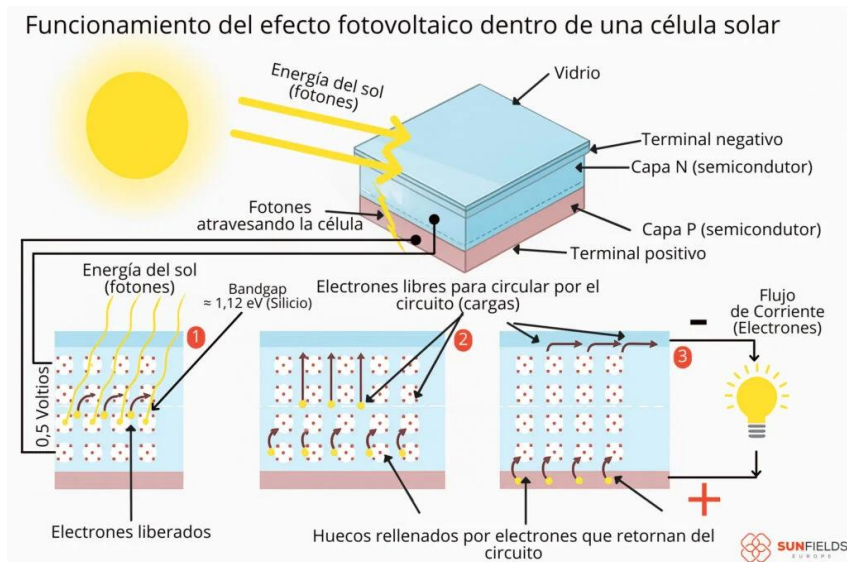


Ilustración 8. Funcionamiento del efecto fotoeléctrico.

## 4.2.2 Componentes de una instalación fotovoltaica

### 4.2.2.1 Módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos son los componentes generadores de la instalación. Están formado por un conjunto de células conectadas en serie y paralelo eléctricamente y encapsuladas entre materiales protectores para protegerlos de los agentes externos.

En la actualidad los módulos más comercializados son los de silicio monocristalino debido a su alta eficiencia (superando en algunos casos el 22%) y a su elevada vida útil (superior a 25 años).



Ilustración 9. Módulo fotovoltaico.

### 4.2.2.2 Estructuras soporte

Las estructuras soporte son encargadas de fijar los módulos al terreno de tal forma que se garantice la inclinación

y orientación adecuada para la máxima captación de radiación solar.

Se pueden diferenciar entre:

- Estructuras fijas
- Seguidores solares de un eje
- Seguidores solares de dos ejes.

En las plantas fotovoltaicas es habitual implementar seguidores solares de un eje (trackers), y así incrementar la producción anual entre un 15-25 %, en comparación con estructuras fijas, aunque su cuantificación requiere comparar simulaciones equivalentes (European Commission, Joint Research Centre, s. f.).

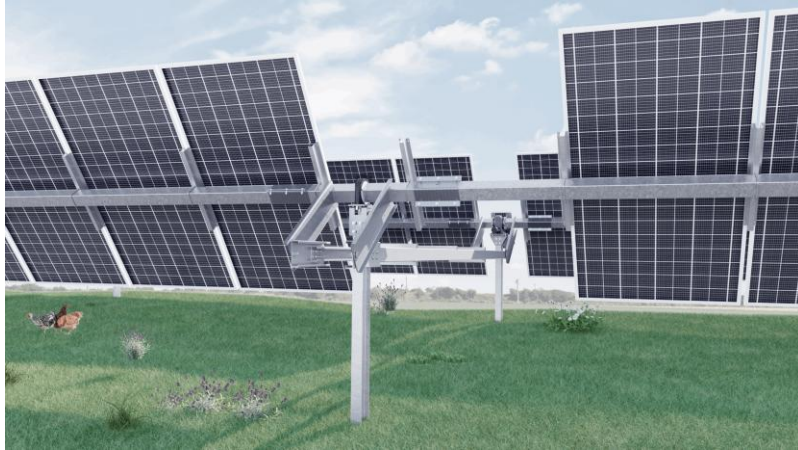


Ilustración 10. Tracker 1V (seguidor un eje).

#### 4.2.2.3 Inversores

Los inversores son equipos electrónicos cuya finalidad es convertir la corriente eléctrica continua (CC) a corriente alterna (AC) sincronizada con la red eléctrica (U.S. Department of Energy, 2019).

Además de dicha función, tienen sistemas que son capaces de seguir el punto de máxima potencia (MPPT), que posibilitan maximizar la producción de energía trabajando en el rango de funcionamiento de máxima potencia de los módulos (Sungrow, 2025, p. 2).



Ilustración 11. Inversor SUNGROW.

#### 4.2.2.4 Centro de transformación (CT) o Power Station (PS)

Los centros de transformación son los encargados de subir la tensión eléctrica desde la tensión de salir de los inversores hasta la tensión de inyección a la red, reduciendo las pérdidas por efecto Joule.

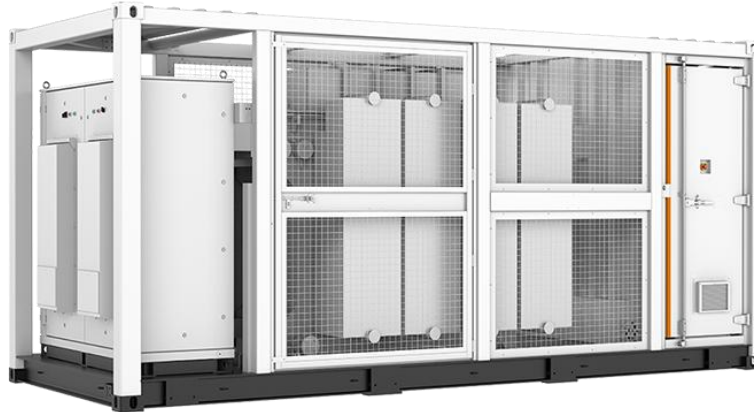


Ilustración 12. Centro de transformación SUNGROW.

#### 4.2.2.5 Sistemas de monitoreo

Actualmente, las plantas grandes (Utility-scale) cuentan con sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) que se utilizan para supervisar la producción eléctrica en tiempo real, registrar parámetros ambientales, detectar averías y optimizar el funcionamiento de la planta.

#### 4.2.2.6 Sistemas de protección

Los sistemas de protección son uno de los elementos fundamentales encargados de la seguridad de equipos y personas, entre ellos nos encontramos con protección eléctrica contra sobrecorrientes, sobretensiones, descargas atmosféricas o defectos de aislamiento.

### 4.2.3 Producción eléctrica

La producción eléctrica de una planta fotovoltaica depende mayormente del recurso solar, la potencia instalada y el rendimiento global de la planta.

La energía eléctrica anual producida se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$E_{FV} = P_{inst} \cdot H_{eq} \cdot PR$$

- $E_{FV}$ : energía anual generada (kWh/año).
- $P_{inst}$ : potencia pico instalada (kWp).
- $H_{eq}$ : horas solares equivalentes (h/año).
- $PR$ : *Performance Ratio* o factor de rendimiento global de la planta.

La expresión PR (*Performance Ratio*) es el rendimiento real de la planta entre el rendimiento teórico, donde se incluye las pérdidas por temperatura, suciedad, degradación de los módulos, inversores, sombras, cableado y disponibilidad de equipos (International Electrotechnical Commission, 2021). Este valor suele situarse entre 0,80 y 0,90.

Atendiendo a la región de Sevilla, se puede obtener producciones comprendidas entre 1.800 kWh/kWp·año y 2.000 kWh/kWp·año. Esto hace que sea una localización adecuada para establecer plantas fotovoltaicas híbridadas con hidrógeno verde, al haber un mayor número de horas de funcionamiento.

# 5 BASES DE DISEÑO

## 5.1 Introducción

Las bases de diseño van a formar el conjunto de criterios técnicos e hipótesis de cálculo que van a servir de referencia para el desarrollo de la ingeniería Fron-End Engineering Design (FEED). La finalidad es definir un criterio común para todas las partes de ingeniería involucradas en el proyecto, permitiendo la coherencia entre el diseño del proceso, la ingeniería eléctrica, el dimensionamiento de los equipos, y estimación de costes.

En dicho proyecto, las bases de diseño definen el punto de partida para un diseño de una instalación de producción de hidrógeno mediante electrólisis PEM hibridada con una planta fotovoltaica.

El contenido de estas bases se utilizará como punto de partida para la realización de los balances de materia y energía, la selección y predimensionamiento de los equipos principales, el desarrollo de los diagramas de procesos (PFD), el diseño de su diagrama (P&ID) y la evaluación técnico-económica del proyecto. Cualquier cambio en las hipótesis de partida podrá afectar a las fases posteriores del proyecto dando lugar a la revisión de los cálculos.

## 5.2 Datos generales del proyecto

| Concepto                       | Valor de diseño                                                           |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Nombre del proyecto            | Planta de producción de Hidrógeno verde                                   |
| Tipo de ingeniería             | FEED                                                                      |
| Ubicación                      | Provincia de Sevilla                                                      |
| Tecnología de producción       | Electrólisis PEM                                                          |
| Fuente principal de energía    | Planta solar fotovoltaica + conexión a red                                |
| Potencia FV instalada          | 23 MWp                                                                    |
| Potencia nominal en inversores | 21,44 MWAC                                                                |
| Potencia del electrolizador    | 20 MW                                                                     |
| Vida útil de diseño            | 25 años                                                                   |
| Estrategia de operación        | Dos escenarios: Máxima producción de hidrógeno y análisis de sensibilidad |

Tabla 3. Datos generales del proyecto.

## 5.3 Condiciones de diseño del emplazamiento

Los factores considerados para seleccionar la ubicación del emplazamiento se basaron en criterios técnicos, energéticos y medioambientales obtenidos de datos climatológicos de la provincia de Sevilla.

A continuación, se describen estos criterios:

- Recurso solar: El emplazamiento elegido tiene una alta radiación solar directa. También, las velocidades

máximas de viento se encuentran dentro de los niveles permisibles. El perfil de temperatura ambiente es moderado, lo que favorece la eficiencia de los módulos solares.

- Evacuación eléctrica: Se asume que el emplazamiento seleccionado se encuentra cerca de infraestructuras eléctricas existentes que permiten evacuar la energía generada por la planta.
- Características del terreno: El emplazamiento elegido tiene un terreno con una superficie interior al vallado de la planta de 29,6 hectáreas. El terreno también cumple con requisitos geotécnicos apropiados para garantizar una base sólida para el hincado de las estructuras de la planta.
- Infraestructuras de acceso: Se asume la presencia de infraestructuras de acceso cercanas al emplazamiento facilitará el transporte de los componentes necesarios para la construcción y mantenimiento de la planta.
- Criterios medioambientales: Se ha evitado ubicar la planta en áreas protegidas por legislación comunitaria, estatal o autonómica, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y preservar los espacios naturales.

## 5.4 Emplazamiento

### 5.4.1 Situación y accesibilidad de la planta fotovoltaica

La planta fotovoltaica, así como la planta de producción de hidrógeno se encuentra situada en la provincia de Sevilla.

| Parámetro          | Valor de diseño | Unidad   | Observaciones         |
|--------------------|-----------------|----------|-----------------------|
| Municipio          | Brenes          | -        | Provincia de Sevilla  |
| Comunidad autónoma | Andalucía       | -        | España                |
| Latitud            | 37,55           | °        | Coordenada aproximada |
| Longitud           | -5,87           | °        | Coordenada aproximada |
| Altitud            | 18              | m.s.n.m. | Valor medio           |

Tabla 4. Condiciones generales del emplazamiento.

### 5.4.2 Datos ambientales del emplazamiento

La planta fotovoltaica tiene una capacidad de 23 megavatios pico (MWp), con 21,44 MW instalados en inversores. Presenta una altitud promedio de 18 metros sobre el nivel del mar.

A lo largo de un período de 20 años, se han registrado los siguientes valores del emplazamiento, los cuales se detallan en la siguiente tabla:

| Parámetro                    | Valor de diseño | Unidad | Observaciones                    |
|------------------------------|-----------------|--------|----------------------------------|
| Temperatura máxima de diseño | 40              | °C     | Diseño de equipos exteriores     |
| Temperatura mínima de diseño | 4               | °C     | Condición conservadora de diseño |
| Temperatura media anual      | 19,5            | °C     | Valor climatológico aproximado   |

|                                     |       |                         |                                          |
|-------------------------------------|-------|-------------------------|------------------------------------------|
| Irradiación Global Horizontal (GHI) | 2.020 | kWh/m <sup>2</sup> ·año | Recurso solar de la zona                 |
| Velocidad de viento                 | 27    | m/s                     | Valor preliminar para diseño estructural |
| Precipitación media anual           | 525   | mm/año                  | Clima mediterráneo                       |
| Horas de sol                        | 3.000 | h/año                   | Valor medio anual                        |

Tabla 5. Datos ambientales.

## 6 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

### 6.1 Introducción

En el presente capítulo se describe la planta fotovoltaica y el proceso de producción de hidrógeno verde, definiendo las principales etapas que forman la instalación, y la interacción entre los diferentes sistemas que la componen. Esto permite establecer un esquema de la ingeniería de procesos, definiendo las corrientes principales de materia y energía, así como los criterios operacionales de la planta.

El funcionamiento de la planta se puede dividir en siete subsistemas principales:

- Sistema de generación fotovoltaica
- Sistema de conversión y distribución eléctrica.
- Sistema de tratamiento de agua.
- Sistema de producción de hidrógeno mediante electrólisis PEM.
- Sistema de tratamiento de hidrógeno.
- Sistema de compresión y almacenamiento.
- Servicios auxiliares.

La descripción de este capítulo sirve como referencia para la elaboración del diagrama de proceso (PFD), la definición de las corrientes y la realización de los balances de materia y energía que se presenta en los capítulos posteriores.

### 6.2 Filosofía general del proceso

La planta ha sido diseñada para transformar la energía eléctrica producida por una planta fotovoltaica en hidrógeno verde mediante electrólisis del agua. Por ello, dicha instalación se compone de distintos sistemas de procesos que operan de forma coordinada con la finalidad de asegurar una producción segura y eficiente. La conexión de la red eléctrica permite abastecer de electricidad el electrolizador PEM cuando el recurso solar es insuficiente.

El proceso comienza con la generación eléctrica de la planta fotovoltaica (PV-100). La energía producida es acondicionada por el sistema eléctrico (ELC-100) que transforma la tensión y la corriente para adaptarlas al sistema que requiere la electrólisis. De forma paralela el agua es sometida a un proceso de tratamiento (WT-100), en dicha unidad se realiza una serie de procesos (desionización, enfriamiento...) necesarios para adaptar las calidades a las condiciones del electrolizador. Una vez tratada, se almacena en un depósito para su posterior

uso en el electrolizador.

Una vez que se obtiene el suministro eléctrico y el agua desmineralizada, entra en juego el sistema de electrólisis (EL-100) llevando a cabo la disociación electroquímica del agua, dando lugar a dos corrientes: hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno es llevado a un sistema de tratamiento (HY-100), donde se eliminan la humedad y posibles impurezas, permitiendo que se almacene con la mayor calidad posible. El agua que no reacciona es recirculada para optimizar su consumo y mantener las condiciones operacionales del electrolizador.

Posteriormente, el hidrógeno (seco) es comprimido mediante el sistema de compresión (CP-100) hasta las condiciones de presión definidas en las bases de diseño. Por último, el gas comprimido se almacena en recipientes a presión (ST-100), desde donde será transportado a sus consumidores finales o a las aplicaciones pertinentes.

Por otro lado, el oxígeno generado durante el proceso de electrólisis supone un subproducto del proceso. En el alcance del proyecto se valora su almacenamiento y conducción mediante el sistema de separación de oxígeno (OX-100), dejando prevista su evacuación de manera segura o su posible valorización posterior en función de la viabilidad económica.

Desde el punto de vista operativo, se va a estudiar una estrategia de operación que prioriza la máxima producción de hidrógeno mediante el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica y la importación de la red eléctrica cuando sea necesario, y un análisis de sensibilidad con criterios económicos.

| Código  | Unidad del proceso             | Función                                                             |
|---------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| PV-100  | Planta fotovoltaica            | Generación de energía eléctrica                                     |
| ELC-100 | Sistema eléctrico              | Conversión y distribución de energía                                |
| WT-100  | Sistema de tratamiento de agua | Producción de agua desmineralizada                                  |
| EL-100  | Electrolizador PEM             | Producción de hidrógeno y oxígeno                                   |
| HY-100  | Tratamiento de hidrógeno       | Separación de condensados y secados                                 |
| CP-100  | Sistema de compresión          | Compresión de hidrógeno                                             |
| ST-100  | Almacenamiento                 | Almacenamiento de hidrógeno                                         |
| OX-100  | Gestión del oxígeno            | Evacuación o aprovechamiento de oxígeno                             |
| UT-100  | Servicios auxiliares           | Refrigeración, aire de instrumentos, drenajes y sistemas auxiliares |

Tabla 6. Unidades del proceso.

## 6.3 Descripción de los subsistemas

### 6.3.1 Unidad PV-100 – Sistema de generación fotovoltaica

El sistema fotovoltaico presenta una potencia pico de 23 MWp, formado por módulos de silicio monocristalino en estructuras fijas 3V31. La energía generada es llevada hacia los inversores string donde se transforma de corriente continua a corriente alterna.

Posteriormente, la energía eléctrica es conducida hacia los transformadores donde se eleva la tensión hacia la tensión propia de trabajo del sistema eléctrico de la planta (ELC-100) desde donde se alimenta al sistema de electrólisis y servicios auxiliares.

| Entradas de proceso             |                                                         |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Corriente                       | Descripción                                             |
| S-001                           | Radiación solar                                         |
| S-002                           | Condiciones ambientales (Temperatura, viento y humedad) |
| Salidas de proceso              |                                                         |
| Corriente                       | Destino                                                 |
| S-003                           | Energía eléctrica en AC a ELC-100                       |
| Equipos principales             |                                                         |
| Código                          | Equipo                                                  |
| PV-101                          | Planta fotovoltaica                                     |
| INV-101                         | Inversores fotovoltaicos                                |
| TR-101                          | Centros de transformación                               |
| SCADA-101                       | Sistema de monitorización y supervisión                 |
| Variables principales de diseño |                                                         |
| Variable                        | Valor de diseño                                         |
| Potencia pico instalada         | 23 MWp                                                  |
| Potencia nominal en inversores  | 21,44 MW <sub>AC</sub>                                  |
| Tecnología de módulos           | Silicio monocristalino                                  |
| Configuración                   | Estructura fija 1V                                      |
| Vida útil de diseño             | 25 años                                                 |

Tabla 7. Variables unidad PV-100.

### 6.3.2 Unidad ELC-100 – Sistema eléctrico y distribución de potencia

La energía eléctrica generada por la unidad PV-100 (planta fotovoltaica) es transformada en corriente alterna por los inversores y enviada hacia los centros de transformación donde se eleva la tensión requerida para la distribución interior de la planta y cuando proceda con el intercambio con red eléctrica.

Existe un cuadro general de distribución que alimenta el sistema de electrólisis (EL-100), a la unidad de tratamiento de agua (WT-100), los compresores (CP-100), sistemas de refrigeración, alumbrado, instrumentación y resto de servicios auxiliares.

El diseño de esta unidad contempla un escenario base. En dicho escenario, toda la energía producida por la planta fotovoltaica irá destinada a maximizar la producción de hidrógeno y cuando el recurso solar sea insuficiente, la energía eléctrica que falte se contempla mediante importación desde red.

La supervisión del sistema eléctrico se realiza mediante un EMS (Energy Management System) integrado en el SCADA de la planta.

| Entradas de proceso             |                                                                |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Corriente                       | Descripción                                                    |
| E-001                           | Energía eléctrica procedente de la planta FV (PV-100)          |
| E-002                           | Energía procedente de la red eléctrica                         |
| I-001                           | Señales del SCADA                                              |
| Salidas de proceso              |                                                                |
| Corriente                       | Destino                                                        |
| E-003                           | Alimentación eléctrica a sistema electrólisis (EL-100)         |
| E-004                           | Alimentación a sistema de tratamiento de agua (WT-100)         |
| E-005                           | Alimentación a los servicios auxiliares (UT-100)               |
| E-006                           | Vertido de electricidad a la red eléctrica                     |
| E-007                           | Alimentación eléctrica a CP-100                                |
| Equipos principales             |                                                                |
| Código                          | Equipo                                                         |
| SWG-101                         | Cuadro general de distribución                                 |
| EMS-101                         | Sistema de gestión energética                                  |
| UPS-101                         | Sistema de alimentación ininterrumpida para servicios críticos |
| Variables principales de diseño |                                                                |

| Variable                              | Valor de diseño                   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Potencia nominal FV en AC             | 21,44 MWAC                        |
| Potencia nominal del electrolizador   | 20 MW                             |
| Capacidad del sistema de distribución | Según balance eléctrico de cargas |
| Frecuencia de operación               | 50 Hz                             |
| Factor de potencia objetivo           | $\geq 0,98$                       |
| Conexión a red                        | Importación                       |

Tabla 8. Variables unidad ELC-100.

### 6.3.3 Unidad WT-100 – Sistema de tratamiento de agua

El agua utilizada en la electrólisis procede de la red de abastecimiento y se almacena inicialmente en un depósito (TK-100), después es conducida hacia la planta de tratamiento (WT-101), donde se realiza un proceso de acondicionamiento para eliminar impurezas o sales disueltas. El diseño adopta un consumo de agua de red de 15,9 l/kg H<sub>2</sub> a unas temperaturas admisibles de alimentación entre 5 y 35°C según las especificaciones del modelo de electrolizador Nel MC4000 tomado como referencia (Nel Hydrogen, s. f.).

Por último, el agua se somete a un proceso de desionización (IX-101), donde se alcanza una alta pureza para alimentar el electrolizador. Las bombas (P-101 A/B) se encargan de garantizar la circulación del agua en las condiciones hidráulicas requeridas.

| Entradas de proceso |                                                 |
|---------------------|-------------------------------------------------|
| Corriente           | Descripción                                     |
| 27                  | Agua de red                                     |
| E-004               | Alimentación eléctrica desde ELC-100            |
| Salidas de proceso  |                                                 |
| Corriente           | Destino                                         |
| 25-24               | Agua tratada procedente de WTP-101              |
| 20-21               | Agua desmineralizada hacia EL-100               |
| 17                  | Corriente de rechazo                            |
| 18                  | Agua recuperada del separador de O <sub>2</sub> |
| Equipos principales |                                                 |
| Código              | Equipo                                          |
| TK-100              | Depósito de agua bruta                          |
| WTP-101             | Sistema acondicionamiento de agua               |

|                                        |                        |
|----------------------------------------|------------------------|
| AC-101                                 | Air cooler             |
| IX-101                                 | Ion Exchanger          |
| P-101 A/B                              | Bombas                 |
| <b>Variables principales de diseño</b> |                        |
| <b>Variable</b>                        | <b>Valor de diseño</b> |
| Calidad del agua                       | Desmineralizada        |
| Conductividad                          | < 1µS/cm               |
| Temperatura de operación               | Ambiente               |
| Funcionamiento                         | Continuo               |

Tabla 9. Variables unidad WT-100.

#### 6.3.4 Unidad EL-100 – Sistema de electrólisis

Dicha unidad constituye el núcleo del proceso de producción de hidrógeno verde, donde se produce la electrólisis del agua produciendo hidrógeno y oxígeno a partir de la energía eléctrica de la planta fotovoltaica y de la red eléctrica.

El agua desmineralizada procedente de la unidad WT-100 es bombeada hacia el sistema de electrólisis para alimentar a los Stacks del electrolizador PEM. Al mismo tiempo el sistema recibe energía eléctrica en corriente continua CC procedente de la unidad ELC-100.

En el interior de las células electrolíticas se produce la disociación de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno es generado en el cátodo (corriente 1) mientras que el oxígeno es generado en el ánodo (corriente 17).

Mientras que está funcionando el electrolizador se produce una recirculación del agua y una refrigeración para mantener unas condiciones adecuadas de funcionamiento del electrolizador. Ese calor generado durante la reacción es eliminado por el circuito de refrigeración (Air cooler), permitiendo que la temperatura de operación se encuentre dentro de los límites establecidos por el fabricante.

El hidrógeno producido en la unidad contiene una pequeña humedad y es enviado al sistema de tratamiento de hidrógeno (HY-100), donde se enfriará, secará y acondicionará antes de su compresión. De manera paralela el oxígeno producido es conducido a la unidad OX-100 para su gestión.

| <b>Entradas de proceso</b> |                                                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Corriente</b>           | <b>Descripción</b>                                |
| 21                         | Agua desmineralizada procedente de WT-100         |
| 2                          | Retorno agua desde el separador de H <sub>2</sub> |
| E-003                      | Energía eléctrica procedente de ELC-100           |
| <b>Salidas de proceso</b>  |                                                   |
| <b>Corriente</b>           | <b>Destino</b>                                    |

|                                           |                                                   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1                                         | Hidrógeno (húmedo) a HY-100                       |
| 17                                        | Oxígeno a OX-100                                  |
| 3                                         | Agua de recirculación hacia stacks                |
| <b>Equipos principales</b>                |                                                   |
| <b>Código</b>                             | <b>Equipo</b>                                     |
| EL-101                                    | Electrolizadores PEM                              |
| EL-101 A-H                                | Módulos de electrólisis PEM (8 módulos de 2,5 MW) |
| STK-101 A-P                               | Stacks PEM (16 stacks de 1,25 MW)                 |
| P-102 A/B                                 | Bombas de recirculación                           |
| <b>Variables principales de diseño</b>    |                                                   |
| <b>Variable</b>                           | <b>Valor de diseño</b>                            |
| Tecnología                                | PEM                                               |
| Potencia nominal                          | 20 MW                                             |
| Presión de operación                      | 30 barg                                           |
| Temperatura de entrada stack              | 65 °C                                             |
| Temperatura de salida stack               | 70 °C                                             |
| Pureza del hidrógeno                      | ≥ 99,999%                                         |
| Consumo específico de energía del stack   | 53,2 kWh/kg H <sub>2</sub> (Valor de diseño)      |
| Consumo específico de energía del sistema | 56,77 kWh/kg H <sub>2</sub>                       |
| Consumo agua de alimentación              | 15,9 L/kg H <sub>2</sub> (Valor de diseño)        |
| Caudal de agua de alimentación            | 5,63 m <sup>3</sup> /h                            |

Tabla 10. Variables unidad EL-100.

### 6.3.5 Unidad HY-100 – Sistema de tratamiento de hidrógeno

La unidad HY-100 tiene como objetivo tratar el hidrógeno de tal manera que tenga las condiciones adecuadas para su compresión, almacenamiento y utilización final, eliminando impurezas y humedad.

El hidrógeno producido en la unidad EL-100 con un contenido de humedad e impurezas es tratado en la unidad HY-100. Primero entra en el separador de hidrógeno (V-102) donde se produce una primera separación de hidrógeno-agua. El agua es recirculada hacia el stack y la corriente de hidrógeno sigue su curso para su purificación.

El hidrógeno atraviesa un proceso de enfriamiento donde se disminuye la temperatura desde 70°C a 20°C en el intercambiador de calor (E-102), para favorecer la condensación del agua. El sistema de refrigeración asociado

(CH-101) proporciona las corrientes auxiliares de agua.

Luego, el hidrógeno atraviesa el deoxidiser (R-101) donde se eliminan las trazas de oxígeno mediante reacción catalítica con una pequeña proporción de hidrógeno.

En el sistema de secado, formado por secadores de adsorción (DR-101 A/B), se elimina la humedad residual, hasta alcanzar el punto de purificación específico para su almacenamiento o transporte.

Una vez finalizado, dicho proceso el hidrógeno es llevado a un sistema de compresión (CP-100) donde será comprimido hasta la presión de almacenamiento en depósito (ST-100).

| Entradas de proceso    |                                                    |
|------------------------|----------------------------------------------------|
| Corriente              | Descripción                                        |
| 1                      | Hidrógeno (húmedo) del EL-100                      |
| Salidas de proceso     |                                                    |
| Corriente              | Destino                                            |
| 2                      | Agua separada en V-102                             |
| Corrientes del proceso |                                                    |
| 4                      | H <sub>2</sub> desde V-102 hacia acondicionamiento |
| 5                      | H <sub>2</sub> hacia E-102                         |
| 6                      | H <sub>2</sub> enfriado a la salida de E-102       |
| 7-8                    | Circuito de refrigeración asociado al Chiller      |
| 9                      | H <sub>2</sub> a la salida del deoxidiser          |
| 10-11                  | Alimentación a DR-101 A/B                          |
| 12-13                  | Salida de DR-101 A/B                               |
| 14                     | H <sub>2</sub> seco a la salida de HY-100          |
| Equipos principales    |                                                    |
| Código                 | Equipo                                             |
| HX-101                 | Enfriador de hidrógeno                             |
| V-102                  | Separador H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O         |
| E-102                  | Heat Exchanger                                     |
| CH-101                 | Chiller                                            |
| DR-101 A/B             | Secadores por adsorción                            |
| Buffer H <sub>2</sub>  | Depósito pulmón                                    |

| Variables principales de diseño  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| Variable                         | Valor de diseño |
| Presión de entrada               | 30 barg         |
| Temperatura de entrada           | 70 °C           |
| Temperatura de enfriamiento      | 20°C            |
| Pureza del hidrógeno a la salida | ≥ 99,999%       |
| Funcionamiento                   | Continuo        |

Tabla 11. Variables unidad HY-100.

### 6.3.6 Unidad CP-100 – Sistema de compresión

La finalidad de la unidad CP-100 es comprimir el hidrógeno procedente del sistema de tratamiento de hidrógeno (HY-100) hasta la presión de almacenamiento requerida.

El hidrógeno de elevada pureza procedente del sistema de tratamiento (HY-100) entra en el sistema de compresión a una presión de 30 bar.

Debido al incremento de la temperatura del hidrógeno durante la etapa de compresión, se produce una etapa intermedia de enfriamiento antes de la siguiente etapa de compresión. Esto da lugar a una mejora del rendimiento energético y garantiza unas condiciones de operación correcta.

Una vez alcanzada la presión de almacenamiento el hidrógeno es llevado a la unidad de almacenamiento (ST-100) donde permanecerá hasta su futura utilidad.

El sistema tiene elementos de control y protección para garantizar una correcta seguridad, incluye válvulas de seguridad, instrumentación de presión y temperatura y detección de fugas.

| Entradas de proceso |                                             |
|---------------------|---------------------------------------------|
| Corriente           | Descripción                                 |
| 14                  | Hidrógeno seco desde HY-100 a tanque buffer |
| 15                  | Hidrógeno seco desde tanque buffer a CP-100 |
| E-005               | Alimentación eléctrica desde ELC-100        |
| Salidas de proceso  |                                             |
| Corriente           | Destino                                     |
| 16                  | Hidrógeno comprimido hacia ST-100           |
| Equipos principales |                                             |
| Código              | Equipo                                      |
| CP-101              | Compresor de hidrógeno                      |

|                                        |                                      |
|----------------------------------------|--------------------------------------|
| -                                      | Refrigeradores interetapas           |
| -                                      | Separador de condensados interetapas |
| -                                      | Válvula de seguridad                 |
| -                                      | Instrumentación de P y T             |
| <b>Variables principales de diseño</b> |                                      |
| <b>Variable</b>                        | <b>Valor de diseño</b>               |
| P in                                   | 30 barg                              |
| P out                                  | 350 barg                             |
| Fluido                                 | Hidrógeno                            |
| Funcionamiento                         | Continuo                             |
| Refrigeración                          | Interetapa                           |

Tabla 12. Variables unidad CP-100.

### 6.3.7 Unidad ST-100 – Sistema de almacenamiento

La unidad ST-100 tiene como objetivo almacenar el hidrógeno procedente de la etapa de compresión, posibilitando un almacenamiento seguro para su posterior uso.

El hidrógeno acondicionado en la unidad HY-100 y comprimido en la unidad de compresión (CP-100) es conducido hasta el depósito de almacenamiento a una presión de 350 barg diseñada específicamente para dichas características del gas.

Para el proyecto se adopta una configuración constituida por un único depósito de forma esférica a presión, descartándose una configuración de banco de tubos.

Por seguridad, el sistema incorpora elementos como válvulas de venteo, válvulas de aislamiento, instrumentos de temperatura y presión, detectores de fuga con la finalidad de cumplir con los requisitos de seguridad definidas en las instalaciones que operan con hidrógeno o gases a alta presión.

El almacenamiento se dimensiona para proporcionar una autonomía de 8 horas a la producción máxima del sistema de electrólisis.

| <b>Entradas de proceso</b> |                                |
|----------------------------|--------------------------------|
| <b>Corriente</b>           | <b>Descripción</b>             |
| 16                         | Hidrógeno comprimido de CP-100 |
| <b>Salidas de proceso</b>  |                                |
| <b>Corriente</b>           | <b>Destino</b>                 |
| -                          | Hidrógeno almacenado           |
| <b>Equipos principales</b> |                                |

| Código                               | Equipo                                    |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| ST-100                               | Tanque de almacenamiento de hidrógeno     |
| Buffer                               | Tanque buffer almacenamiento de hidrógeno |
| PSV-301                              | Válvulas de seguridad                     |
| PI/TI-301                            | Instrumentos de P y T                     |
| Variables principales de diseño      |                                           |
| Variable                             | Valor de diseño                           |
| Fluido                               | Hidrógeno                                 |
| P max de operación                   | 350 barg                                  |
| P min de operación                   | 30 barg                                   |
| T de almacenamiento                  | 20°C                                      |
| Factor de compresibilidad a 350 barg | 1,17                                      |
| Configuración                        | 1 recipiente esférico                     |
| Autonomía                            | 8 h                                       |

Tabla 13. Variables unidad ST-100.

### 6.3.8 Unidad OX-100 – Sistema de gestión de oxígeno

En la etapa de electrólisis además de producirse hidrógeno se produce oxígeno de alta pureza que es conducido hacia el sistema de gestión de oxígeno (OX-100) mediante una línea independiente para evitar cualquier mezcla con el hidrógeno.

La corriente de oxígeno (corriente 17) es sometida también a un proceso de secado, presentando un separador de agua (V-101). El agua separada de la corriente de oxígeno (corriente 18) es recirculada hacia el proceso de electrólisis a 65°C.

Posteriormente el oxígeno abandona el separador (V-101) mediante la corriente 22. En el alcance de dicho proyecto no se contempla la valorización de este subproducto y su almacenamiento, por lo que se descarga a la atmósfera de manera controlada a través de un conductor donde se garantice la correcta dispersión del gas.

Durante el proceso, al igual que con el hidrógeno, dicho sistema presenta supervisión de presión y caudal, posibilitando la detección de desviaciones con respecto a las condiciones normales de operación.

| Entradas de proceso |                              |
|---------------------|------------------------------|
| Corriente           | Descripción                  |
| 17                  | Oxígeno procedente de EL-100 |
| Salidas de proceso  |                              |
| Corriente           | Destino                      |

|                                        |                                                 |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 22                                     | Evacuación de oxígeno                           |
| 18                                     | Circuito de recirculación de agua               |
| <b>Equipos principales</b>             |                                                 |
| <b>Código</b>                          | <b>Equipo</b>                                   |
| V-101                                  | Separador de humedad de la corriente de oxígeno |
| FI-201                                 | Caudalímetro                                    |
| PI-201                                 | Indicador de P                                  |
| PSV-201                                | Válvula de seguridad                            |
| <b>Variables principales de diseño</b> |                                                 |
| <b>Variable</b>                        | <b>Valor de diseño</b>                          |
| Fluido                                 | Oxígeno                                         |
| P de operación                         | 30 barg                                         |
| T de operación                         | 65-70 °C                                        |
| Funcionamiento                         | Continuo                                        |
| Destino                                | Evacuación segura                               |

Tabla 14. Variables unidad OX-100.

### 6.3.9 Unidad UT-100 – Servicios auxiliares

La unidad UT-100 engloba el conjunto de servicios necesarios para las diferentes unidades del proceso. Incluye sistemas de refrigeración, sistemas de aire comprimido para la instrumentación, alimentación eléctrica para emergencias, sistemas de control, sistemas de protección contra incendios e instalaciones de drenaje.

El sistema de refrigeración garantiza la evacuación del calor generado en el proceso de electrólisis y equipos auxiliares manteniendo la temperatura dentro de las condiciones de operación adecuadas. El aire comprimido se utiliza para el funcionamiento de acción de la instrumentación como las válvulas para cumplir con las condiciones del proceso.

| <b>Interconexiones auxiliares</b> |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Código</b>                     | <b>Descripción</b>                |
| E-005                             | Alimentación eléctrica de ELC-100 |
| I-001                             | Señales de operación y control    |
| <b>Servicio</b>                   | <b>Destino</b>                    |
| Aire de instrumentación           | Válvulas y actuadores mecánicos   |
| Alimentación UPS                  | Sistemas críticos                 |

|                                        |                                                        |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Señales de control                     | Equipos de proceso                                     |
| Señales de supervisión                 | Señales de control al SCADA                            |
| <b>Equipos principales</b>             |                                                        |
| <b>Código</b>                          | <b>Equipo</b>                                          |
| AC-101                                 | Sistema de refrigeración                               |
| CH-101                                 | Chiller                                                |
| -                                      | Refrigeradores interetapas                             |
| CA-101                                 | Compresor aire instrumentación                         |
| TK-401                                 | Tanque de aire comprimido                              |
| PLC-101                                | Sistema de control                                     |
| SCADA-101                              | Sistema de control y adquisición de datos              |
| UPS-101                                | Sistema de alimentación ininterrumpida                 |
| FGS-101                                | Sistema de detección de incendios y fugas de hidrógeno |
| <b>Variables principales de diseño</b> |                                                        |
| <b>Variable</b>                        | <b>Valor de diseño</b>                                 |
| Modo de operación                      | Continuo                                               |
| Supervisión                            | Mediante SCADA                                         |
| Alimentación de respaldo               | Sistema UPS                                            |

Tabla 15. Variables unidad UT-100.

## 6.4 Corrientes principales del proceso

Las corrientes principales del proceso definen los flujos de materia y energía que fluyen entre las distintas unidades de la planta. Su identificación es muy importante para el desarrollo de la ingeniería FEED, porque posibilita una nomenclatura para la elaboración de los diagramas de flujo (PFD), los diagramas tuberías e instrumentación (P&ID) y los balances de materia y energía.

Para seguir una trazabilidad las corrientes se identifican con la siguiente codificación:

| <b>Corrientes principales del proceso</b> |                                                           |               |                |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------|----------------|
| <b>Código</b>                             | <b>Corriente</b>                                          | <b>Origen</b> | <b>Destino</b> |
| 1                                         | Mezcla H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O – salida catódica | EL-100        | V-102          |

|    |                                                          |                       |                              |
|----|----------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 2  | Agua separada de la corriente de H <sub>2</sub>          | V-102                 | Circuito de recirculación    |
| 3  | Agua de recirculación hacia stacks                       | Circuito de agua      | EL-100                       |
| 4  | H <sub>2</sub> húmedo separado                           | V-102                 | Acondicionamiento HY-100     |
| 5  | H <sub>2</sub> hacia sistema de enfriamiento             | HY-100                | E-102                        |
| 6  | H <sub>2</sub> enfriado                                  | E-102                 | Tratamiento posterior HY-100 |
| 7  | Fluido de refrigeración                                  | CH-101                | E-102                        |
| 8  | Retorno del fluido de refrigeración                      | E-102                 | CH-101                       |
| 9  | H <sub>2</sub> a la salida del deoxidiser                | R-101                 | Sistema de secado            |
| 10 | H <sub>2</sub> hacia secador A                           | HY-100                | DR-101A                      |
| 11 | H <sub>2</sub> hacia secador B                           | HY-100                | DR-101B                      |
| 12 | H <sub>2</sub> seco procedente de DR-101A                | DR-101A               | Colector de H <sub>2</sub>   |
| 13 | H <sub>2</sub> seco procedente de DR-101B                | DR-101B               | Colector de H <sub>2</sub>   |
| 14 | H <sub>2</sub> seco acondicionado                        | DR-101 A/B            | Tanque buffer                |
| 15 | H <sub>2</sub> desde tanque buffer                       | Buffer H <sub>2</sub> | CP-100                       |
| 16 | H <sub>2</sub> comprimido                                | CP-100                | ST-100                       |
| 17 | Mezcla O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O – salida anódica | EL-100                | V-101                        |
| 18 | Agua separada                                            | V-101                 | Circuito de recirculación    |
| 19 | Agua separada                                            | Air Cooler            | Ion-Exchanger                |
| 20 | Agua separada                                            | Ion-Exchanger         | P-101 A/B                    |
| 21 | Agua de proceso hacia stacks                             | Circuito de agua      | EL-100                       |
| 22 | O <sub>2</sub> separado                                  | V-101                 | Evacuación controlada        |
| 23 | Venteo                                                   | V-101                 | Evacuación controlada        |

|                                          |                                      |                       |                          |
|------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 24                                       | Agua de reposición                   | WT-100                | Circuito de electrólisis |
| 25                                       | Agua tratada                         | WTP-101               | Circuito de agua         |
| 26                                       | Agua del tanque                      | TK-100                | WTP-101                  |
| 27                                       | Agua de abastecimiento               | Red de abastecimiento | TK-100                   |
| <b>Corrientes eléctricas principales</b> |                                      |                       |                          |
| <b>Código</b>                            | <b>Corriente</b>                     | <b>Origen</b>         | <b>Destino</b>           |
| E-001                                    | Energía eléctrica producida          | PV-100                | ELC-100                  |
| E-002                                    | Energía eléctrica de la red          | Red eléctrica         | ELC-100                  |
| E-003                                    | Alimentación del electrolizador      | ELC-100               | EL-100                   |
| E-004                                    | Alimentación del tratamiento de agua | ELC-100               | WT-100                   |
| E-005                                    | Alimentación a equipos auxiliares    | ELC-100               | CP-100/UT-100            |
| E-006                                    | Alimentación eléctrica compresor     | ELC-100               | CP-100                   |

Tabla 16. Identificación de corrientes.

## 6.5 Diagrama de flujo del proceso (PFD)

El diagrama de flujo del proceso (Process Flow Diagram) es el principal documento de la ingeniería de proceso realizado durante la ingeniería Front-End (FEED). El PFD muestra la secuencia de equipos principales, las tuberías de transporte de fluidos y las corrientes de entrada y salida del proceso.

Un PFD es una herramienta importante en la etapa de diseño de un proceso químico (en este caso una planta de hidrógeno), ya que proporciona una visión general de las operaciones y las relaciones entre los diferentes componentes del sistema. Representa solo exclusivamente la información que se necesita para comprender el funcionamiento global del proceso. Por tanto, no incluye toda la instrumentación, válvulas, líneas auxiliares o sistemas de control que será detalladas en el diagrama posterior, P&ID.

El PFD también puede incluir información adicional, como las condiciones de operación, los caudales de flujo, las temperaturas y las presiones de las corrientes. Esto proporciona una base para la posterior ingeniería de detalle y el diseño más preciso del proceso.

El PFD representa los siguientes sistemas del proceso:

- PV-100: Sistema fotovoltaico
- ELC-100: Sistema eléctrico y distribución de potencia.
- WT-100: Sistema de tratamiento de agua.
- EL-100: Sistema de electrólisis PEM.
- HY-100: Sistema de tratamiento de hidrógeno.

- A continuación, se presenta el diagrama de proceso (PFD):

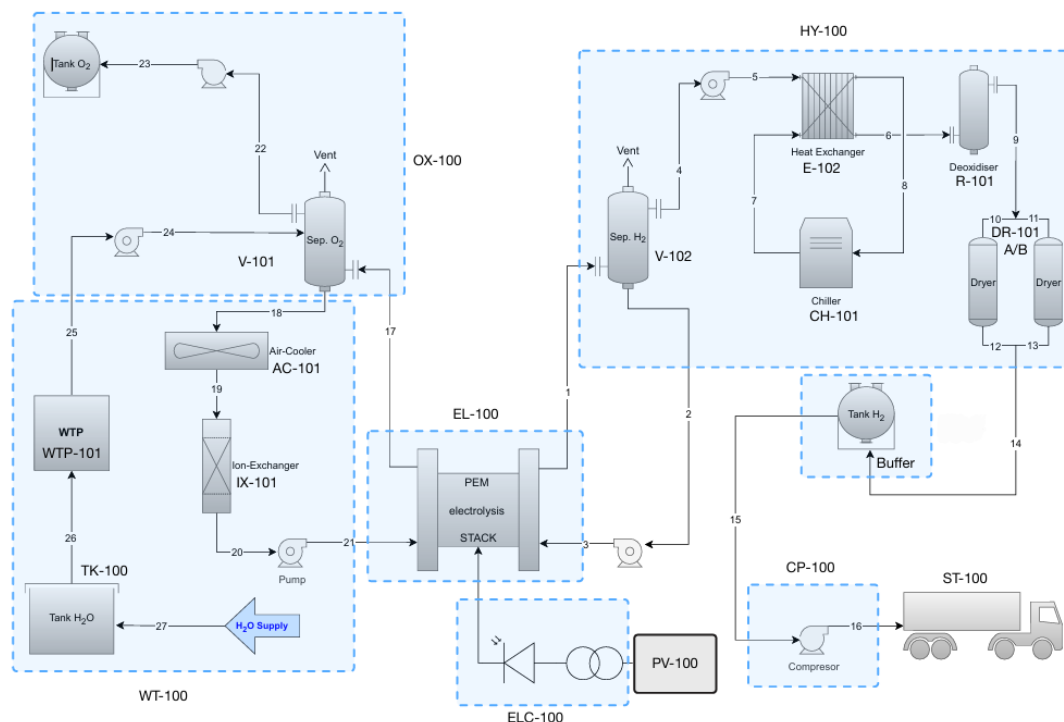


Ilustración 13. PFD.

## 7 BALANCES DE MATERIA

Una vez definida la configuración de la planta y descritas las principales unidades que intervienen en el proceso, es necesario determinar los caudales de materia asociados a cada una de las corrientes identificadas en el Diagrama de Flujo de Proceso (PFD). Para ello, en el presente capítulo se desarrollan los balances de materia correspondientes a la planta de producción de hidrógeno verde.

El balance de materia constituye una de las etapas fundamentales dentro del desarrollo de la ingeniería de proceso, ya que permite cuantificar las necesidades de alimentación de la planta y la producción obtenida en las distintas unidades. En este caso, los principales componentes considerados son el agua de alimentación, el hidrógeno producido y el oxígeno generado como subproducto durante la electrólisis.

Los cálculos se realizan tomando como referencia las condiciones establecidas en las bases de diseño y considerando inicialmente el funcionamiento del electrolizador PEM a su potencia nominal de 20 MW. A partir de la estequiometría de la reacción de electrólisis y de los parámetros de funcionamiento adoptados, se determina la producción nominal de hidrógeno, el consumo de agua y la producción asociada de oxígeno.

Posteriormente, el balance se extiende a las diferentes unidades representadas en el PFD, permitiendo obtener

una tabla de corrientes en la que se recogen los principales caudales del proceso. Estos resultados constituirán, a su vez, los datos de partida para el desarrollo del balance energético y para el dimensionamiento de los equipos principales de la instalación.

## 7.2 Hipótesis de cálculo

Para el desarrollo de los balances de materia se establecen una serie de hipótesis y criterios de cálculo que definen las condiciones de referencia de la planta. Estos parámetros proceden, por una parte, de las bases de diseño establecidas para el presente proyecto y, por otra, de las características técnicas del sistema de electrólisis seleccionado como referencia.

Con objeto de disponer de una base de cálculo representativa de una instalación industrial real, se adopta como electrolizador de referencia el Nel MC4000, perteneciente a la serie MC de electrolizadores PEM de Nel Hydrogen. Este equipo presenta una potencia nominal de 20 MW, coincidente con la potencia de electrólisis establecida en las bases de diseño de la planta.

La selección del equipo se realiza únicamente como referencia para el desarrollo de la ingeniería FEED y no constituye una selección definitiva de fabricante.

### 7.2.1 Condiciones generales de cálculo

Los balances de materia se desarrollan inicialmente para la condición nominal de operación del electrolizador. Esta condición representa el caso de máxima capacidad de producción de la instalación y será utilizada como referencia para el dimensionamiento preliminar de los principales equipos de proceso.

Se adoptan las siguientes hipótesis generales:

- La planta opera en régimen estacionario durante la condición de cálculo.
- El sistema de electrólisis utiliza tecnología PEM.
- La potencia nominal del sistema de electrólisis es de 20 MW.
- El electrolizador opera inicialmente al 100 % de su capacidad nominal.
- El agua de alimentación cumple las especificaciones requeridas por el sistema de electrólisis, después de su tratamiento.
- La reacción electroquímica considerada es exclusivamente la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno.
- Las pérdidas de hidrógeno y oxígeno en tuberías y equipos se consideran despreciables para el balance preliminar de materia.
- Las corrientes de purga, rechazo y condensados se contabilizarán cuando resulten relevantes para el balance de cada unidad.
- Los procesos de acondicionamiento, compresión y almacenamiento modifican las condiciones termodinámicas del hidrógeno, pero no su caudal másico, despreciando las pérdidas asociadas a estos sistemas.
- Los cálculos nominales se realizarán de forma independiente del número anual de horas de funcionamiento. La producción anual se determinará posteriormente a partir del perfil de generación fotovoltaica y del escenario de operación definido para la planta.

| Parámetro  | Valor adoptado | Unidad | Aplicación |
|------------|----------------|--------|------------|
| Fabricante | Nel Hydrogen   | -      | Fabricante |

|                                                 |          |                       |                            |
|-------------------------------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|
| Modelo                                          | MC4000   | -                     | Fabricante                 |
| Tecnología                                      | PEM      | -                     | Fabricante                 |
| Potencia nominal                                | 20       | MW                    | Fabricante/Bases de diseño |
| Producción nominal H <sub>2</sub>               | 8.496    | Kg/día                | Fabricante                 |
| Producción nominal H <sub>2</sub>               | 354      | Kg/h                  | Calculado                  |
| Presión nominal de producción de H <sub>2</sub> | 30       | Barg                  | Fabricante                 |
| Consumo eléctrico específico del Stack          | 53,2     | kWh/kg H <sub>2</sub> | Fabricante                 |
| Consumo eléctrico específico del sistema        | 56,77    | kWh/kg H <sub>2</sub> | Fabricante                 |
| Rango de operación                              | 20-100   | %                     | Fabricante                 |
| Tiempo de arranque desde Standby                | < 8      | Min                   | Fabricante                 |
| Tiempo mínimo hasta plena carga                 | < 15     | s                     | Fabricante                 |
| Agua de alimentación                            | 15,9     | L/kg H <sub>2</sub>   | Fabricante                 |
| Temperatura de entrada al stack                 | 65       | °C                    | Hipótesis FEED             |
| Temperatura de salida del stack                 | 70       | °C                    | Hipótesis FEED             |
| Pureza H <sub>2</sub> con secado de alta pureza | ≥ 99,999 | %                     | Fabricante                 |

Tabla 17. Parámetros de referencia del electrolizador Nel Hydrogen. Fuente: elaboración propia a partir de Nel Hydrogen (s. f.), ficha PD-0600-0145, rev. A.

### 7.2.2 Criterio energético adoptado

Para los balances se distingue entre el consumo eléctrico correspondiente exclusivamente al stack y el consumo eléctrico total del sistema.

El fabricante establece un consumo específico de aproximadamente 53,2 kWh/kg H<sub>2</sub> a nivel de stack y de 56,77 kWh/kg H<sub>2</sub> a nivel de sistema (Nel Hydrogen, s. f.). La diferencia entre ambos valores corresponde al consumo asociado a los equipos auxiliares necesarios para el funcionamiento del sistema de electrólisis.

Para determinar la producción nominal de hidrógeno se utiliza como referencia directa la capacidad garantizada por el fabricante, correspondiente a:

$$8.496 \text{ kg H}_2/\text{día} \approx 354 \text{ kg H}_2/\text{h}$$

De esta forma, se evita determinar la producción exclusivamente a partir de un rendimiento teórico, utilizando como referencia un dato correspondiente a un sistema PEM comercial de la misma potencia nominal que la

planta objeto del proyecto.

### **7.2.3 Criterio de consumo de agua**

Para el análisis del consumo de agua se distinguirán dos conceptos diferentes: el consumo estequiométrico correspondiente a la reacción de electrólisis y el agua total de alimentación requerida por el sistema.

El consumo estequiométrico se determinará en el apartado siguiente a partir de la reacción química de electrólisis del agua. Este valor representa exclusivamente la cantidad de agua que se transforma químicamente en hidrógeno y oxígeno.

Por otra parte, para el balance global de suministro de agua se adopta el valor de referencia indicado por el fabricante para la serie MC, correspondiente a 15,9 L/kg H<sub>2</sub> producido. Este valor considera las necesidades de alimentación del sistema de tratamiento de agua integrado y es, por tanto, superior al consumo estrictamente estequiométrico (Nel Hydrogen, s. f.).

Esta diferenciación permitirá dimensionar correctamente tanto el consumo químico asociado al proceso de electrólisis como las necesidades reales de abastecimiento de agua de la instalación.

### **7.2.4 Criterio de producción y pureza del hidrógeno**

La producción nominal adoptada para el caso de diseño será de 354 kg H<sub>2</sub>/h, correspondiente al funcionamiento del electrolizador al 100 % de carga (Nel Hydrogen, s. f.).

El sistema puede operar de forma automática dentro de un rango aproximado comprendido entre el 20 % y el 100 % de su capacidad nominal, característica especialmente relevante para la integración con la planta solar fotovoltaica debido a las variaciones de potencia asociadas al recurso solar (Nel Hydrogen, s. f.).

En cuanto a la calidad del producto, se adopta como especificación de diseño una pureza mínima de 99,999 % de H<sub>2</sub> tras el sistema de acondicionamiento y secado. Esta especificación será utilizada como referencia para la unidad HY-100 y para las etapas posteriores de compresión y almacenamiento.

### **7.2.5 Aplicación de las hipótesis al proyecto**

Los valores anteriores constituyen el caso nominal de referencia para el desarrollo de los balances de materia y energía. La producción anual real de la planta se obtendrá suponiendo que el electrolizador funciona a plena carga durante las 8.760 horas del año.

La producción anual dependerá de la energía disponible procedente de la instalación fotovoltaica de 23 MWp, del rango operativo del electrolizador y de la importación de electricidad de la red. Por este motivo, se diferenciará entre la capacidad nominal instantánea de producción, utilizada para el dimensionamiento de los equipos, y la producción anual efectiva, que será determinada posteriormente para el escenario de operación considerado.

Con estas hipótesis queda establecida la base de cálculo necesaria para desarrollar la estequiometría de la electrólisis y los posteriores balances de materia de las diferentes unidades de proceso.

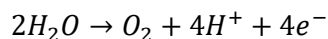
## **7.3 Reacciones químicas**

La producción de hidrógeno en la unidad de electrólisis (EL-100) se basa en la descomposición electroquímica del agua mediante un electrolizador de membrana de intercambio protónico (PEM). La aplicación de una diferencia de potencial entre los electrodos provoca la separación de la molécula de agua, obteniéndose hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo.

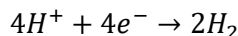
En un electrolizador PEM, el agua se alimenta al lado del ánodo, donde tiene lugar su oxidación. Los protones generados atraviesan la membrana polimérica, mientras que los electrones circulan a través del circuito eléctrico externo hasta alcanzar el cátodo.

### 7.3.1 Reacciones electroquímicas

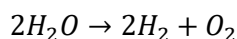
En el ánodo tiene lugar la oxidación del agua:



Los protones atraviesan la membrana de intercambio protónico hasta alcanzar el cátodo. Allí se combinan con los electrones procedentes del circuito externo para formar hidrógeno molecular:



La suma de ambas semirreacciones proporciona la reacción global del proceso:



Esta reacción constituye la base estequiométrica utilizada para desarrollar los balances de materia de la unidad EL-100.

### 7.3.2 Relación estequiométrica

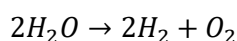
A partir de la ecuación global puede establecerse la relación entre las cantidades de agua consumida, hidrógeno producido y oxígeno generado.

Las masas molares consideradas son:

| Componente | Fórmula          | Masa molar     |
|------------|------------------|----------------|
| Agua       | H <sub>2</sub> O | 18,015 kg/kmol |
| Hidrógeno  | H <sub>2</sub>   | 2,016 kg/kmol  |
| Oxígeno    | O <sub>2</sub>   | 31,998 kg/kmol |

Tabla 18. Masas molares. Fuente: NIST Chemistry WebBook.

De acuerdo con la reacción:



por cada 2 kmol de hidrógeno producidos se consumen 2 kmol de agua y se genera 1 kmol de oxígeno.

Por tanto, la relación másica de consumo estequiométrico de agua respecto a la producción de hidrógeno es:

$$m_{H_2O}/m_{H_2} = 2(18,015)/2(2,016) = 8,94$$

Así, el consumo mínimo teórico es:

$$8,94 \text{ kg } H_2O/\text{kg } H_2$$

De forma análoga, la relación entre la producción de oxígeno y la de hidrógeno resulta:

$$m_{H_2}/m_{O_2} = 31,998/2(2,016) = 7,94$$

Por tanto:

$$7,94 \text{ kg } O_2/\text{kg } H_2$$

A efectos de cálculos preliminares, estas relaciones suelen aproximarse a 9 kg H<sub>2</sub>O/kg H<sub>2</sub> y 8 kg O<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>, respectivamente. No obstante, en el presente proyecto se mantendrán los valores obtenidos a partir de las masas molares para conservar mayor precisión en el balance.

### 7.3.3 Aplicación al caso nominal de diseño

De acuerdo con las hipótesis establecidas en el apartado anterior, el electrolizador Nel MC4000 presenta una producción nominal de:

$$m_{H_2} = 354 \text{ kg/h}$$

El consumo estequiométrico de agua correspondiente será:

$$m_{H_2O \text{ esteq}} = 354 \cdot 8,94$$

$$m_{H_2O \text{ esteq}} = 3.165 \frac{kg}{h}$$

Considerando una densidad del agua próxima a 1.000 kg/m<sup>3</sup>, este valor equivale aproximadamente a:

$$V_{H_2O \text{ esteq}} = 3,165 m^3/h$$

Por otra parte, la producción simultánea de oxígeno será:

$$m_{O_2} = 354 \cdot 7,94$$

$$m_{O_2} = 2.811 kg/h$$

| Parámetro                         | Valor  | Unidad            |
|-----------------------------------|--------|-------------------|
| Producción de $H_2$               | 354    | Kg/h              |
| Consumo estequiométrico de $H_2O$ | ~3.165 | Kg/h              |
| Consumo estequiométrico de $H_2O$ | ~3,165 | m <sup>3</sup> /h |
| Producción de $O_2$               | ~2.811 | Kg/h              |
| Relación $H_2O/H_2$               | 8,94   | Kg/kg $H_2$       |
| Relación $O_2/H_2$                | 7,94   | Kg/kg $H_2$       |

Tabla 19. Balance estequiométrico nominal de la electrólisis.

### 7.3.4 Diferencia entre consumo estequiométrico y agua de alimentación

Es importante diferenciar el agua que interviene químicamente en la electrólisis del agua total que debe suministrarse a la instalación.

El consumo calculado anteriormente, aproximadamente 8,94 kg  $H_2O/kg H_2$ , corresponde exclusivamente al agua transformada químicamente en hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, el electrolizador de referencia requiere una alimentación superior debido al funcionamiento del sistema de tratamiento de agua y a las corrientes de rechazo y purga.

Para el Nel MC4000 se ha adoptado en las hipótesis de diseño una demanda de agua de alimentación de:

$$15,9 L/kg H_2$$

Por tanto, para una producción nominal de 354 kg  $H_2/h$ :

$$Q_{agua,alimentacio'n} = 354 \cdot 15,9 = 5.628,6 L/h$$

También:

$$Q_{agua,alimentacio'n} \approx 5,63 m^3/h$$

Esto significa que aproximadamente 3,165 m<sup>3</sup>/h corresponden al consumo químico teórico de la electrólisis, mientras que la diferencia (2,47 m<sup>3</sup>/h) está asociada principalmente al tratamiento y acondicionamiento del agua, rechazo, purgas y pérdidas contempladas.

## 7.4 Balance global

Una vez definidas las relaciones estequiométricas asociadas al proceso de electrólisis, se procede a realizar el balance global de materia de la instalación. Este balance permite determinar las principales entradas y salidas de la planta para la condición nominal de diseño y constituye la referencia para el posterior análisis individual de cada una de las unidades de proceso.

Para el balance global se considera como volumen de control el conjunto formado por las unidades de tratamiento de agua, electrólisis, acondicionamiento de hidrógeno, gestión de oxígeno, compresión y almacenamiento.

En régimen estacionario y despreciando la acumulación de materia dentro de los equipos, el balance general puede expresarse como:

$$\sum m_{entrada} = \sum m_{salida}$$

Para la condición nominal, la corriente principal de entrada está constituida por el agua de alimentación a la unidad WT-100, mientras que las principales salidas corresponden al hidrógeno producido, el oxígeno generado y las corrientes de rechazo asociadas al tratamiento de agua.

### 7.4.1 Producción nominal de hidrógeno

De acuerdo con las hipótesis de cálculo establecidas y tomando como referencia el electrolizador Nel MC4000, la producción nominal de hidrógeno es:

$$m_{H_2} = 354 \text{ kg/h}$$

Por tanto, para una operación continua durante 24 horas a plena carga, la producción diaria es:

$$m_{H_2} = 354 \cdot 24 = 8.496 \text{ kg/día}$$

$$m_{H_2} = 8,496 \text{ t/día}$$

### 7.4.2 Agua total de alimentación

Para determinar las necesidades de abastecimiento de la planta se adopta el consumo de agua de alimentación establecido para el sistema de referencia:

$$C_{agua} = 15,9 \frac{L}{kg} H_2$$

Por tanto:

$$Q_{agua \text{ de red}} = 354 \cdot 15,9 = 5.628,6 \text{ L/h}$$

Considerando, para este balance preliminar, una densidad del agua de 1.000 kg/m<sup>3</sup>:

$$Q_{agua \text{ de red}} = 5.629 \text{ kg/h}$$

El consumo diario de agua correspondiente a una operación continua a capacidad nominal será:

$$Q_{agua \text{ de red diaria}} = 5,6286 \cdot 24 = 135,1 \text{ m}^3/\text{día}$$

Este valor corresponde al agua bruta requerida por el sistema, y no únicamente al agua que participa en la reacción de electrólisis.

### 7.4.3 Agua consumida en la electrólisis

Del balance estequiométrico desarrollado anteriormente se obtuvo una relación de:

$$8,94 \text{ kg } H_2O / \text{kg } H_2$$

Por tanto:

$$m_{H_2O \text{ esteq}} = 354 \cdot 8,94$$

$$m_{H_2O \text{ esteq}} = 3.165 \text{ kg/h}$$

Este caudal representa el agua que se transforma químicamente en hidrógeno y oxígeno.

La diferencia entre el agua total alimentada y el consumo estequiométrico es:

$$5.629 - 3.165 = 2.464 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ agua}$$

No obstante, es importante no identificar automáticamente estos 2.464 kg/h como una única corriente de rechazo. Esta diferencia representa, a nivel de balance global preliminar, el conjunto de agua no incorporada a la reacción y puede incluir rechazo del tratamiento de agua, purgas y otras pérdidas de corriente. Su distribución exacta se establecerá en el balance de la unidad WT-100.

#### 7.4.4 Producción de oxígeno

La generación de oxígeno está directamente relacionada con la producción de hidrógeno mediante la estequiometría de la electrólisis.

La relación calculada en el apartado anterior es:

$$\frac{7,94 \text{ kg } O_2}{\text{kg } H_2}$$

Por tanto:

$$m_{O_2} = 354 \cdot 7,94$$

$$m_{O_2} = 2.811 \text{ kg/h}$$

La producción diaria correspondiente será:

$$m_{O_2} = 67.464 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 67,464 \frac{\text{t}}{\text{día}} \text{ de } O_2$$

En el alcance del presente proyecto, esta corriente no se considera un producto comercial, por lo que será gestionada mediante la unidad OX-100.

#### 7.4.5 Balance global de la planta

| Corriente global                   | Caudal diario | Caudal diario | Observaciones     |
|------------------------------------|---------------|---------------|-------------------|
| Agua total de alimentación         | 5.629 kg/h    | 135,1 t/día   | Entrada a WT-100  |
| Agua consumida esteq.              | 3.165 kg/h    | 76 t/día      | Corriente interna |
| Agua no incorporada a la reacción* | 2.464 kg/h    | 59,1 t/día    | Rechazos/purgas   |
| Hidrógeno producido                | 354 kg/h      | 8,496 t/día   | Producto          |
| Oxígeno producido                  | 2.811 kg/h    | 67,5 t/día    | Subproducto       |

Tabla 20. Balance global de materia a capacidad nominal.

\*Valor preliminar obtenido por diferencia. Su distribución entre rechazo de tratamiento, purgas y otras corrientes.

### 7.4.6 Consideraciones sobre la producción anual

El balance desarrollado corresponde a la condición nominal instantánea de diseño, es decir, al funcionamiento del electrolizador a plena carga. Esta condición será la empleada posteriormente para dimensionar los principales equipos de proceso.

Para obtener la producción anual simplemente se multiplica los 354 kg/h por 8.760 horas, puesto que la planta está hibridada con generación solar fotovoltaica e importación de electricidad de red eléctrica.

Por tanto, se distinguirán dos magnitudes: la producción mediante la planta fotovoltaica y la producción mediante la red eléctrica:

$$\text{Capacidad nominal} = 354 \text{ kg H}_2/\text{h}$$

$$\text{Producción anual} = f(E_{FV}, E_{red})$$

La primera se determinará a partir de la producción eléctrica fotovoltaica prevista para la localización de Sevilla.

## 7.5 Balance de materia por unidades

Una vez realizado el balance global de la instalación, se procede al análisis individual de cada una de las unidades representadas en el Diagrama de Flujo de Proceso (PFD). El objetivo de este apartado es determinar los caudales de las corrientes que conectan los diferentes equipos y verificar el cumplimiento de la conservación de la materia en cada subsistema.

El análisis se realiza siguiendo la secuencia definida en el PFD, diferenciando entre las corrientes externas de alimentación y producto y las corrientes internas de recirculación. Para cada unidad se aplica, en régimen estacionario, la expresión general:

$$\sum m_{entrada} = \sum m_{salida}$$

Las unidades consideradas en el balance son:

- PV-100: no interviene.
- ELC-100: no interviene.
- WT-100: Sistema de tratamiento de agua.
- EL-100: Sistema de electrolisis PEM.
- HY-100: Sistema de tratamiento de hidrógeno.
- CP-100: Sistema de compresión H<sub>2</sub>.
- ST-100: Sistema de almacenamiento de hidrógeno.
- OX-100: Sistema de gestión de oxígeno.
- UT-100: Servicios auxiliares.

Las unidades PV-100 y ELC-100 no intervienen en el balance de materia, ya que únicamente gestionan flujos energéticos. Sus correspondientes balances se desarrollarán en el capítulo dedicado al balance de energía.

### 7.5.1 Unidad WT-100 – Tratamiento y acondicionamiento de agua

La unidad WT-100 tiene como función acondicionar el agua de alimentación y suministrar al electrolizador el caudal necesario para mantener el proceso de electrolisis. De acuerdo con el PFD, esta unidad incluye el depósito de agua, la planta de tratamiento de agua (WTP-101), el sistema de acondicionamiento mediante intercambio iónico, y el sistema de refrigeración.

La unidad recibe agua de aporte mediante la corriente 27, que se almacena inicialmente en el depósito de agua. Desde dicho depósito, la corriente 26 alimenta la planta de tratamiento WTP-101. Una vez acondicionada, el

agua de reposición se incorpora mediante la corriente 25 al circuito asociado al separador de oxígeno.

El circuito de agua del lado anódico del electrolizador presenta además una recirculación interna. La corriente líquida procedente del separador de oxígeno se conduce al air-cooler mediante la corriente 18, posteriormente atraviesa el sistema de intercambio iónico mediante la corriente 19 y, finalmente, es impulsada mediante la bomba hacia el stack a través de las corrientes 20 y 21.

Por tanto, debe diferenciarse entre el agua fresca o make-up necesaria para compensar el consumo del proceso y el caudal interno de recirculación, que puede ser considerablemente superior pero no supone un consumo neto de agua de la planta.

#### 7.5.1.1 Agua fresca de alimentación

De acuerdo con las hipótesis de cálculo establecidas para el Nel MC4000, la necesidad de agua de alimentación es:

$$Q_{alim,27} = 5,63 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$m_{alim,27} = 5.629 \text{ kg/h}$$

La corriente 27 entra al tanque TK-101 y la corriente 26 sale hacia WTP-101.

Desde WTP-101 sale la corriente 25 y es impulsada hacia el equipo separador de oxígeno.

$$Q_{alim,27} = Q_{26}$$

El balance de WTP-101:

$$m_{26} = m_{25} + m_{rechazo}$$

$$m_{rechazo} = 5.629 - 3.165 = 2.464 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{H}_2\text{O}$$

#### 7.5.1.2 Agua consumida químicamente

El consumo estequiométrico calculado en el apartado 7.3 es:

$$m_{\text{H}_2\text{O},\text{esteq}} = 3.165 \text{ kg/h}$$

Por tanto, de los aproximadamente 5.629 kg/h alimentados al sistema, 3.165 kg/h se incorporan efectivamente a la reacción de electrólisis.

$$5.629 - 3.165 = 2.464 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{H}_2\text{O}$$

La diferencia corresponde al conjunto de agua que no se transforma químicamente en hidrógeno y oxígeno. A nivel FEED, esta cantidad engloba fundamentalmente las pérdidas y rechazos asociados al acondicionamiento del agua y las purgas necesarias para mantener la calidad del circuito.

#### 7.5.1.3 Corriente de recirculación del electrolizador

Las corrientes 18, 19, 20 y 21 forman parte del circuito interno de recirculación de agua del lado de oxígeno.

Aplicamos la hipótesis FEED:

- 16 stacks
- 120 celdas/stack

$$16 \text{ stacks} \cdot 120 \frac{\text{celdas}}{\text{stack}} = 1.920 \text{ celdas}$$

Un consumo por celda de 7,5 l/min:

$$Q_{21} = 1.920 \text{ celda} \cdot 7,5 \frac{\text{l}}{\text{celda} \cdot \text{min}} = 14.400 \text{ l/min}$$

$$Q_{21} = 864 \text{ m}^3/\text{h}$$

A una temperatura de 65°C:

$$\rho_{65} = 981 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{21} = 847.584 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

En los stacks reaccionan 3.165 kg/h de agua, por tanto, por la corriente 17:

$$m_{17} = 847.584 - 3.165 = 844.419 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ H}_2\text{O}$$

La corriente bifásica 17 es:

$$m_{17} = 844.419 \text{ H}_2\text{O} + 2.811 \text{ O}_2$$

El make-up neto para restituir el agua:

$$m_{24} = 3.165 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ H}_2\text{O}$$

Y después de V-101:

$$m_{18} = m_{19} = m_{20} = m_{21} = 847.584 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ H}_2\text{O}$$

| Corriente PFD | Descripción                          | Caudal  | Unidad                            | Observación                                       |
|---------------|--------------------------------------|---------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|
| 27            | Agua fresca de aporte                | 5,63    | $\text{m}^3/\text{h}$             | Alimentación global                               |
| 26            | Agua hacia WTP                       | 5,63*   | $\text{m}^3/\text{h}$             | Antes del tratamiento                             |
| 25            | Agua tratada                         | 3,16    | $\text{m}^3/\text{h}$             | Make-up                                           |
| 24            | Agua de reposición al circuito       | 3,16    | $\text{m}^3/\text{h}$             | Depende del rechazo WTP                           |
| 17            | Salida anódica del stack hacia V-101 | 847.230 | $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ | $844.419 \text{ H}_2\text{O} + 2.811 \text{ O}_2$ |
| 18            | Agua desde separador de $\text{O}_2$ | 847.584 | $\text{kg}/\text{h}$              | 70°C, Recirculación                               |
| 19            | Agua tras air-cooler                 | 847.584 | $\text{kg}/\text{h}$              | 65°C, Recirculación                               |
| 20            | Agua tras intercambio iónico         | 847.584 | $\text{kg}/\text{h}$              | Recirculación                                     |
| 21            | Agua hacia stack                     | 847.584 | $\text{kg}/\text{h}$              | Caudal de diseño del circuito                     |

Tabla 21. Balance preliminar de la unidad WT-100.

\* Se considera igual al caudal de aporte en estado estacionario, despreciando acumulación en el depósito.

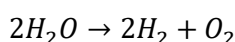
## 7.5.2 Unidad EL-100 – Sistema de electrólisis

La unidad EL-100 constituye el núcleo de la planta y es responsable de transformar el agua desmineralizada en hidrógeno y oxígeno mediante electrólisis PEM. El balance de materia de esta unidad se establece a partir de la producción nominal del electrolizador Nel MC4000 y de las relaciones estequiométricas calculadas en el apartado 5.3.

De acuerdo con el PFD, el stack recibe el agua de proceso a través de la corriente 21. Como consecuencia de la reacción electroquímica se generan dos corrientes bifásicas principales: la corriente 1, dirigida hacia el separador de hidrógeno, y la corriente 17, dirigida hacia el separador de oxígeno. Adicionalmente, parte del agua no reaccionada se mantiene dentro de los circuitos internos de recirculación del paquete de electrólisis.

### 7.5.2.1 Balance químico de stack

La reacción global es:



Para la condición nominal de diseño se considera una producción de:

$$m_{H_2} = 354 \text{ kg/h}$$

De acuerdo con la estequiometría desarrollada anteriormente, el consumo de agua correspondiente es:

$$m_{H_2O, \text{reacción}} = 354 \cdot 8,94$$

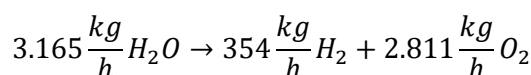
$$m_{H_2O, \text{reacción}} = 3.165 \text{ kg/h}$$

Y producción de oxígeno:

$$m_{O_2} = 354 \cdot 7,94$$

$$m_{O_2} = 2.811 \text{ kg/h}$$

Por tanto, el balance estequiométrico del stack es:



#### 7.5.2.1.1 Corriente 1- Salida hacia el separador de hidrógeno

La corriente 1 transporta el hidrógeno producido desde el stack hasta el separador de hidrógeno perteneciente a HY-100.

Desde el punto de vista del componente hidrógeno:

$$m_{H_2} = 354 \text{ kg/h}$$

No obstante, la corriente 1 no debe considerarse formada exclusivamente por hidrógeno seco. A la salida del electrolizador el gas presenta humedad y puede arrastrar una cierta cantidad de agua líquida o vapor, que posteriormente será retirada en el separador.

Por ello:

$$m_1 = m_{H_2} + m_{H_2O, \text{arrastré}}$$

El caudal total de la corriente 1 no puede determinarse con precisión únicamente mediante la estequiometría y requerirá información específica del paquete de electrólisis.

A nivel FEED se fija, por tanto:

$$m_{H_2,1} = 354 \text{ kg/h}$$

mientras que la cantidad de agua acompañante queda pendiente de datos detallados del fabricante.

#### 7.5.2.1.2 Corriente 17 – Salida hacia el separador de oxígeno

La corriente 17 transporta el oxígeno generado en el ánodo junto con agua no reaccionada y humedad hacia el separador de oxígeno.

Para el componente oxígeno:

$$m_{O_2,17} = 2.811 \text{ kg/h}$$

Al igual que ocurre en el lado de hidrógeno, el caudal total de esta corriente será superior al caudal de oxígeno puro debido a la presencia de agua recirculada.

Por tanto:

$$m_{17} = m_{O_2} + m_{H_2O, \text{recirculada}}$$

$$m_{H_2O, \text{recirculada}} = 844.819 \frac{\text{kg}}{\text{h}} H_2O$$

#### 7.5.2.1.3 Corrientes 2 y 3 – Recirculación de hidrógeno

De acuerdo con el PFD, el separador de hidrógeno devuelve una corriente líquida mediante la corriente 2, que es impulsada nuevamente hacia el stack mediante la corriente 3.

Estas corrientes forman un circuito interno de recirculación:

$$m_2 = m_3$$

despreciando pequeñas purgas o pérdidas.

Al tratarse de una recirculación interna, este caudal no modifica el consumo neto de agua de la planta. Su función es mantener las condiciones requeridas para la operación del paquete PEM.

El caudal exacto se mantendrá como dato de fabricante:

$$m_2 = m_3$$

| Corriente PFD | Descripción                        | Componente | Caudal         | Unidad |
|---------------|------------------------------------|------------|----------------|--------|
| 21            | Agua hacia stack                   | $H_2O$     | 847.584        | Kg/h   |
| 1             | Corriente humedad hacia sep. $H_2$ | $H_2$      | 354            | Kg/h   |
| 17            | Corriente humedad hacia sep. $O_2$ | $O_2$      | 2.811          | Kg/h   |
| 2             | Retorno líquido sep. $H_2$         | $H_2O$     | Por determinar | Kg/h   |
| 3             | Recirculación hacia stack          | $H_2O$     | Por determinar | Kg/h   |

Tabla 22. Balance de materia de la unidad EL-100.

### 7.5.3 Unidad HY-100 – Tratamiento de hidrógeno

La unidad HY-100 tiene como finalidad acondicionar la corriente de hidrógeno procedente del electrolizador hasta alcanzar las condiciones de pureza y humedad requeridas antes del almacenamiento y la compresión final.

De acuerdo con el PFD elaborado, el tren de tratamiento está constituido por un separador de hidrógeno, un sistema de enfriamiento mediante intercambiador de calor y chiller, un desoxidador (deoxidiser) y dos secadores operando en configuración paralela o alternante.

La corriente de entrada a esta unidad corresponde a la corriente 1, procedente del stack PEM, mientras que la corriente de salida hacia almacenamiento está representada por la corriente 14.

### 7.5.3.1 Separación primaria de humedad

La corriente 1 procedente del electrolizador contiene el hidrógeno producido junto con humedad y posibles arrastres de agua. Esta corriente entra en el separador de hidrógeno, donde se produce una separación gas-líquido.

$$m_{H_2,1} = m_{H_2,4} = 354 \text{ kg/h}$$

Desde el punto de vista del componente hidrógeno, y despreciando pérdidas:

La corriente 4 corresponde, por tanto, al hidrógeno húmedo que abandona el separador y continúa hacia el sistema de enfriamiento.

La corriente líquida separada se retira mediante la corriente 2, que forma parte del circuito de recirculación hacia el electrolizador. Su caudal no se calcula en esta fase por depender del contenido de humedad y de las condiciones específicas de operación del paquete PEM.

### 7.5.3.2 Enfriamiento de la Corriente de hidrógeno

La corriente 4 es impulsada a través del sistema de enfriamiento y llega al intercambiador de calor mediante la corriente 5.

En el intercambiador, la temperatura del hidrógeno disminuye, provocando la condensación de una parte adicional del vapor de agua contenido en la corriente. El sistema de refrigeración asociado está alimentado por el chiller, representado mediante las corrientes 7 y 8 en el PFD.

Estas corrientes corresponden al circuito de refrigeración y no forman parte del balance de materia del hidrógeno. Por tanto, serán tratadas posteriormente como corrientes de servicios auxiliares.

Desde el punto de vista del hidrógeno:

$$m_{H_2,4} \approx m_{H_2,5} \approx m_{H_2,6} = 354 \text{ kg/h}$$

Si se desprecia cualquier pérdida de producto.

### 7.5.3.3 Enfriamiento E-102/CH-101

El hidrógeno se enfría en el intercambiador de calor desde los 70 °C a los 20 °C. En el capítulo 9 se dimensiona el sistema de refrigeración donde el circuito de agua fría considera un salto térmico entre 5 °C y 25 °C con un caudal nominal de 4 m<sup>3</sup>/h.

Por tanto, las corrientes de servicio 7 y 8 son 4 m<sup>3</sup>/h, y al ser un circuito cerrado de refrigeración:

$$m_7 = m_8$$

### 7.5.3.4 Humedad de la Corriente de hidrógeno a 20 °C

En el capítulo 9 se explica que posteriormente al enfriamiento hasta 20 °C aproximadamente, se considera que el hidrógeno que abandona el separador de condensados se encuentre saturado de vapor de agua.

La presión de vapor del agua a 20 °C es de 2,34 kPa (International Association for the Properties of Water and Steam, 2012).

La presión total del gas es 31 bar o 3.100 kPa.

La fracción molar de vapor de agua será:

$$y_{H_2O} = \frac{P_{sat,H_2O}}{P}$$
$$y_{H_2O} = \frac{2,34}{3.100} = 7,55 \cdot 10^{-4} \approx 755 \text{ ppmv}$$

El caudal molar de hidrógeno es 175,6 kmol/h.

El caudal molar de vapor de agua asociado será aproximadamente:

$$n_{H_2O} = n_{H_2} \cdot \frac{y_{H_2O}}{1 - y_{H_2O}} = 175,6 \cdot \frac{7,55 \cdot 10^{-4}}{1 - 7,55 \cdot 10^{-4}} = 0,133 \frac{kmol}{h}$$

Por tanto:

$$m_{H_2O} = 0,133 \cdot 18 = 2,39 \text{ kg/h}$$

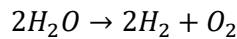
Por lo que después del enfriamiento se obtiene:

$$m_6 = 354 \frac{kg}{h} H_2 + 2,39 \frac{kg}{h} H_2O = 356,39 \text{ kg/h}$$

### 7.5.3.5 Eliminación de oxígeno residual

Tras el enfriamiento, la corriente 6 entra en el desoxidador.

La función de este equipo es eliminar las trazas residuales de oxígeno presentes en la corriente de hidrógeno. En términos simplificados, el oxígeno residual reacciona catalíticamente con una pequeña fracción de hidrógeno para formar agua:



El consumo de hidrógeno asociado a esta reacción es muy reducido debido a la baja concentración de oxígeno residual.

En esta fase FEED, y dado que no se dispone de la concentración exacta de oxígeno a la entrada del desoxidador, se considera que:

$$m_{H_2,9} \approx 354 \text{ kg/h}$$

despreciándose el consumo de hidrógeno en el reactor de desoxidación para el balance preliminar.

### 7.5.3.6 Secado final del hidrógeno

La corriente 9 abandona el deoxidiser y se distribuye hacia los secadores mediante las corrientes 10 y 11.

El sistema está compuesto por dos secadores, lo que permite operar de forma alternante: mientras uno se encuentra en servicio, el otro puede permanecer en regeneración o reserva.

Por tanto:

$$m_{10} = m_{11} = m_9$$

En operación simétrica y únicamente como representación del reparto:

$$m_{10} \approx m_{11}$$

aunque no es necesario asumir que ambos equipos operan simultáneamente al 50 %, ya que la configuración real dependerá de la filosofía de operación del sistema de secado.

Las corrientes 12 y 13 corresponden a las salidas de los secadores y vuelven a unirse formando la corriente 14.

Para el hidrógeno:

$$m_{H_2,14} \approx 354 \text{ kg/h}$$

La función de los secadores es eliminar la humedad residual hasta alcanzar la especificación de pureza final del producto, por lo que la masa de agua retirada será pequeña en comparación con el caudal de hidrógeno y se mantendrá pendiente de información más detallada del fabricante.

La concentración de agua al salir de los secadores debe ser menor a 5ppm:

$$y_{H_2O,out} = 5 \cdot 10^{-6}$$

El caudal molar de hidrógeno es 175,6 kmol/h.

El caudal molar residual:

$$n_{H_2O,out} = 175,6 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 8,78 \cdot 10^{-4} \frac{kmol}{h}$$

En masa:

$$m_{H_2O,out} = 8,78 \cdot 10^{-4} \cdot 18 = 0,016 \frac{kg}{h}$$

La cantidad que debe adsorberse en el dryer será, por tanto:

$$m_{H_2O,ads} = 2,52 - 0,016 = 2,50 \frac{kg}{h} H_2O$$

| Corriente PFD | Descripción                     | H <sub>2</sub> O      | Caudal H <sub>2</sub> húmedo | Unidad            | Observación                         |
|---------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1             | Entrada desde EL-100            | H <sub>2</sub> húmedo | 354                          | Kg/h              | Contiene humedad                    |
| 2             | Agua separada en V-102          | No cuantificado       | -                            | Kg/h              | Retorno de condensado               |
| 4             | Salida separador H <sub>2</sub> | Humedad residual      | ≈ 354                        | Kg/h              | Tras separación primaria            |
| 5             | Entrada intercambiador          | Humedad residual      | ≈ 354                        | Kg/h              | Antes de enfriamiento               |
| 6             | Salida intercambiador           | 2,39                  | ≈ 354                        | Kg/h              | Menos humedad                       |
| 7             | Agua fría hacia E-102           | 4                     | -                            | m <sup>3</sup> /h | 5 °C                                |
| 8             | Retorno a CH-101                | 4                     | -                            | m <sup>3</sup> /h | 25 °C                               |
| 9             | Salida deoxidiser               | H <sub>2</sub>        | ≈ 354                        | Kg/h              | Incluye 0,126 kg/h de agua generada |
| 10/11         | Entrada secadores               | 2,516/0               | 354                          | Kg/h              | Reparto según operación             |
| 12/13         | Salida DR-101 A/B               | <0,016/0              | Variable                     | Kg/h              | H <sub>2</sub> seco                 |
| 14            | Salida HY-100                   | <0,016                | ≈ 354                        | Kg/h              | H <sub>2</sub> ≥99.999%             |

Tabla 23. Balance preliminar de la unidad HY-100.

#### 7.5.4 Unidad ST -100 – Almacenamiento intermedio de hidrógeno

La unidad ST-100 actúa como sistema de almacenamiento intermedio o buffer de hidrógeno a 30 barg entre la etapa de acondicionamiento y la compresión final. Su función principal es desacoplar temporalmente la producción del electrolizador del funcionamiento del compresor, aportando estabilidad operativa al sistema.

De acuerdo con el PFD elaborado, la corriente 14 procedente de la unidad HY-100 alimenta el depósito de

hidrógeno, mientras que la corriente 15 conduce el gas desde el almacenamiento intermedio hacia la unidad CP-100.

#### 7.5.4.1 Balance de materia

Para una condición estacionaria de operación, y suponiendo que el nivel de inventario del depósito permanece constante durante el periodo considerado, el balance general es:

$$m_{14} = m_{15}$$

Como el caudal de hidrógeno a la salida de HY-100 es aproximadamente:

$$m_{14} \approx 354 \text{ kg/h}$$

Se obtiene:

$$m_{15} \approx 354 \text{ kg/h}$$

Por tanto, la unidad ST-100 no modifica el caudal másico de hidrógeno durante la operación estacionaria, sino que actúa únicamente como elemento de acumulación y regulación.

| Corriente PFD | Descripción                         | Componente          | Caudal                     | Unidad |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------------|--------|
| 14            | H <sub>2</sub> procedente de HY-100 | H <sub>2</sub> seco | $\approx 354 \text{ kg/h}$ | Kg/h   |
| 15            | H <sub>2</sub> hacia CP-100         | H <sub>2</sub> seco | $\approx 354 \text{ kg/h}$ | Kg/h   |

Tabla 24. Balance de materia de la unidad ST-100.

#### 7.5.4.2 Consideración sobre acumulación

A diferencia del resto de equipos analizados, un depósito puede presentar acumulación de materia. En régimen transitorio, el balance general sería:

$$\frac{dm_{ST}}{dt} = m_{14} - m_{15}$$

Sin embargo, para el balance nominal del presente FEED se considera operación estacionaria, por lo que:

$$\frac{dm_{ST}}{dt} = 0$$

La capacidad de almacenamiento necesaria no se determinará en este apartado, ya que depende del tiempo de autonomía requerido y de la filosofía de operación de la planta. Su dimensionamiento se realizará posteriormente en el capítulo correspondiente.

### 7.5.5 Unidad CP-100 – Sistema de compresión

La unidad CP-100 tiene como finalidad incrementar la presión del hidrógeno procedente del almacenamiento intermedio hasta la presión requerida para su expedición o almacenamiento final.

En el PFD, la corriente 15 entra al compresor y la corriente 16 corresponde al hidrógeno comprimido enviado hacia el punto de expedición.

#### 7.5.5.1 Balance de materia

La compresión modifica la presión, temperatura y densidad del gas, pero, despreciando fugas y purgas, no modifica su caudal másico.

Por tanto:

$$m_{15} = m_{16}$$

$$m_{16} \approx 354 \text{ kg/h}$$

| Corriente PFD | Descripción                               | Componente                | Caudal                     | Unidad |
|---------------|-------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------|
| 15            | H <sub>2</sub> entrada al compresor       | H <sub>2</sub> seco       | $\approx 354 \text{ kg/h}$ | Kg/h   |
| 16            | H <sub>2</sub> comprimido para expedición | H <sub>2</sub> comprimido | $\approx 354 \text{ kg/h}$ | Kg/h   |

Tabla 25. Balance de materia de la unidad CP-100.

### 7.5.6 Unidad OX-100 – Sistema de gestión de oxígeno

La unidad OX-100 tiene como finalidad separar y gestionar la corriente de oxígeno generada en el ánodo del electrolizador PEM. De acuerdo con el PFD, la corriente 17 procedente de la unidad EL-100 entra en el separador de oxígeno, donde se produce la separación entre la fase gaseosa, rica en O<sub>2</sub>, y la fase líquida constituida principalmente por agua de proceso.

La corriente gaseosa abandona el separador mediante la corriente 22 y es conducida posteriormente al depósito de oxígeno a través de la corriente 23. Por su parte, el agua separada retorna al circuito de acondicionamiento mediante la corriente 18, formando parte del sistema interno de recirculación del lado anódico.

Adicionalmente, el PFD contempla una corriente de agua de reposición procedente de WT-100, identificada mediante las corrientes 25–24, cuya función es compensar el agua consumida en la electrólisis y las pérdidas asociadas al circuito.

#### 7.5.6.1 Balance de oxígeno

De acuerdo con el balance estequiométrico desarrollado anteriormente, la producción nominal de oxígeno correspondiente a una producción de 354 kg H<sub>2</sub>/h es:

$$m_{O_2} = 2.811 \text{ kg/h}$$

Por tanto, la corriente 17 contiene:

$$m_{O_2,17} \approx 2.811 \text{ kg/h}$$

Si se desprecia cualquier pérdida de oxígeno durante la separación:

$$m_{O_2,17} = m_{O_2,22}$$

Y en régimen estacionario:

$$m_{O_2,22} = m_{O_2,23}$$

Por lo que:

$$m_{O_2,22} \approx m_{O_2,23} \approx 2.811 \text{ kg/h}$$

Este valor corresponde aproximadamente:

$$\begin{aligned} 2.811 \cdot 24 &= 67.464 \text{ kg/día} \\ &\approx 67,464 \text{ t O}_2/\text{día} \end{aligned}$$

Cuando el electrolizador opera continuamente a plena carga.

#### 7.5.6.2 Depósito de oxígeno

El oxígeno separado es conducido mediante las corrientes 22 y 23 hasta el depósito representado en el PFD.

Para operación estacionaria:

$$m_{23} = m_{O_2, producto}$$

Si el depósito está acumulando oxígeno, el balance general será:

$$\frac{dm_{O_2, TK}}{dt} = m_{23} - m_{O_2, salida}$$

Para el balance nominal de proceso se considera ausencia de acumulación, por lo que la producción de  $O_2$  permanece igual a aproximadamente 2.811 kg/h.

Las líneas de venteo representadas en el PFD se consideran dispositivos de seguridad y no corrientes de operación normal, por lo que su caudal se toma igual a cero durante el caso nominal.

| Corriente PFD | Descripción              | Componente | Caudal          | Unidad | Observación           |
|---------------|--------------------------|------------|-----------------|--------|-----------------------|
| 17            | Salida anódica del stack | $O_2$      | 2.811           | Kg/h   | Contiene agua         |
| 18            | Agua desde sep. $O_2$    | $H_2O$     | 847.584         | Kg/h   | Recirculación         |
| 22            | $O_2$ desde separador    | $O_2$      | $\approx 2.811$ | Kg/h   | Corriente gaseosa     |
| 23            | $O_2$ hacia depósito     | $O_2$      | $\approx 2.811$ | Kg/h   | Sin pérdidas          |
| 24            | Agua de reposición       | $H_2O$     | 847.584         | Kg/h   | Make-up               |
| 25            | Agua tratada desde WTP   | $H_2O$     | 847.584         | Kg/h   | Alimentación a OX-100 |

Tabla 26. Balance preliminar de la unidad OX-100.

## 7.6 Resumen de corrientes

Una vez desarrollados los balances de materia de las principales unidades de proceso, se recopilan en este apartado las corrientes representadas en el Diagrama de Flujo de Proceso (PFD). Esta tabla constituye la tabla preliminar de corrientes de proceso (Process Stream Table) de la instalación y permite mantener la trazabilidad entre el PFD, los balances de materia y el posterior dimensionamiento de los equipos.

Para cada corriente se identifica el fluido principal, el origen y destino y, cuando ha sido posible determinarlo a partir de las bases de diseño, la estequiometría o la información disponible del electrolizador de referencia, su caudal másico.

En aquellas corrientes correspondientes a circuitos internos de recirculación, refrigeración o separación cuyo caudal depende de información específica del proveedor, se utiliza la designación TBD (To Be Determined). Estos valores deberán ser definidos durante una fase posterior de ingeniería o mediante información adicional del suministrador del paquete de electrólisis.

La tabla del balance de materia se adjunta en el anexo 13.3.

### 7.6.1 Corrientes principales cuantificadas

A partir de los balances desarrollados pueden establecerse cuatro magnitudes fundamentales que caracterizan el funcionamiento nominal de la planta:

| Magnitud                        | Valor                         |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Producción de hidrógeno         | 354 kg H <sub>2</sub> /h      |
| Producción de oxígeno           | ≈ 2.811 kg O <sub>2</sub> /h  |
| Consumo estequiométrico de agua | ≈ 3.165 kg H <sub>2</sub> O/h |
| Agua fresca de alimentación     | ≈ 5,63 m <sup>3</sup> /h      |

Tabla 27. Corrientes principales.

Estas magnitudes representan los principales flujos externos de materia asociados a la operación del sistema a plena carga.

La diferencia entre el agua fresca suministrada y el agua consumida estequiométricamente se atribuye, en esta fase de ingeniería, al tratamiento de agua, purgas y pérdidas auxiliares:

$$m_{agua, no incorporada} \approx 5.629 - 3.165 = 2.464 \text{ kg/h}$$

Este valor no se asigna íntegramente a una única corriente del PFD debido a que sería necesario disponer del balance detallado del sistema de tratamiento de agua para determinar su distribución.

### 7.6.2 Criterio adoptado para las corrientes de hidrógeno

En las corrientes comprendidas entre la salida del electrolizador y la expedición:

$$1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 10/11 \rightarrow 12/13 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16$$

se mantiene, como primera aproximación:

$$m_{H_2} = 354 \text{ kg/h}$$

Esta hipótesis supone despreciables las pérdidas de producto en operación normal.

No obstante, debe distinguirse entre el caudal del componente H<sub>2</sub> y el caudal total de la corriente. Las primeras corrientes pueden contener agua y pequeñas cantidades de otros componentes, por lo que afirmar que la corriente 1 tiene un caudal total de 354 kg/h sería incorrecto. Lo que puede establecerse es que contiene aproximadamente 354 kg/h de H<sub>2</sub>.

Después del acondicionamiento en HY-100, la corriente 14 presenta una pureza objetivo igual o superior al 99,999 % de H<sub>2</sub>, por lo que, a nivel de balance preliminar, puede considerarse prácticamente como hidrógeno puro.

### 7.6.3 Criterio adoptado para las corrientes de oxígeno

De forma análoga, la corriente 17 procedente del stack contiene aproximadamente:

$$m_{O_2, 17} = 2.811 \text{ kg/h}$$

pero su caudal total será superior debido a la presencia de agua:

$$m_{H_2O, 17} = 844.419 \text{ kg/h}$$

Una vez realizada la separación gas-líquido, las corrientes 22 y 23 pueden aproximarse, para el balance preliminar, a:

$$m_{22} \approx m_{23} \approx 2.811 \text{ kg/h}$$

despreciando humedad residual y pérdidas

## 7.7 Conclusiones del balance de materia

El desarrollo de los balances de materia ha permitido cuantificar las principales corrientes de proceso de la planta y establecer las condiciones nominales que servirán de referencia para el posterior dimensionamiento de los equipos.

Los cálculos se han realizado considerando como equipo de referencia el electrolizador PEM Nel MC4000, con una potencia nominal de 20 MW y una capacidad de producción de aproximadamente 354 kg H<sub>2</sub>/h. A partir de esta producción y de la estequiometría de la reacción de electrólisis se ha determinado un consumo teórico de agua de aproximadamente 3.165 kg/h y una generación simultánea de aproximadamente 2.811 kg O<sub>2</sub>/h.

Por otra parte, considerando las necesidades de agua de alimentación establecidas en las bases de cálculo, se obtiene un requerimiento aproximado de 5,63 m<sup>3</sup>/h de agua fresca para la operación de la instalación a capacidad nominal. La diferencia respecto al consumo estrictamente estequiométrico está asociada a las necesidades del sistema de tratamiento de agua, así como a rechazos, purgas y otras pérdidas propias de la operación.

Los principales resultados obtenidos para la condición nominal de diseño se resumen en la dicha tabla adjunta.

| Parámetro                        | Valor                                           |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| Potencia nominal de electrólisis | 20 MW                                           |
| Producción de hidrógeno          | 354 kg H <sub>2</sub> /h                        |
| Producción de hidrógeno diaria   | 8,496 t/día                                     |
| Producción de oxígeno            | $\approx 2.811 \text{ kg O}_2/\text{h}$         |
| Producción de oxígeno diaria     | $\approx 67,5 \text{ t O}_2/\text{día}$         |
| Consumo estequiométrico de agua  | $\approx 3.165 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{h}$ |
| Agua fresca de alimentación      | $\approx 5,63 \text{ m}^3/\text{h}$             |

Tabla 28. Resumen del balance de materia nominal.

# 8 BALANCE DE ENERGÍA

## 8.1 Introducción

Una vez establecidos los balances de materia y determinados los principales caudales de proceso, se procede al desarrollo del balance de energía de la instalación. Este análisis constituye una etapa fundamental dentro de la ingeniería FEED, ya que permite cuantificar las necesidades energéticas de las diferentes unidades, evaluar el aprovechamiento de la energía generada por la planta fotovoltaica y determinar la energía efectivamente disponible para la producción de hidrógeno.

En la instalación objeto del proyecto, la energía eléctrica constituye la principal entrada energética al proceso. Esta energía procede fundamentalmente de la planta solar fotovoltaica PV-100, dimensionada con una potencia pico de 23 MWp y una potencia instalada en inversores de 21,44 MWAC, y es gestionada mediante el sistema eléctrico ELC-100 antes de ser suministrada al sistema de electrólisis y a los distintos consumidores auxiliares.

El principal consumidor energético de la planta es la unidad de electrólisis EL-100, para la cual se ha seleccionado como equipo de referencia un electrolizador PEM Nel MC4000 con una potencia nominal de 20 MW. No obstante, la instalación presenta otros consumos asociados al tratamiento de agua, acondicionamiento y secado del hidrógeno, refrigeración, compresión, bombeo, instrumentación y demás servicios auxiliares, que

deberán ser considerados para determinar el consumo energético global de la planta.

El balance energético se desarrollará inicialmente para la condición nominal de diseño, correspondiente al funcionamiento del sistema de electrólisis a plena carga. Esta condición permitirá determinar las potencias requeridas por los principales consumidores y servirá posteriormente como referencia para su dimensionamiento.

Sin embargo, debido al carácter variable de la generación solar fotovoltaica, el análisis nominal por sí solo no resulta suficiente para caracterizar el funcionamiento anual de la instalación. Por este motivo, se diferenciará entre el balance de potencia en condiciones nominales y el balance anual de energía:

$$P[\text{MW}] \quad \text{y} \quad E[\text{MWh/año}]$$

La primera magnitud se empleará principalmente para el diseño y dimensionamiento de los equipos eléctricos y de proceso, mientras que la segunda permitirá determinar la producción anual efectiva de hidrógeno y evaluar el comportamiento energético y económico de la instalación.

Asimismo, el análisis energético permitirá estudiar la estrategia de operación planteada en el proyecto. En el escenario planteado se considerará prioritario destinar la energía fotovoltaica disponible y la red eléctrica a la producción de hidrógeno las 24 h, dentro de los límites operativos del electrolizador. En el segundo escenario se analizará una estrategia de operación a partir de un análisis de sensibilidad.

De esta forma, el balance de energía permitirá establecer la relación entre tres elementos fundamentales del proyecto:

$$\text{Recurso solar e importación de red} \rightarrow \text{Producción eléctrica} \rightarrow \text{Producción de H}_2$$

Los resultados obtenidos servirán posteriormente como base para el análisis de los escenarios de operación, el dimensionamiento de determinados equipos auxiliares y la evaluación técnico-económica de la planta.

Para evitar inconsistencias, mantendremos una separación clara entre tres niveles:

| Nivel                  | Magnitud principal              | Finalidad                      |
|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Diseño nominal         | MW                              | Dimensionamiento de equipos    |
| Rendimiento energético | kWh/kg H <sub>2</sub>           | Eficiencia del proceso         |
| Operación anual        | MWh/año y t H <sub>2</sub> /año | Viabilidad técnica y económica |

Tabla 29. Criterio metodológico.

## 8.2 Bases e hipótesis de cálculo

El balance energético de la planta se desarrolla a partir de las bases de diseño establecidas en capítulos anteriores, de las características técnicas de los equipos seleccionados y de una serie de hipótesis necesarias para alcanzar el grado de definición propio de una ingeniería FEED.

Los cálculos se realizan inicialmente para la condición nominal de operación, correspondiente al funcionamiento del sistema de electrólisis a plena carga. Posteriormente, estos resultados se combinarán con el perfil de generación de la planta fotovoltaica para determinar el comportamiento energético anual de la instalación.

### 8.2.1 Condiciones generales de cálculo

A efectos del balance energético se adoptan los siguientes criterios generales:

- Potencia pico de la planta fotovoltaica: 23 MWp.
- Potencia nominal instalada en inversores: 21,44 MWAC.
- Potencia nominal del sistema de electrólisis: 20 MW.

- Electrolizador de referencia: Nel MC4000.
- Tecnología de electrólisis: PEM.
- Producción nominal de hidrógeno: 8.496 kg/día, equivalente a 354 kg/h.
- El caso nominal se establece inicialmente al 100 % de carga.
- Generación FV anual PVGIS: 38.263.72 MWh/año
- El análisis anual se realizará posteriormente a partir de la producción fotovoltaica y de la estrategia de operación.
- Las pérdidas eléctricas y consumos auxiliares se contabilizarán únicamente cuando no estén ya incluidos en los datos de consumo proporcionados por el fabricante.
- Los consumos de equipos externos al paquete de electrólisis se evaluarán de forma independiente.

### 8.2.2 Base energética del electrolizador

Para la unidad EL-100 se adopta como referencia el Nel MC4000, cuya potencia nominal es de 20 MW y cuya producción nominal alcanza 8.496 kg H<sub>2</sub>/día.

El fabricante proporciona dos valores diferentes de consumo energético específico:

$$SEC_{stack} = 53,2 \text{ kWh/kgH}_2$$

y:

$$SEC_{system} = 56,77 \text{ kWh/kgH}_2$$

El primer valor corresponde al consumo eléctrico específico del stack, mientras que el segundo representa el consumo específico a nivel de sistema a plena capacidad.

Esta diferenciación resulta fundamental para el balance energético del proyecto.

A partir de la producción nominal:

$$m_{H_2} = 354 \text{ kg/h}$$

el consumo energético equivalente del stack resulta:

$$P_{stack} = 354 \cdot 53,2$$

$$P_{stack} \approx 18,83 \text{ MW}$$

Mientras que a nivel de sistema:

$$P_{EL-100} = 354 \cdot 56,77$$

$$P_{EL-100} \approx 20,10 \text{ MW}$$

Los auxiliares internos:

$$P_{aux \text{ int}} = 20,096 - 18,83 = 1,264 \text{ MW}$$

La pequeña diferencia respecto a los 20 MW nominales se debe al redondeo de los valores publicados de producción y consumo específico. Por este motivo, para el dimensionamiento eléctrico se mantendrá:

$$P_{EL-100,nom} = 20 \text{ MW}$$

| Parámetro | Valor | Unidad | Fuente |
|-----------|-------|--------|--------|
|-----------|-------|--------|--------|

|                                   |        |                       |               |
|-----------------------------------|--------|-----------------------|---------------|
| Potencia nominal                  | 20     | MW                    | Nel           |
| Producción nominal H <sub>2</sub> | 354    | Kg/h                  | Nel/calculado |
| Consumo específico stack          | 53,2   | kWh/kg H <sub>2</sub> | Nel           |
| Consumo específico sistema        | 56,77  | kWh/kg H <sub>2</sub> | Nel           |
| Potencia equivalente stack        | ≈18,83 | MW                    | Calculado     |
| Potencia equivalente sistema      | ≈20,1  | MW                    | Calculado     |
| Rango operativo                   | 20-100 | %                     | Nel           |

Tabla 30. Parámetros energéticos del sistema de electrólisis.

### 8.2.3 Límite de batería del consumo del electrolizador

Para evitar una doble contabilización de consumos, se establecerá una diferenciación entre los equipos incluidos dentro del package de electrólisis y los sistemas externos de planta.

El consumo específico:

$$56,77 \text{ kWh/kgH}_2$$

se considerará representativo del sistema de electrólisis MC4000, mientras que los equipos externos al alcance de dicho sistema serán contabilizados independientemente.

Por tanto, el balance general se planteará como:

$$P_{planta} = P_{EL-100} + P_{ext} + P_{perd}$$

donde  $P_{ext}$  representa los consumidores eléctricos externos al paquete de electrólisis.

Este criterio evita sumar nuevamente consumos internos que ya estén incorporados en el valor proporcionado por Nel de los 20,10 MW.

### 8.2.4 Consumos externos considerados

A efectos del presente FEED se analizarán separadamente aquellos consumidores que, de acuerdo con el PFD y los límites de batería establecidos para el proyecto, se encuentren fuera del paquete principal de electrólisis.

Entre ellos podrán encontrarse:

| Unidad  | Consumo específico                                  | Tratamiento        |
|---------|-----------------------------------------------------|--------------------|
| PV-100  | Pérdidas DC/AC                                      | Balance específico |
| ELC-100 | Transformadores y distribución                      | Balance específico |
| EL-100  | Electrólisis + auxiliares del Package               | Dato fabricante    |
| HY-100  | Acondicionamiento H <sub>2</sub> externo al Package | Según alcance      |

|        |                                           |                       |
|--------|-------------------------------------------|-----------------------|
| WT-100 | Tratamiento de agua al stack              | Balance específico    |
| CP-100 | Compresión final del H <sub>2</sub>       | Cálculo independiente |
| ST-100 | Consumo reducido/instrumentación          | Auxiliar              |
| OX-100 | Según filosofía de gestión O <sub>2</sub> | Auxiliar              |
| UT-100 | Servicios generales                       | Estimación FEED       |

Tabla 31. Consumos externos considerados.

### 8.2.5 Hipótesis para la planta fotovoltaica

La instalación fotovoltaica presenta las siguientes potencias de diseño:

- Potencia pico (potencia instalada de módulos): 23 MWp
- Potencia instalada en inversores strings: 21,44 MWAC

La relación DC/AC de la instalación será:

- DC/AC=1,07

Este sobredimensionamiento del campo fotovoltaico respecto a la potencia de los inversores permite incrementar las horas durante las cuales estos trabajan próximas a su potencia nominal, aunque puede producir pérdidas por clipping durante determinados periodos de elevada irradiancia.

En consecuencia, se distinguirá entre energía producida por el campo fotovoltaico y energía producida por inversores.

Para el balance anual no se supondrá un número arbitrario de horas equivalentes. La producción energética se determinará posteriormente mediante datos de recurso solar correspondientes a la localización seleccionada en Brenes (Sevilla).

### 8.2.6 Pérdidas eléctricas

Entre la generación fotovoltaica y los diferentes consumidores se producen pérdidas asociadas a la conversión y distribución eléctrica.

De forma general:

$$E_{\text{útil}} = E_{\text{FV}} - E_{\text{pérdidas}}$$

Estas pérdidas pueden incluir:

- pérdidas en cableado DC.
- pérdidas en inversores.
- pérdidas en cableado AC.
- pérdidas en transformadores.
- pérdidas en cuadros y sistemas de distribución.
- autoconsumos eléctricos de planta.

### 8.2.7 Consumo energético de compresión

El hidrógeno producido por el sistema de electrólisis abandona el sistema a una presión nominal de

aproximadamente 30 barg.

Posteriormente, la unidad CP-100 deberá elevar dicha presión hasta la presión 350 barg de almacenamiento o expedición establecida en las bases de diseño.

Su potencia se determinará mediante (capítulo 9):

$$P_{CP-100} = m_{H_2} \cdot w_{comp}$$

Donde:

- $P_{CP-100}$ : potencia requerida por el compresor, (455 kW).
- $m_{H_2}$ : caudal másico de hidrógeno, (354 kg/h).
- $w_{comp}$ : trabajo específico de compresión, (1,29 kW/kg/h).

### 8.2.8 Producción de hidrógeno en función de la energía disponible

Para el análisis preliminar, la producción de hidrógeno puede relacionarse con la energía eléctrica suministrada mediante:

$$m_{H_2} = E_{EL} / SEC_{H_2}$$

Teniendo en cuenta que:

$$SEC_{H_2} = 56,77 \frac{kWh}{kg} H_2$$

Así, por cada MWh eléctrico suministrado al sistema de electrólisis se obtiene aproximadamente:

$$\frac{1000}{56,77} = 17,61 \text{ kgH}_2 / MWh$$

Por lo que:

$$1 MWh_{el} \approx 17,6 \text{ kg H}_2$$

bajo las condiciones nominales de referencia.

### 8.2.9 Operación a carga parcial

La relación anterior constituye una simplificación basada en el consumo específico a plena carga.

En operación real:

$$SEC = f\left(\frac{P}{P_{nom}}\right)$$

es decir, el consumo específico puede variar con el porcentaje de carga del electrolizador.

Por tanto, para el análisis FEED se adoptarán solo el nivel de cálculo:

- Caso nominal: se empleará el consumo específico de 56,77 kWh/kg H<sub>2</sub> correspondiente al funcionamiento a plena capacidad.

### 8.2.10 Criterio para el balance anual

El balance anual se realizará posteriormente utilizando intervalos horarios, de manera que para cada hora  $i$  se determine la energía fotovoltaica disponible:

$$E_{FV,i}$$

y la potencia que puede ser absorbida por el electrolizador:

$$P_{EL,i} = \min(P_{FV,i}, P_{EL,max})$$

$$4 \leq P_{EL,h} \leq 20 \text{ MW}$$

sujeta además al rango operativo del MC4000.

Cuando la potencia disponible sea compatible con el rango de operación, la producción horaria podrá estimarse mediante:

$$m_{H_2,i} = E_{EL,i} / SEC_{H_2}$$

La producción anual será entonces:

$$m_{H_2,anual} = \sum_{i=1}^{8760} m_{H_2,i}$$

Como se ha supuesto que el electrolizador trabaja las 24 h la producción es continua debido al apoyo de la red eléctrica y por tanto la producción de hidrógeno es:

$$354 \text{ kg } H_2/h \cdot 8760 \text{ h} = 3.101.040 \text{ kg/año}$$

### 8.2.11 Escenario energético considerado

Las bases de cálculo anteriores se aplicarán al escenario de explotación definido para el proyecto.

- **Escenario de explotación:** Prioridad a la producción de hidrógeno. La energía fotovoltaica disponible se destina prioritariamente al electrolizador siempre que se cumplan sus límites operativos, cuando el recurso solar no esté disponible, se importa energía eléctrica de la red.

| Parámetro                             | Valor/Criterio                |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Potencia FV pico                      | 23 MWp                        |
| Potencia inversores                   | 21,44 MWAC                    |
| Ratio DC/AC                           | 1,07                          |
| Potencia nominal EL-100               | 20 MW                         |
| Electrolizador                        | Nel MC4000                    |
| Producción nominal                    | 354 kg H <sub>2</sub> /h      |
| SEC stack                             | 53,2 kWh/kg H <sub>2</sub>    |
| SEC sistema                           | 56,77 kWh/kg H <sub>2</sub>   |
| Presión H <sub>2</sub> electrolizador | 30 barg                       |
| Rango de operación                    | 20-100 %                      |
| Producción específica nominal         | ≈ 17,6 kg H <sub>2</sub> /MWh |
| Perfil de cálculo nominal             | Horario (8.760)               |
| Consumo CP-100                        | Cálculo independiente         |
| Consumos externos                     | Según unidad                  |
| Pérdidas eléctricas                   | Desagregados por sistemas     |

Tabla 32. Bases de cálculo energético adoptadas.

### 8.3 Balance energético de la planta FV – PV-100

De acuerdo con las Bases de Diseño, la instalación presenta una potencia pico en módulos fotovoltaicos de 23 MWp y una potencia nominal instalada en inversores de 21,44 MWAC. Esta configuración implica un sobredimensionamiento del campo fotovoltaico respecto a la capacidad nominal de conversión de los inversores.

El balance energético de PV-100 deberá considerar tanto el recurso solar disponible en la localización de Brenes (Sevilla) como las pérdidas asociadas a la transformación de la irradiación solar en electricidad.

Para la determinación de la producción energética de la unidad PV-100 se ha realizado una simulación mediante PVGIS considerando directamente la potencia pico de diseño de la instalación, correspondiente a 23 MWp (23.000 kWp). La simulación se ha efectuado para las coordenadas 37,538° N y -5,866°, utilizando la base meteorológica PVGIS-SARAH3 y tecnología fotovoltaica de silicio cristalino. Se ha considerado una inclinación óptima de 35°, azimut de 0° y unas pérdidas de sistema introducidas del 14 %. Como resultado, PVGIS estima una producción eléctrica anual de 38.263,72 MWh/año y una irradiación anual sobre el plano de los módulos de 2.190,79 kWh/m<sup>2</sup>·año (European Commission, Joint Research Centre, s. f.).

#### 8.3.1 Configuración energética de la planta

| Parámetro                  | Unidad           |
|----------------------------|------------------|
| Localización de referencia | Brenes (Sevilla) |
| Potencia FV pico           | 23 MWp           |
| Potencia inversores        | 21,44 MWAC       |
| Ratio DC/AC                | 1,07             |
| Potencia máxima AC         | 21,44 MW         |
| Sistema receptor principal | EL-100           |

Tabla 33. Parámetros principales de PV-100. Fuente: elaboración propia mediante PVGIS; configuración y resultado de la ejecución del proyecto.

Cuando la potencia DC disponible supere la capacidad de conversión de los inversores, la potencia AC quedará limitada a aproximadamente 21,44 MW, produciéndose pérdidas por clipping.

#### 8.3.2 Recurso solar disponible

La energía generada por la instalación depende fundamentalmente de la irradiación solar disponible en el emplazamiento.

En el Capítulo 3 se ha caracterizado previamente el recurso solar correspondiente a Brenes. Para el cálculo energético deberán considerarse, como mínimo:

- irradiación global horizontal (GHI);
- irradiación sobre el plano de los módulos (POA);
- temperatura ambiente;
- temperatura de operación de los módulos;
- orientación e inclinación de los paneles;
- pérdidas ópticas y eléctricas.

La irradiación sobre el plano del generador será la magnitud utilizada para estimar la energía incidente sobre el campo fotovoltaico.

Para un intervalo temporal  $i$ :

$$E_{solar,i} = G_{POA,i} \cdot A_{FV}$$

donde  $G_{POA,i}$  representa la irradiación recibida sobre el plano de los módulos y  $A_{FV}$  la superficie activa del generador.

No obstante, para una ingeniería FEED resulta más práctico utilizar una simulación fotovoltaica que incorpore directamente el recurso solar y las principales pérdidas del sistema.

### 8.3.3 Conversión de energía solar en electricidad

La potencia eléctrica generada por el campo fotovoltaico puede expresarse conceptualmente como:

$$P_{DC} = G_{POA} \cdot A_{FV} \cdot \eta_{mod}$$

La potencia real será inferior a la obtenida en condiciones estándar debido principalmente al efecto de la temperatura y a las distintas pérdidas del generador.

Una vez generada la energía en corriente continua, los inversores realizan la conversión DC/AC:

$$E_{FV,AC} = E_{FV,DC} \cdot \eta_{inv}$$

considerando adicionalmente las pérdidas asociadas al sistema.

Por tanto, de forma general:

$$E_{FV,AC} = E_{solar} \cdot \eta_{FV} \cdot \eta_{sistema}$$

La conversión de la irradiación solar en energía eléctrica no se calcula mediante una eficiencia del módulo, sino mediante una simulación con el software PVGIS, que considera las características tecnológicas fotovoltaica y las pérdidas introducidas en el modelo, dando lugar a 38.263,72 MWh/año.

### 8.3.4 Pérdidas consideradas

El rendimiento real de la instalación se encuentra condicionado por diferentes mecanismos de pérdida. En la fase FEED se consideran al menos los siguientes:

| Pérdidas       | Origen                                 |
|----------------|----------------------------------------|
| Temperatura    | Reducción rendimiento del módulo       |
| Suciedad       | Acumulación de polvo                   |
| IAM            | Incidencia angular de la radiación     |
| Mismatch       | Diferencias electricidad entre módulos |
| Cableado DC    | Pérdidas Óhmicas                       |
| Inversores     | Conversión DC/AC                       |
| Cableado AC    | Pérdidas eléctricas                    |
| Transformación | Transformadores                        |
| Disponibilidad | Paradas y mantenimiento                |
| Clipping       | Limitación por potencia del inversor   |

Tabla 34. Pérdidas consideradas FV.

Estas pérdidas no deben sumarse simplemente de forma aritmética, sino aplicarse sobre la producción correspondiente mediante el modelo energético utilizado.

Las pérdidas indicadas por PVGIS no deben sumarse a la producción anual de 38.263,72 MWh/año, ya que ya forman parte del modelo. Los efectos asociados a la temperatura, irradiancia, ángulo de incidencia y comportamiento espectral forman ya parte de la simulación (European Commission, Joint Research Centre, s. f.).

### 8.3.5 Producción específica

Una de las magnitudes más útiles para caracterizar la planta es la producción específica:

$$Y_{FV} = E_{FV,AC} / P_{FV,pico}$$

$$Y_{FV} = \frac{38.263.720 \frac{kWh}{año}}{23.000 kWp} = 1.663,64 kWh/kWp$$

### 8.3.6 Limitación por inversores

La potencia AC de la instalación está limitada por los inversores.

Por tanto, para cada intervalo horario:

$$P_{FV,AC}(t) = \min[P_{DC}(t) \cdot \eta_{inv}, 20M]$$

Cuando:

$$P_{DC}(t) \cdot \eta_{inv} > 20 MW$$

Dado que la potencia del campo fotovoltaico es mayor que la potencia instalada en inversores (relación DC/AC=1,07) podrán producirse pérdidas por clipping en periodos de elevada irradiancia. PVGIS no muestra el porcentaje de dicho clipping en los resultados de dicha simulación, por lo que no se añade ningún porcentaje de clipping al valor anual obtenido.

### 8.3.7 Acoplamiento PV-100/EL-100

Desde el punto de vista conceptual, la potencia máxima entregada por los inversores puede ser absorbida íntegramente por el electrolizador cuando este opera a plena carga.

Sin embargo, esta igualdad no implica que los 20 MW AC estén disponibles íntegramente para el stack, ya que entre la salida de los inversores y el proceso existen pérdidas eléctricas y pueden existir consumidores auxiliares.

Por ello, posteriormente estableceremos:

$$P_{FV,AC} = P_{EL} + P_{Aux} + P_{loss}$$

- $P_{EL}$ : potencia destinada a electrólisis.
- $P_{Aux}$ : potencia destinada a auxiliares
- $P_{loss}$ : pérdidas eléctricas.

### 8.3.8 Energía fotovoltaica aprovechable por el electrolizador

Para el escenario de prioridad a la producción de hidrógeno, la potencia suministrada al electrolizador estará limitada tanto por la generación fotovoltaica como por su potencia máxima:

$$P_{EL}(t) = \min[P_{FV,disponible}, 20 MW]$$

Adicionalmente, el Nel MC4000 presenta un rango operativo de referencia de aproximadamente 20–100 %, por lo que la potencia mínima de operación será aproximadamente.

Cuando:

$$4 MW \leq P_{FV,disponible} \leq 20 MW$$

El electrolizador podrá modular su carga siguiendo aproximadamente la generación disponible y cuando sea superior a 20 MW el electrolizador quedará limitado a su capacidad nominal.

### 8.3.9 Parámetros de simulación

La simulación se ha efectuado para las coordenadas 37,538° N y -5,866°, utilizando la base de datos meteorológica PVGIS-SARAH3 y considerando módulos fotovoltaicos de silicio cristalino. La inclinación óptima obtenida para los módulos es de 35°, con un azimut de 0° y unas pérdidas generales introducidas en el modelo del 14 % (European Commission, Joint Research Centre, s. f.).

| Parámetro                         | Valor                           |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Potencia FV simulada              | 23 MWp                          |
| Base meteorológica                | PVGIS-SARAH3                    |
| Inclinación                       | 35°                             |
| Azimut                            | 0°                              |
| Irradiación anual                 | 2.190,79 kWh/m <sup>2</sup> año |
| Producción anual FV               | 38.263,72 MWh/año               |
| Producción específica             | 1.663,64 kWh/kWp año            |
| Horas equivalentes                | Aprox 1.664 h/año               |
| Factor de capacidad               | Aprox 19,0 %                    |
| Variación interanual              | 994,45 MWh/año                  |
| Pérdidas por ángulo de incidencia | -2,59 %                         |
| Efectos espectrales               | +0,52 %                         |
| Temperatura y baja irradiancia    | -9,82 %                         |
| Pérdidas totales                  | -24,06 %                        |

Tabla 35. Parámetros de simulación PVGIS.

El documento de simulación se adjuntará en los anexos.

## 8.4 Balance energético del sistema eléctrico – ELC-100

De acuerdo con el PFD desarrollado, esta unidad constituye la interfaz energética entre la planta fotovoltaica PV-100 y el electrolizador EL-100, incluyendo principalmente los sistemas de transformación, distribución y protección eléctrica necesarios para adaptar las condiciones de la energía generada a los requerimientos del paquete de electrólisis.

Desde el punto de vista del balance energético, ELC-100 no constituye un consumidor de proceso propiamente dicho, sino un sistema de transferencia energética en el que se producen determinadas pérdidas asociadas fundamentalmente a los transformadores, conductores, cuadros eléctricos y demás equipos de distribución.

El balance general de la unidad puede expresarse como:

$$E_{ELC,in} + E_{red} = E_{ELC,out} + E_{loss,ELC}$$

Donde:

- $E_{red}$ : Energía importada desde la red.
- $E_{ELC,in}$ : energía eléctrica recibida desde PV-100
- $E_{ELC,out}$ : energía eléctrica disponible aguas abajo del sistema eléctrico.
- $E_{loss,ELC}$ : pérdidas internas de transformación y distribución.

#### 8.4.1 Límites de batería del balance eléctrico

Para evitar duplicidades con las pérdidas ya consideradas en la simulación fotovoltaica, se establece como criterio FEED que el balance de ELC-100 se realice desde la salida AC de los inversores hasta los terminales eléctricos.

La simulación PVGIS proporcionada considera una planta fotovoltaica de 23 MWp y unas pérdidas de sistema introducidas del 14 %, obteniendo una producción anual estimada de 38.263,72 MWh/año los consumidores.

No obstante, el informe resumido aportado no desglosa qué pérdidas eléctricas concretas están incluidas dentro de ese 14 %. Por ello, no sería riguroso añadir automáticamente un porcentaje completo adicional de pérdidas de inversores, cableado y transformación, ya que podría producirse una doble contabilización.

A efectos se adoptará por tanto de 38.263,72 MWh/año como energía anual de referencia procedente de PV-100, quedando las pérdidas adicionales aguas abajo sujetas a los límites de batería definidos.

#### 8.4.2 Pérdidas de transformación

Los transformadores presentan pérdidas asociadas fundamentalmente a dos fenómenos:

- Pérdidas en vacío: Originadas principalmente en el núcleo magnético y presentes mientras el transformador permanece energizado.
- Pérdidas en carga: Relacionadas principalmente con el efecto Joule en los devanados y dependientes del nivel de carga.

El rendimiento instantáneo puede expresarse como:

$$\eta_{TR} = P_{out}/P_{in}$$

Por lo que:

$$P_{loss,TR} = p_{in}(1 - \eta_{TR})$$

En esta fase FEED, al no haberse seleccionado todavía un modelo comercial definitivo de transformador, no se asignará una pérdida exacta de fabricante. Este valor deberá cerrarse posteriormente mediante la ficha técnica del equipo seleccionado.

#### 8.4.3 Pérdidas en distribución eléctrica

Además de las pérdidas de transformación, existen pérdidas asociadas al transporte interno de energía mediante cables y embarrados.

Las pérdidas por efecto Joule pueden expresarse como:

$$P_J = 3 \cdot I^2 \cdot R$$

para un sistema trifásico equilibrado.

Su determinación exacta requiere conocer:

- tensión de distribución;
- longitud de los circuitos;

- sección de los conductores;
- material empleado;
- corriente transportada;
- temperatura de operación.

Estos parámetros serán definidos durante el dimensionamiento del sistema eléctrico. Por tanto, en esta fase las pérdidas de distribución se mantienen como una variable del balance:

$$E_{loss,cables} = TBD$$

#### 8.4.4 Balance de potencia nominal

En condiciones nominales, la potencia máxima disponible a la salida de los inversores es 21 MW y el balance energético puede expresarse como:

$$P_{FV,AC} = P_{EL} + P_{Aux} + P_{export} + P_{loss}$$

Una planta FV limitada a 21,44 MWAC ya puede alimentar simultáneamente un electrolizador que demande exactamente 20 MW eléctricos y todos los auxiliares de planta a plena carga sin recurrir a otra fuente de alimentación o reducir ligeramente la carga del electrolizador.

#### 8.4.5 Filosofía de alimentación adoptada

Para el presente FEED se considerará una instalación conectada eléctricamente a red, permitiendo tanto la importación de energía.

La red proporciona así una interfaz que permite gestionar los desequilibrios instantáneos entre generación y consumo:

$$P_{grid} = P_{demanda} - P_{FV}$$

Si:

$$P_{grid} > 0$$

Entonces existe importación desde red.

No obstante, la estrategia concreta de importación deberá establecerse posteriormente. En particular, se supone que el electrolizador puede consumir energía de red durante cualquier hora simplemente para mantener una producción constante, ya sea mediante energía procedente del campo fotovoltaico, como energía eléctrica importada desde la red.

#### 8.4.6 Distribución de la energía eléctrica

La energía disponible de la planta fotovoltaica podrá destinarse a cuatro usos fundamentales:

$$E_{FV,AC} + E_{red} = E_{EL} + E_{Aux} + E_{loss}$$

Donde:

- $E_{red}$ : Energía importada de la red.
- $E_{EL}$ : Energía destinada a electrólisis (incluye todos los equipos de la planta).
- $E_{Aux}$ : Energía destinada a consumidores auxiliares.
- $E_{loss}$ : pérdidas sistema eléctrico.

En caso de existir energía generada que no pueda ser absorbida deberá introducirse, además:

$$E_{curt}$$

correspondiente a las pérdidas por limitación o curtailment.

El balance completo quedaría:

$$E_{FV} = E_{EL} + E_{Aux} + E_{loss} + E_{curt}$$

#### 8.4.7 Consideraciones

En esta fase se han identificado los principales flujos energéticos de ELC-100, manteniéndose como TBD aquellas pérdidas cuya determinación requiere la selección de equipos, longitudes de cable y niveles de tensión definitivos.

Este criterio evita aplicar factores globales de pérdidas que pudieran duplicar las pérdidas ya incorporadas en PVGIS. La simulación aportada establece una producción anual de 38,264 GWh/año para la instalación de 23 MWp y unas pérdidas totales calculadas por PVGIS del 24,06 %, aunque el documento no proporciona un desglose suficiente para asignarlas individualmente a los equipos de ELC-100.

### 8.5 Balance energético del electrolizador - EL-100

Para el desarrollo del balance se adopta como equipo de referencia el Nel MC4000, correspondiente a una clase de potencia de 20 MW y una producción nominal de 8.496 kg H<sub>2</sub>/día, equivalente a aproximadamente 354 kg H<sub>2</sub>/h. La documentación del fabricante establece un consumo específico de 53,2 kWh/kg H<sub>2</sub> a nivel de stack y 56,77 kWh/kg H<sub>2</sub> a nivel de sistema (Nel Hydrogen (s. f.), ficha MC Series Modular Plants, PD-0600-0145, revisión A).

$$P_{stack} = m_{H_2} \cdot SEC_{stack}$$

Sustituyendo:

$$P_{stack} = 354 \cdot 53,2 = 18.833 \text{ kW}$$

Este valor representa la potencia eléctrica directamente asociada a la reacción electroquímica dentro de los stacks PEM.

#### 8.5.1 Consumo energético total del sistema

El fabricante establece un consumo específico:

$$SEC_{system} = 56,77 \frac{kWh}{kg H_2}$$

Por tanto:

$$P_{EL-100} = 354 \cdot 56,77$$

$$P_{EL-100} \approx 20,10 \text{ MW}$$

La pequeña diferencia respecto a los 20 MW nominales de la clase MC4000 procede del uso conjunto de valores publicados redondeados de potencia, producción y consumo específico. Para el dimensionamiento eléctrico del proyecto se mantiene como valor nominal:

$$P_{EL-100,nom} = 20 \text{ MW}$$

mientras que para los cálculos energéticos específicos se utiliza el dato de 56,77 kWh/kg H<sub>2</sub> proporcionado por el fabricante.

#### 8.5.2 Consumos auxiliares internos del sistema

La diferencia entre el consumo energético a nivel de sistema y el correspondiente exclusivamente al stack permite estimar el consumo de los auxiliares incluidos dentro del límite de batería del paquete de electrólisis:

$$SEC_{aux,int} = 56,77 - 53,2$$

$$SEC_{aux,int} = 3,57 \frac{kWh}{kg H_2}$$

Aplicando la producción nominal:

$$SEC_{aux,int} = 354 \cdot 3,57 = 1.264 \text{ kW}$$

Por tanto, la contribución de estos auxiliares representa aproximadamente 6,29 % del consumo eléctrico total del sistema:

$$\frac{1,26}{20,10} \cdot 100 = 6,29 \%$$

| Concepto                        | Consumo específico          | Potencia equivalente |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Stack PEM                       | 53,2 kWh/kg H <sub>2</sub>  | 18,83                |
| Auxiliares internos del Package | 3,57 kWh/kg H <sub>2</sub>  | 1,26                 |
| Sistema completo                | 56,77 kWh/kg H <sub>2</sub> | 20,10                |

Tabla 36. Distribución del consumo energético de EL-100.

### 8.5.3 Energía química contenida en el hidrógeno

Para evaluar la eficiencia energética del proceso puede compararse la energía eléctrica suministrada con la energía química contenida en el hidrógeno producido.

Tomando como referencia un poder calorífico inferior y superior del hidrógeno de aproximadamente:

$$PCI_{H_2} = 33,31 \text{ kWh/kg}$$

$$PCS_{H_2} = 39,42 \text{ kWh/kg}$$

Por tanto:

$$P_{H_2,LHV} = 354 \cdot 33,31 = 11,79 \text{ MW}$$

$$P_{H_2,HHV} = 354 \cdot 39,42 = 13,95 \text{ MW}$$

### 8.5.4 Eficiencia energética

La eficiencia energética basada en PCI puede expresarse como:

$$\eta_{LHV} = \frac{PCI_{H_2}}{SEC_{system}}$$

$$\eta_{LHV} = \frac{33,31}{56,77} \cdot 100 = 58,7 \%$$

$$\eta_{HHV} = \frac{39,42}{56,77} \cdot 100 = 69,4 \%$$

Por tanto, la eficiencia del sistema depende de la base energética utilizada. Para evitar ambigüedades, en el presente proyecto se indicará siempre si la eficiencia está referida a PCI (LHV) o a PCS (HHV).

### 8.5.5 Balance energético nominal de EL-100

A nivel conceptual el balance energético puede entenderse como:

$$P_{eléctrica} = P_{H_2} + P_{térmica} + P_{pérdidas}$$

Tomando como referencia PCI:

$$18,83 = 11,79 + P_{térmica} + P_{pérdidas}$$

$$P_{térmica} + P_{pérdidas} = 7,04 \text{ MW}$$

Este término agrupa el calor generado en el proceso y las diferentes pérdidas energéticas internas.

No debe interpretarse automáticamente como la potencia térmica exacta que debe evacuar el sistema de refrigeración, ya que para ello sería necesario disponer de un balance térmico detallado del fabricante.

### 8.5.6 Consumo energético diario a plena carga

Para una producción diaria nominal de 8.496 kg H<sub>2</sub>/día el consumo energético diario equivalente será de:

$$E_{EL,día} = 8.496 \cdot 56,77 = 482,3 \text{ MWh/día}$$

Este valor es coherente con una operación próxima a los 20 MW durante 24 h:

$$20 \text{ MW} \cdot 24 = 480 \text{ MWh/día}$$

La diferencia está asociada al redondeo de los parámetros publicados.

### 8.5.7 Producción específica por unidad de energía

La relación inversa del consumo específico permite determinar la cantidad de hidrógeno producida por cada unidad de energía eléctrica:

Para 1 MWh:

$$Y_{H_2} = \frac{1000}{56,77} = 17,61 \text{ kg H}_2/\text{MWh}$$

### 8.5.8 Relación con la producción FV anual

La simulación con PVGIS establece una producción anual FV de 38.263,72 MWh/año si, únicamente como límite energético idealizado, toda esta energía pudiera suministrarse al sistema de electrólisis sin pérdidas adicionales ni restricciones operativas:

$$m_{H_2,ideal} = \frac{38.263.720,88}{56,77} = 674.000 \frac{\text{kg}}{\text{año}} = 674 \text{ t/año}$$

Este valor no representa la producción anual definitiva de la planta, si estuviese alimentada solo por la planta, pero como la se establece importación eléctrica de la red, la producción será mucho mayor, para maximizar la producción de hidrógeno.

### 8.5.9 Operación a carga parcial

El MC4000 dispone de un rango automático de operación comprendido aproximadamente entre el 20 % y el 100 % de carga.

Por tanto, para una potencia nominal de 20 MW (P<sub>min</sub>=4 MW y P<sub>max</sub>=20 MW).

En el análisis horario posterior, cuando la energía renovable disponible permita operar dentro de este intervalo, la producción de hidrógeno podrá estimarse mediante:

$$m_{H_2,i} = E_{EL,i}/SEC$$

Utilizando inicialmente SEC=56,77 kWh/kg como hipótesis FEED constante.

Cuando:

$$P_{FV,disponible} < 4 \text{ MW}$$

se considerará que el electrolizador no entra en operación estable en el escenario exclusivamente renovable, salvo que exista apoyo desde la red definido expresamente por la estrategia de funcionamiento.

### 8.5.10 Resumen energético del EL-100

| Parámetro                            | Valor                        |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Potencia nominal                     | 20 MW                        |
| Producción H <sub>2</sub>            | 354 kg/h                     |
| SEC stack                            | 53,2 kWh/kg H <sub>2</sub>   |
| SEC Sistema                          | 56,77 kWh/kg H <sub>2</sub>  |
| Potencia stack equivalente           | 18,83 MW                     |
| Auxiliares internos equivalentes     | 1,26 MW                      |
| Potencia total equivalente           | 20,10 MW                     |
| Energía química H <sub>2</sub> (PCI) | 11,79 MW                     |
| Eficiencia Sistema (PCI)             | 58,7 %                       |
| Eficiencia Sistema (PCS)             | 69,4%                        |
| Producción por MWh                   | 17,61 kg H <sub>2</sub> /MWh |
| Rango de carga                       | 20-100 %                     |

Tabla 37. Balance del electrolizador.

El electrolizador EL-100 concentra la mayor parte del consumo energético de la instalación. En condiciones nominales, la producción de aproximadamente 354 kg H<sub>2</sub>/h requiere del orden de 20 MW eléctricos, de los cuales aproximadamente 18,83 MW corresponden al stack y 1,26 MW a consumos auxiliares internos del sistema.

El consumo específico de 56,77 kWh/kg H<sub>2</sub> constituye por tanto el parámetro energético fundamental para relacionar la generación fotovoltaica con la producción de hidrógeno.

## 8.6 Balance energético de la unidad de tratamiento de agua - WT-100

### 8.6.1 P-101 A/B – Bombas de recirculación

En el capítulo 9 se establece un caudal de 864 m<sup>3</sup>/h de agua, a un incremento de presión de 10 bar y un rendimiento hidráulico del 82%. La configuración es 2x100%, una bomba en operación y la otra en reserva.

Como se ve en el capítulo 9:

$$P_{P101} = 305 \text{ kW}$$

Aplicando en 10% se tiene 335 kW/bomba.

Para el balance energético normal se cuenta con 305 kW porque solamente funciona una bomba.

### 8.6.2 AC-101 – Air cooler

AC-101 se dimensiona en el capítulo 9 para enfriar 864 m<sup>3</sup>/h de agua de 70 a 65°C con una carga térmica de 4,9 MW.

En el capítulo 9 define las 4 celdas, pero no se especifica la potencia de sus ventiladores por lo que se adopta a nivel FEED:

$$P_{AC-101} = 80 \text{ kW}$$

Equivalente a cuatro ventiladores de 20 kW. Esto se confirmará en etapas posteriores, por lo que no es un dato de fabricante.

### 8.6.3 WTP-101 – Tratamiento de agua

En el capítulo 9 se realiza el dimensionamiento mediante un balance energético, pero no se obtiene la potencia eléctrica del equipo. El caudal de diseño es de 6,5 m<sup>3</sup>/h.

Su consumo eléctrico se adopta conservadoramente:

$$SEC_{WTP} = \frac{1 \text{ kWh}}{\text{m}^3}$$

$$P_{WTP} = 6,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 6,5 \text{ kW}$$

Se adopta finalmente:

$$P_{WTP} = 10 \text{ kW}$$

### 8.6.4 IX-101 – Intercambio iónico

No dispone de accionamiento eléctrico propio, por tanto, su potencia eléctrica es nula. Los pequeños consumos de instrumentación /válvulas quedan en UT-100

### 8.6.5 Resumen de balance eléctrico WT-100

Se define:

$$P_{WT} = P_{P101} + P_{AC101} + P_{WTP101}$$

Es decir:

$$P_{WT} = 305 \text{ kW} + 80 \text{ kW} + 10 \text{ kW} = 395 \text{ kW}$$

## 8.7 Balance energético del sistema de tratamiento de hidrógeno - HY-100

La unidad HY-100 tiene como función acondicionar la corriente de hidrógeno procedente del electrolizador antes de su almacenamiento intermedio y posterior compresión. Desde el punto de vista energético, esta unidad puede incluir operaciones de separación gas-líquido, enfriamiento y secado del producto.

No obstante, el alcance energético de HY-100 depende directamente del límite de batería adoptado para el paquete de electrólisis. En el presente proyecto se ha seleccionado como referencia el sistema Nel MC4000, pero se toma un sistema HY-100 de secado de alta pureza externo a los límites de batería energético de EL-100.

En consecuencia, los consumos correspondientes a los equipos del HY-100 se contabilizan separadamente del consumo específico de 56,77 kWh/kg H<sub>2</sub> utilizados para el EL-100.

### 8.7.1 Definición del límite de batería

| Equipo                 | Función                                       | Consideraciones eléctricas FEED             |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| V-102                  | Separador de H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O | Consumo eléctrico despreciable              |
| Bomba circuito Chiller | Bomba/impulsión                               | Incluida en CH-101                          |
| E-102                  | Heat Exchanger                                | Sin consumo eléctrico directo significativo |

|               |                 |                                               |
|---------------|-----------------|-----------------------------------------------|
| CH-101        | Chiller         | Aproximadamente 100 kW térmicos seleccionados |
| R-101         | Deoxidiser      | Consumo eléctrico despreciable                |
| DR-101 A/B    | Dryers          | 20 kW heater                                  |
| Tanque buffer | Instrumentación | Consumo eléctrico despreciable                |

Tabla 38. Tratamiento energético de los equipos.

### 8.7.2 Separador de hidrógeno

El separador de hidrógeno realiza principalmente una separación física gas-líquido y no presenta un consumo energético significativo asociado directamente al proceso.

Por tanto, para el balance preliminar:

$$P_{Sep,H_2} \approx 0$$

sin considerar pequeños consumos de instrumentación o válvulas, que se incorporarán dentro de los servicios auxiliares.

### 8.7.3 Intercambiador de calor

El intercambiador de calor tampoco presenta un consumo eléctrico directo significativo, ya que su función consiste en transferir energía térmica desde la corriente de hidrógeno hacia un fluido refrigerante desde 70 °C a 20 °C. El circuito de agua fría es de 4 m<sup>3</sup>/h entre 5 y 25 °C.

Por tanto:

$$P_{E-102} \approx 0$$

El consumo asociado al enfriamiento debe asignarse al equipo que genera o circula el fluido refrigerante, fundamentalmente el chiller.

### 8.7.4 Sistema de refrigeración Chiller

De acuerdo con el PFD, HY-100 incorpora un chiller encargado de proporcionar refrigeración al intercambiador de calor.

La potencia térmica necesaria puede expresarse como:

$$Q_{cool} = m_{H_2} \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) + Q_{cond}$$

donde el segundo término representa el calor asociado a la condensación del vapor de agua presente en la corriente.

La potencia eléctrica requerida por el chiller será:

$$P_{CH} = \frac{Q_{cool}}{COP}$$

Donde:

- $P_{CH}$ : Potencia eléctrica del Chiller.
- $Q_{cool}$ : Carga frigorífica.
- $COP$ : Coeficiente de rendimiento del sistema frigorífico (Se adopta 3 ya que referencias lo sitúan entre 2,8 y 3,6).

De acuerdo con el capítulo 9, donde se desarrolla su dimensionamiento, se define una potencia frigorífica de diseño de 100 kW, para un caudal de agua de 4 m<sup>3</sup>/h y con unas temperaturas de impulsión y retorno de 5 y 25

°C, respectivamente.

Por tanto:

$$P_{CH-101} = \frac{100}{3} = 33,3 \approx 35 \text{ kW}$$

### 8.7.5 Deoxidiser

R-101 tiene como objetivo eliminar el oxígeno residual de la corriente de hidrógeno antes de la etapa de secado. En dicho proceso se reduce la concentración de oxígeno de 25 ppm a 5 ppm.

En consecuencia, para el balance energético del caso base, al tratarse de un reactor catalítico sin accionamiento mecánico, su consumo eléctrico se considera despreciable.

$$P_{Deoxo} = 0$$

### 8.7.6 Sistema de secado

El sistema de secado DR-101 A/B realiza el secado final de la corriente de hidrógeno mediante un proceso de adsorción. Dicha unidad está formada por dos torres, de forma que una se encuentra en operación mientras que la otra se encuentra en stand-by o en mantenimiento.

Se ha dimensionado para un peso de adsorbente de 300 kg y 8 horas de operación. La regeneración se produce a una temperatura aproximada de 200 °C mediante calentador eléctrico de 20 kW.

### 8.7.7 Consumo eléctrico externo de HY-100

Con las anteriores hipótesis, el balance energético de HY-100 queda reducido principalmente al consumo del sistema de refrigeración externo, al calentador utilizado en la regeneración y, en su caso, a pequeños equipos de impulsión no incluidos en el package.

Por tanto:

$$P_{HY-100} = P_{CH} + P_{pump} + P_{aux, HY}$$

V-102, E-102, R-101 y el tanque buffer no representan consumos eléctricos directos.

| Consumidor               | Potencia                                                           | Estado                             |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Separador H <sub>2</sub> | ~ 0 kW                                                             | Equipo pasivo                      |
| Heat Exchanger           | ~ 0 kW eléctrico                                                   | Intercambio térmico con Chiller    |
| Chiller                  | 100 kW (capacidad frigorífica)<br>35 kWe (potencia eléc. Estimada) | Balance térmico                    |
| Bomba auxiliar           | TBD                                                                | Según alcance final                |
| Deoxidiser               | 0 kW                                                               | Reactor catalítico                 |
| Dryers externos          | 20 kWe                                                             | Intermitente, durante regeneración |
| Tanque buffer            | 0 kW                                                               | Equipo pasivo                      |

Tabla 39. Balance energético preliminar de HY-100.

### 8.7.8 Relación con el balance global

Los consumos eléctricos asociados a la unidad HY-100 se añaden de manera independiente al balance energético

de la planta. El consumo específico de 56,77 kWh/kg H<sub>2</sub> representa el sistema de electrólisis y sus auxiliares internos del sistema de referencia, por lo que no incluye los equipos externos al acondicionamiento en HY-100.

## 8.8 Balance energético de sistema de compresión – CP-100

La unidad CP-100 tiene como función elevar la presión del hidrógeno acondicionado procedente del tanque buffer de HY-100 hasta la presión requerida para su almacenamiento final o expedición ST-100.

De acuerdo con las bases de diseño del proyecto, el hidrógeno entra al sistema de compresión a una presión aproximada de 30 barg, correspondiente a la presión nominal de salida del electrolizador Nel MC4000, y debe alcanzar una presión final de 350 barg.

El caudal nominal considerado, procedente del balance de materia, es 354 kg/h.

### 8.8.1 Condiciones de cálculo

| Parámetro                      | Valor                                  |
|--------------------------------|----------------------------------------|
| Fluido                         | H <sub>2</sub>                         |
| Caudal                         | 354 kg/h                               |
| Presión de aspiración          | 30 barg                                |
| Presión de descarga            | 350 barg                               |
| Presión absoluta de aspiración | Aprox 31 bara                          |
| Presión absoluta de descarga   | Aprox 351 bara                         |
| Temperatura de aspiración      | 35 °C                                  |
| Nº de etapas                   | 3                                      |
| Interenfriamiento              | Hasta temperatura próxima a aspiración |
| Rendimiento isentrópico        | 75 % (hipótesis FEED)                  |

Tabla 40. Condiciones de cálculo de compresión.

El rendimiento isentrópico del 75 % no representa todavía un dato garantizado de fabricante; se adopta como hipótesis preliminar de cálculo y deberá sustituirse posteriormente por el rendimiento del compresor seleccionado.

### 8.8.2 Relación de compresión

La relación global de compresión:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{351}{31} = 11,32$$

Una relación de compresión de este orden hace recomendable utilizar varias etapas con refrigeración intermedia, tanto para reducir el consumo energético como para limitar la temperatura de descarga.

Para tres etapas con relaciones de compresión iguales:

$$r_{etapa} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/3} = 2,25$$

Las presiones intermedias:

$$P_1 = 31 \text{ bara}$$

$$P_2 = 31 \cdot 2,25 = 69,6 \text{ bara}$$

$$P_3 = 69,6 \cdot 2,25 = 156 \text{ bara}$$

$$P_4 = 351 \text{ bara}$$

### 8.8.3 Trabajo específico de compresión

Para una primera estimación FEED se considera el hidrógeno como gas ideal y una compresión isentrópica por etapas con interenfriamiento.

El trabajo específico por etapa puede expresarse con la ecuación (Çengel y Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach):

$$w_s = \frac{k}{k-1} R_{H_2} T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(K-1)/K} - 1 \right]$$

Y considerando el rendimiento isentrópico:

$$w_s = \frac{w_s}{\eta_{is}}$$

Adoptando para el hidrógeno:

$$k \approx 1,41$$

$$R_{H_2} = 4,124 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$T_1 = 308,15 \text{ K}$$

Y tres etapas con interenfriamiento, se obtiene un trabajo específico aproximado de:

$$w_{comp} = 1,29 \frac{\text{kWh}}{\text{kg } H_2}$$

Este valor debe interpretarse como una estimación termodinámica FEED y no como el consumo garantizado de un equipo comercial.

Como referencia de orden de magnitud, Gardiner (2009) estima un mínimo termodinámico isoterma de aproximadamente 1,05 kWh/kg  $H_2$  para comprimir desde 20 bar hasta 350 bar, lo que confirma que el resultado obtenido desde 30 bar es coherente con el rango esperable al considerar irreversibilidades reales.

### 8.8.4 Potencia requerida por el compresor

La potencia de compresión se calcula mediante:

$$P_{CP} = m_{H_2} \cdot w_{comp}$$

Por tanto:

$$P_{CP} = 354 \cdot 1,29 = 456,7 \text{ kW}$$

Este será el valor preliminar adoptado para el balance energético nominal.

### 8.8.5 Consumo energético diario

En condiciones nominales de operación:

$$E_{CP, día} = 0,456 \cdot 24 \text{ h} = 10,97 \text{ MWh/día}$$

En función de la producción:

$$8.496 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot 1,29 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 10,96 \text{ MWh/día}$$

### 8.8.6 Comparación con el límite termodinámico

Gardiner (2009) indica que la energía mínima teórica para compresión isotérmica de hidrógeno desde 20 bar hasta 350 bar es aproximadamente 1,05 kWh/kg H<sub>2</sub>.

Nuestro resultado:

$$1,29 \frac{kWh}{kg H_2}$$

es superior al límite isotérmico, como debe ocurrir en un proceso real, pero permanece razonablemente próximo debido al uso de compresión multietapa con interenfriamiento.

No obstante, el consumo final deberá verificarse con la hoja de datos del compresor seleccionado (en una posterior ingeniería de detalle), ya que factores como el tipo de compresor, pérdidas mecánicas, fugas, número de etapas y estrategia de refrigeración pueden modificar significativamente el consumo real.

### 8.8.7 Resumen energético

| Parámetro                        | Valor                      |
|----------------------------------|----------------------------|
| Caudal H <sub>2</sub>            | 354 kg/h                   |
| Presión entrada                  | 30 barg                    |
| Presión salida                   | 350 barg                   |
| Relación global de compresión    | 11,32                      |
| Nº de etapas                     | 3                          |
| Relación por etapas              | 2,25                       |
| Rendimiento isentrópico adoptado | 75 %                       |
| Trabajo específico               | 1,29 kWh/kg H <sub>2</sub> |
| Potencia compresor               | 0,46 MW                    |
| Energía diaria                   | 10,97 MWh/día              |

Tabla 41. Balance energético preliminar de sistema de compresión.

## 8.9 Balance energético de servicios auxiliares – UT-100

La unidad UT-100 agrupa los sistemas auxiliares necesarios para garantizar el funcionamiento seguro y continuo de la instalación que no se encuentran incluidos dentro de los límites de batería de los paquetes principales de proceso.

Aunque individualmente estos consumidores presentan una potencia reducida respecto al sistema de electrólisis, su consideración resulta necesaria para establecer correctamente la demanda eléctrica total de la planta y evitar sobreestimar la fracción de energía fotovoltaica disponible para la producción de hidrógeno.

El consumo total de UT-100 se mantendrá, por tanto, como 100 kW, quedando su cuantificación definitiva vinculada a la elaboración de la Electrical Load List y a la selección de los diferentes paquetes auxiliares.

### 8.9.1.1 Balance energético de UT-100

El consume total de servicios auxiliares externos puede expresarse mediante:

$$P_{UT} = P_{aire} + P_{UPS} + P_{F\&G} + P_{HVAC} + P_{PLC/SCADA} + P_{alumbrado}$$

Por tanto, en esta fase:

$$P_{UT-100} = 100 \text{ kW}$$

Esta decisión no representa una falta de definición del proyecto, sino que responde al grado de madurez propio de una fase FEED. La cuantificación individual se realizará mediante una Electrical Load List, una vez seleccionados los principales equipos auxiliares.

| Consumidor                       | Potencia nominal | Estado FEED              |
|----------------------------------|------------------|--------------------------|
| Aire de instrumentos             | TBD              | Lista de instrumentos    |
| SCADA/PLC                        | TBD              | Ingeniería de control    |
| UPS                              | TBD              | Lista de cargas críticas |
| HVAC                             | TBD              | Layout/edificios         |
| Alumbrado y servicios auxiliares | TBD              | Ingeniería eléctrica     |
| Protección contra incendios      | TBD              | Principalmente standby   |
| TOTAL UT-100                     | TBD              | Electrical Load List     |

Tabla 42. Resumen de consumos auxiliares.

## 8.10 Balance energético global

Una vez analizados individualmente los principales consumidores y sistemas energéticos de la instalación, se procede a establecer el balance energético global de la planta. Este balance permite relacionar la energía eléctrica generada por la instalación fotovoltaica con la energía destinada a la producción de hidrógeno, la compresión, los servicios auxiliares, las pérdidas eléctricas y los posibles intercambios con la red.

Desde un punto de vista general, el balance energético de la instalación puede expresarse como:

$$P_{FV} + P_{red,imp} = P_{EL} + P_{WT} + P_{CP} + P_P + P_{HY} + P_{UT} + P_{loss} + P_{curt}$$

Donde:

- $P_{FV}$ : Energía producida por la planta FV.
- $P_{WT}$ : Energía unidad de tratamiento de agua.
- $P_{red,imp}$ : Energía importada desde la red eléctrica.
- $P_{EL}$ : Energía consumida por el sistema de electrólisis
- $P_{CP}$ : Energía consumida por la compresión de hidrógeno.
- $P_P$ : Energía consumida por bomba.
- $P_{HY}$ : consumo de equipos externos de acondicionamiento de hidrógeno.
- $P_{UT}$ : Consumo de SSAA
- $P_{loss}$ : Pérdidas de transformación y distribución.

- $P_{curt}$  : Energía renovable no aprovechada o limitada.

| Consumidor   | Potencia considerada |
|--------------|----------------------|
| EL-100       | 18.883,2 kW          |
| CP-100       | 456,7 kW             |
| P-101        | 305 kW               |
| AC-101       | 80 kW                |
| WTP-101      | 10 kW                |
| CH-101       | 35 kW                |
| DR-101 A/B   | 20 kW                |
| UT-100       | 100 kW               |
| <b>TOTAL</b> | <b>19.839,5 kW</b>   |

Tabla 43. Resumen balance consumos eléctricos de la planta.

Una vez realizado el balance energético real de la planta considerando todos los equipos independientes, se debe apreciar la diferencia con el dato de diseño de referencia del electrolizador Nel MC4000 (56,77 kWh/kg H<sub>2</sub>), en dicho caso de cálculo se obtiene:

$$\frac{19.839,5 \text{ kW}}{354 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ H}_2} = 56,04 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \text{ H}_2$$

### 8.10.1 Demanda mínima cuantificada

Con los consumidores que se conocen tomando como referencia en este caso el valor del fabricante Nel MC4000 (56,77 kWh/kg H<sub>2</sub>) y suponiendo el equipo de compresión y bombeo fuera del límite de batería del electrolizador:

$$P_{EL} = 20,097 \text{ MW}$$

$$P_{CP} = 0,457 \text{ MW}$$

$$P_{P-101} = 0,305 \text{ MW}$$

Por tanto:

$$P_{EL} = 20,097 \text{ MW} = P_{CH101} + P_{DR101} + P_{AC101} + P_{WTP101} + P_{UT101}$$

$$P_{conocida} = 20,097 + 0,457 + 0,305 = 20,86 \text{ MW}$$

A esto hay que añadir:

$$P_{planta} = 20,86 + P_{loss}$$

## 8.11 Análisis de los escenarios de operación

Una vez establecido el balance energético global de la instalación, se procede al análisis de las diferentes estrategias de explotación planteadas para la planta. El objetivo es determinar cómo la gestión de la energía fotovoltaica condiciona la producción anual de hidrógeno y la cantidad de energía susceptible de ser importada cuando el recurso solar sea insuficiente.

La planta presenta una particularidad fundamental: tanto la potencia máxima AC de la instalación fotovoltaica

como la potencia nominal del sistema de electrólisis son del orden de 20 MW, mientras que la producción fotovoltaica anual estimada mediante PVGIS asciende a 38.263,72 MWh/año.

De esta manera, la disponibilidad fotovoltaica no limita directamente la producción de hidrógeno, al existir respaldo de la red eléctrica.

- Escenario de operación: prioridad a la producción de hidrógeno verde mediante energía eléctrica fotovoltaica e importación de electricidad de la red.
- Escenario de sensibilidad: análisis de sensibilidad (presentado en el capítulo económico)

El análisis desarrollado en este capítulo será principalmente energético. La comparación económica definitiva de ambos escenarios se realizará posteriormente mediante los precios del mercado eléctrico y el valor de venta del hidrógeno.

#### 8.11.1.1 Operación a potencia FV elevada

Cuando exista suficiente generación FV el electrolizador podrá operar a plena carga (20 MW) y la producción nominal será aproximadamente 354 kg/h.

La energía adicional deberá utilizarse para alimentar los auxiliares.

#### 8.11.1.2 Operación a carga parcial

Cuando:

$$4 \text{ MW} \leq P_{FV} \leq 20 \text{ MW}$$

el electrolizador podrá operar a carga parcial.

Bajo la simplificación FEED de consumo específico constante:

$$m_{H_2} = \frac{P_{EL} \cdot 1000}{56,77}$$

Por ejemplo, para una potencia de 10 MW:

$$m_{H_2} = \frac{10 \cdot 1000}{56,77} = 176 \text{ kg/h}$$

Por tanto, el carácter modulable de la tecnología PEM permite adaptar la producción de hidrógeno a la disponibilidad instantánea del recurso fotovoltaico.

#### 8.11.1.3 Periodos de baja generación

Cuando:

$$P_{FV} = 4 \text{ MW}$$

se considerará, bajo la hipótesis adoptada, que no existe potencia suficiente para mantener el electrolizador dentro de su rango normal de operación, durante dichos periodos, se decide utilizar electricidad de red para mantener la operación.

### 8.11.2 Coste de oportunidad de producir hidrógeno

El criterio económico puede plantearse mediante el valor de la electricidad necesaria para producir un kilogramo de hidrógeno.

Si:

$$SEC_{H_2} = 58,06 \frac{kWh}{kg}$$

incluyendo electrólisis y compresión, producir un kilogramo de H<sub>2</sub> implica renunciar potencialmente a la venta de 0,05806 MWh de electricidad.

Para un precio horario de electricidad  $p_{el,i}$ , el coste de oportunidad energético será:

$$C_{op,i} = 0,05806 \cdot p_{el,i} \left( \frac{\text{€}}{\text{kg } H_2} \right)$$

Es decir, utilizar electricidad que podría venderse a 100 €/MWh para producir un kilogramo de hidrógeno supone renunciar a unos 5,81 €/kg H<sub>2</sub> de ingresos eléctricos, antes de considerar los demás costes de producción.

Este razonamiento será fundamental en el capítulo económico.

### 8.11.3 Precio eléctrico de indiferencia

También puede determinarse conceptualmente un precio de indiferencia entre producir hidrógeno y vender electricidad.

Si el hidrógeno puede venderse a un precio  $p_{H_2} \left[ \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]$  el valor bruto generado será:

$$V_{H_2} = \frac{1000}{SEC_{H_2}} = 58,06 \text{ kWh/kg}$$

Con  $SEC_{H_2} = 58,06 \text{ kWh/kg}$

Se producen aproximadamente:

$$\frac{1000}{58,06} = 17,22 \text{ kg } H_2/\text{MWh}$$

Por tanto:

$$V_{H_2} = 17,22 p_{H_2} \text{ €/MWh}$$

Como primera opción:

$$p_{el} < V_{H_2}$$

Favorecería la producción de hidrógeno, mientras que:

$$p_{el} > V_{H_2}$$

Favorecería la venta de electricidad.

Sin embargo, en la evaluación económica definitiva deberán descontarse los costes variables asociados a la producción, compresión, agua, mantenimiento y degradación del electrolizador.

### 8.11.4 Energy Balance Summary

Como se ha especificado anteriormente se ha realizado el balance energético real de la planta considerando todos los equipos independientes, por lo que se debe apreciar la diferencia con el dato de diseño de referencia del electrolizador Nel MC4000 (56,77 kWh/kg H<sub>2</sub>).

| Parámetro              | Valor      | Estado       |
|------------------------|------------|--------------|
| Potencia FV instalada  | 23 MWp     | Design Basis |
| Potencia en inversores | 21,44 MWAC | Design Basis |
| Relación DC/AC         | 1,11       | Calculado    |

|                                                     |                              |                             |
|-----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Producción FV de referencia                         | 38.263,72 MWh/año            | PVGIS                       |
| Producción específica FV                            | 1.663,64 kWh/kWp·año         | Calculado                   |
| Potencia nominal EL-100                             | 20 MW                        | Design Basis                |
| Producción nominal H <sub>2</sub>                   | 354 kg/h                     | Design Basis                |
| SEC stack EL-100                                    | 53,20 kWh/kg H <sub>2</sub>  | Fabricante                  |
| SEC sistema EL-100                                  | 56,77 kWh/kg H <sub>2</sub>  | Fabricante                  |
| Potencia equivalente EL-100                         | 20,10 MW                     | Calculado                   |
| Eficiencia EL-100, PCI                              | ≈58,7 %                      | Calculado                   |
| SEC CP-100                                          | 1,29 kWh/kg H <sub>2</sub>   | Cálculo FEED                |
| Potencia nominal CP-100                             | 456,7 kW                     | Cálculo FEED                |
| Potencia normal P-101                               | 305 kW                       | Cálculo FEED                |
| CH-101                                              | 100 kWth                     | Diseño térmico              |
| CH-101 eléctrico                                    | 35 kW <sub>e</sub>           | COP Preliminar              |
| Potencia eléctrica CH-101                           | 35 kW                        | Pendiente COP               |
| DR-101 A/B                                          | 20 kW <sub>e</sub>           | Máximo durante regeneración |
| AC-101                                              | 80 kW <sub>e</sub>           | Potencia ventiladores       |
| WTP-101                                             | 10 kW <sub>e</sub>           | Vendor/package              |
| UT-100                                              | 100 kW <sub>e</sub>          | Electrical Load List        |
| SEC mínimo actualmente cuantificado (calculado)     | 56,04 kWh/kg H <sub>2</sub>  | Calculado                   |
| Demanda mínima actualmente cuantificada (calculado) | ≈19,84 MW                    | Calculado                   |
| SEC mínimo actualmente cuantificado (Nel MC4000)    | ≈58,92 kWh/kg H <sub>2</sub> | EL + CP + P-101             |
| Demanda mínima actualmente cuantificada             | ≈20,86 MW                    | EL + CP + P-101             |
| Pérdidas eléctricas externas                        | TBD                          | Ingeniería eléctrica        |

Tabla 44. Resumen del balance energético de la planta.

La instalación fotovoltaica de 23 MWp presenta una generación anual estimada de 38,26 GWh, mientras que el

sistema de electrólisis seleccionado presenta una potencia nominal de 20 MW y constituye el principal consumidor energético de la planta.

La demanda mínima actualmente cuantificada asciende a aproximadamente 20,86 MW, correspondiente a EL-100, CP-100 y la bomba de recirculación P-101 en servicio. Este valor representa la demanda total de planta considerando como referencia el dato del fabricante Nel MC4000, sin embargo, se ha realizado también el balance energético de los equipos independientes (AC-101, WTP-101, CH-101, la regeneración de DR-101 A/B, UT-100 y las pérdidas eléctricas externas).

Esto proporciona un razonamiento para saber en qué valores se mueve el consumo de una planta de dicha potencia. Esto se tendrá en cuenta para definir un valor de consumo específico en el estudio técnico económico.

## 9 DIMENSIONAMIENTO Y ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS PRINCIPALES

### 9.1 Introducción y criterios generales de dimensionamiento

El objetivo de este capítulo es llevar las condiciones de proceso obtenidas en los capítulos anteriores a datos de diseño de equipos, estableciendo las capacidades, condiciones de operación, condiciones de diseño, potencias, configuraciones y requisitos técnicos principales necesarios para una posterior selección comercial.

El grado de definición adoptado corresponde a una fase de Front-End Engineering Design (FEED). Por tanto, no se pretende realizar el diseño mecánico de detalle de cada equipo, sino obtener una especificación suficientemente desarrollada para definir técnicamente la instalación, elaborar una Equipment List, preparar hojas de datos preliminares y servir como base para futuras consultas a suministradores.

La metodología general seguida en este capítulo se fundamenta en la trazabilidad entre los distintos documentos de ingeniería del proyecto:

*Bases de diseño → BM → BE → Dimensionamiento → Especificaciones de equipos principales*

De esta forma, los valores empleados en el dimensionamiento deberán llevarse a cabo, siempre que se pueda, de las Bases de Diseño, los balances previamente desarrollados o documentación técnica de los fabricantes. Cuando no se disponga de información suficiente, el parámetro se identificará expresamente como hipótesis de ingeniería o como dato pendiente de definición.

#### 9.1.1 Nomenclatura e identificación de equipos

Los equipos deberán disponer de una identificación única o Equipment Tag, manteniendo coherencia entre PFD, Equipment List, hojas de datos y futura documentación de ingeniería.

Se propone utilizar una nomenclatura funcional del tipo:

| Tag     | Equipo                      |
|---------|-----------------------------|
| PV-100  | Planta fotovoltaica         |
| ELC-100 | Sistema eléctrico           |
| EL-101  | Electrolizador PEM          |
| V-101   | Separador de H <sub>2</sub> |

|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| HX-101     | Intercambiador de H <sub>2</sub> |
| CH-101     | Chiller                          |
| DR-101 A/B | Secadores de H <sub>2</sub>      |
| CP-101     | Compresor de H <sub>2</sub>      |
| TK-101     | Depósito de H <sub>2</sub>       |
| P-101 A/B  | Bombas agua                      |
| AC-101     | Air-Cooler                       |
| V-201      | Separador de O <sub>2</sub>      |
| TK-201     | Depósito de O <sub>2</sub>       |

Tabla 45. Equipment Tag.

### 9.1.2 Contenido de las especificaciones preliminares

Para cada equipo principal se elaborará una ficha técnica o especificación técnica preliminar con, al menos, los siguientes parámetros cuando sean aplicables, con la finalidad de mostrar las principales características de diseño de tal equipo.

| Parámetro          | Contenido             |
|--------------------|-----------------------|
| Equipment Tag      | Identificación        |
| Service            | Servicio              |
| Quantity           | Nº de unidades        |
| Equipment type     | Tipo                  |
| Fluid              | Fluido de proceso     |
| Normal capacity    | Capacidad normal      |
| Design capacity    | Capacidad de diseño   |
| Normal pressure    | Presión normal        |
| Design pressure    | Presión de diseño     |
| Normal temperatura | Temperatura normal    |
| Design temperatura | Temperatura de diseño |
| Power/Duty         | Potencia              |
| Efficiency         | Rendimiento           |
| Materials          | Material preliminar   |

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Turndown             | Rango operativo       |
| Redundancy           | Configuración         |
| Control requirements | Requisitos de control |
| Design code          | Código aplicable      |
| Data source          | DB/MB/EB/VD/CALC/ASS  |
| Remarks              | Observaciones         |

Tabla 46. Contenido mínimo de las Preliminary Equipment Datasheet.

## 9.2 Dimensionamiento y especificación de PV-100 – Planta solar fotovoltaica

### 9.2.1 Criterios de diseño ambiental

- Altura promedio sobre el nivel del mar: 18 metros.
- Rangos de temperaturas medias extremas: 36 °C (máxima) / 4 °C (mínima).
- Temperatura de diseño de la planta: 40°C.

### 9.2.2 Criterio general de diseño

- Vida útil del proyecto: 25 años.
- Viales de acceso con un ancho de 6 metros.
- Viales internos con un ancho de 4 metros.
- Distancia mínima entre el borde externo del vial y los módulos: 1 metro.

### 9.2.3 Criterio de diseño eléctrico

- Pérdida máxima de potencia promedio de toda la planta permitida: promedio del 1,5% en baja tensión.
- Caída máxima de tensión permitida promedio de toda la planta: promedio del 0,5% en corriente continua.
- Caída máxima de tensión permitida promedio de toda la planta: promedio del 1% en corriente alterna de baja tensión.
- Pérdida máxima de potencia permitida promedio de toda la planta: 1% con factor de potencia ( $\cos(\varphi)$ ) de 0,95 en media tensión.
- Caída de tensión inferior al 3% en media tensión promedio de toda la planta.
- Utilización de un sistema de corriente continua de 1.500V.
- Uso de media tensión de 20kV.
- Resistividad térmica del terreno de 1,5 km/W.
- Cableado de media tensión enterrado directamente.
- Cableado de baja tensión CC enterrado bajo tubos y baja tensión AC enterrado directamente.
- En caso de que las zanjas atravesasen una carretera o camino, se utilizará hormigón para cubrir la zanja.
- Establecimiento de una red de tierra única.

## 9.2.4 Descripción de la planta fotovoltaica

La planta fotovoltaica tiene una capacidad de 23 megavatios pico (MWp), con 21,44 MW instalados en inversores. El sobredimensionamiento de los inversores se realiza para cumplir con el Código de Red español y permitir la entrega de potencia reactiva al sistema sin afectar la potencia activa. Sin embargo, en ningún momento los inversores superarán la potencia nominal asignada, ya que el controlador de la planta, conocido como Power Plant Controller (PPC), limitará la potencia de uno de los inversores.

La generación de energía de la planta se alcanza mediante la instalación de 34.596 módulos bifaciales conectados en series de 31 módulos. La corriente continua generada por los módulos se transforma en corriente alterna por los 67 inversores string y se eleva a 20 kilovoltios (kV) a través de 5 centros de transformación (CT). La energía se evacúa hacia el SET 20 kV, mediante circuitos enterrados. El punto de conexión de la planta se encuentra en el lado norte de la ubicación.

Para la instalación de los módulos fotovoltaicos, se ha utilizado una estructura fija que se hinca directamente en el terreno. La configuración de las estructuras es de 3V31, lo que implica la instalación de 3 módulos en posición vertical y 31 a lo largo, formando estructuras de 93 módulos. En total, la planta cuenta con 372 estructuras 3V31 con 1.116 strings.

## 9.2.5 Cálculos eléctricos

El objetivo de este anexo es realizar un estudio preliminar de los cálculos eléctricos requeridos para dimensionar correctamente la planta fotovoltaica. Se han llevado a cabo varios estudios que abarcan diferentes aspectos del sistema eléctrico.

### 9.2.5.1 Cálculo de los módulos

La relación entre la potencia de los módulos fotovoltaicos instalados y la potencia nominal del inversor puede variar entre 1 y 1,35 en este caso (1,07). Esta elección depende principalmente de varios factores, como las condiciones de irradiación solar y temperatura en el lugar de ubicación de la planta, la disposición de los módulos, las características técnicas de los equipos utilizados y la compensación económica por la generación de energía.

Para determinar el factor de dimensionamiento que maximiza la captación de energía en relación con la superficie de captación instalada, se han tenido en cuenta las características eléctricas del inversor seleccionado, así como las posibles pérdidas de energía que pueden ocurrir en el tramo que va desde el generador fotovoltaico hasta el inversor, y desde el inversor hasta el centro de transformación. Estas pérdidas pueden deberse a diversos factores, como la temperatura de operación, sombreado parcial de los módulos, suciedad acumulada en ellos, variaciones en los parámetros eléctricos, y efecto Joule en el cableado de corriente continua y corriente alterna de baja tensión.

En este caso, se ha optado por una configuración que utiliza Centros de Transformación (CTs) al que se unen las líneas de corriente alterna de los inversores de string de 320 kW de potencia, considerando una temperatura de 40°C. El rango de tensión de funcionamiento en corriente continua del inversor seleccionado en su máxima potencia es de 500 a 1500 voltios. Además, el inversor presenta una eficiencia máxima del 98,80%.

### 9.2.5.2 Cálculo de número mínimo de módulos por string

El número mínimo de módulos conectados en serie se determina en función de la tensión mínima requerida para que el inversor pueda operar en su máxima potencia. Es importante asegurarse de que la tensión de entrada al inversor sea igual o inferior a la tensión mínima de máxima potencia del generador fotovoltaico, la cual se obtiene en condiciones de temperatura de célula de 68°C. Por tanto, en primer lugar, se tomarán los datos más relevantes del módulo y del inversor:

| Características del módulo |        | Características del inversor |                |
|----------------------------|--------|------------------------------|----------------|
| <b>Wp</b>                  | 665 W  | <b>P nom</b>                 | 320 kVA, 40 °C |
| <b>VPMP</b>                | 38,5 V | <b>P máx gen</b>             | -              |

|                  |              |                   |        |
|------------------|--------------|-------------------|--------|
| <b>IPMP</b>      | 17,28 A      | <b>V PMP min</b>  | 500 V  |
| <b>ISC</b>       | 18,51 A      | <b>V PMP máx</b>  | 1500 V |
| <b>VOC</b>       | 45,6 V       | <b>V máx sist</b> | 1500 V |
| <b>Vmax sist</b> | 1500         | <b>I máx CC</b>   | 60 A   |
| <b>% Voc</b>     | -0,26 % / °C |                   |        |
| <b>TONC</b>      | 44           |                   |        |

Tabla 47. Características principales del módulo e inversor.

En segundo lugar, se debe conocer la temperatura mínima y máxima del lugar donde vaya a estar instalada la planta:

|                      |          |
|----------------------|----------|
| <b>T máxima (°C)</b> | 36 +2 °C |
| <b>T mínima (°C)</b> | 4 +2 °C  |

Tabla 48. Temperatura máxima y mínima en lugar de la implantación.

Con estos datos se calcula las tensiones máximas y mínimas que alcanzará el módulo, tanto en el punto de máxima potencia como a circuito abierto. Para ello, lo primero es calcular la temperatura que alcanza el módulo a dichas temperaturas extremas, mediante la siguiente fórmula:

$$T^a_{\text{máx/mín módulo}} = \frac{TONC - 20\text{ °C}}{800\text{ W/m}^2} * G + T_{\text{amb máx/mín}}$$

Realizando los cálculos:

$$T^a_{\text{máx módulo}} = \frac{44 - 20\text{ °C}}{800\text{ W/m}^2} * 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 38\text{ °C} = 68\text{ °C}$$

$$T^a_{\text{mín módulo}} = \frac{4 - 20\text{ °C}}{800\text{ W/m}^2} * 0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 6\text{ °C} = 6\text{ °C}$$

A continuación, se calcula las tensiones de los módulos fotovoltaicos para ver cómo se comporta las tensiones con la temperatura, con la siguiente ecuación:

$$\Delta V_{PMP}[T_{\text{amb máx}} = 68\text{ °C}] = (68 - 25) * \left(-0,26 \frac{\%}{\text{°C}}\right) = -11,18\%$$

$$V_{PMP\text{ mín}} = V_{PMP} * (1 + \Delta V_{PMP}) = 38,5 * (1 - 11,18\%) = 34,2\text{ V}$$

$$\Delta V_{PMP}[T_{\text{amb mín}} = 6\text{ °C}] = (6 - 25) * \left(-0,26 \frac{\%}{\text{°C}}\right) = 4,94\%$$

$$V_{PMP\text{ máx}} = V_{PMP} * (1 + \Delta V_{PMP}) = 38,5 * (1 + 4,94\%) = 40,40\text{ V}$$

$$\Delta V_{oc}[T_{\text{amb mín}} = 6\text{ °C}] = (6 - 25) * \left(-0,26 \frac{\%}{\text{°C}}\right) = 4,94\%$$

$$V_{oc\text{ máx}} = V_{oc} * (1 + \Delta V_{oc}) = 45,6 * (1 + 4,94\%) = 47,85\text{ V}$$

Esta consideración es fundamental para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema fotovoltaico. Si la tensión de entrada al inversor es inferior a la tensión mínima necesaria para alcanzar la máxima potencia, se podría limitar la capacidad de generación energética de la instalación.

Como se ha calculado, es posible obtener la tensión de máxima potencia mínima del generador en condiciones específicas de temperatura de célula de 68 °C. A partir de este valor, se establece la tensión mínima requerida en la entrada del inversor para asegurar un rendimiento óptimo.

Al definir el número mínimo de módulos en serie, se busca cumplir con esta condición para garantizar que el sistema fotovoltaico pueda operar en su máximo potencial y aprovechar al máximo la energía generada por los módulos solares.

$$V_{\min inv PMP} \leq V_{PMP \min} * N_{mod serie \min}^o$$

$$N_{mod serie \min}^o = \frac{V_{\min inv PMP}}{V_{PMP \min}} = \frac{500 V}{34,2 V} = 14,61 \approx 15 \text{ módulos mínimos en serie}$$

Como se puede observar, los resultados obtenidos en dichas fórmulas manifiestan que es posible la instalación mínima de 15 módulos en serie.

### 9.2.5.3 Cálculo del número máximo de módulos por string

El número máximo de módulos que se pueden conectar en serie está determinado por la tensión máxima en vacío que el inversor puede soportar en su entrada. En el caso del emplazamiento específico considerado, esta tensión máxima en vacío corresponde a la tensión de circuito abierto del generador fotovoltaico, que se alcanza en condiciones de temperatura ambiente y una irradiancia efectiva a T=25 °C.

Es importante tener en cuenta esta limitación para asegurar un funcionamiento adecuado del sistema fotovoltaico. Si se excede la tensión máxima en vacío permitida por el inversor, podría producirse un funcionamiento inestable o incluso daños en el equipo.

Al analizar las condiciones ambientales y de irradiancia en el emplazamiento específico, es posible determinar la tensión máxima en vacío del generador fotovoltaico utilizando los datos de temperatura e irradiancia. Este valor representa la máxima tensión que se puede obtener en las condiciones de funcionamiento del sistema.

Al establecer el número máximo de módulos en serie, se garantiza que la tensión de entrada al inversor no supere su límite máximo y, así, se evitan posibles problemas de funcionamiento.

$$V_{sist \max} \geq V_{oc \max} * N_{mod serie \max}^o$$

$$N_{mod serie \max}^o = \frac{V_{sist \max}}{V_{oc \max}} = \frac{1.500 V}{47,85 V} = 31,34 \approx 31 \text{ módulos máximos en serie}$$

$$N_{mod serie \max MPPT}^o = \frac{V_{\max MPPT inver}}{V_{PMP \max}} = \frac{1.500 V}{40,40 V} = 37,13 \approx 38 \text{ módulos máximos en serie}$$

De acuerdo con los cálculos realizados, se determinó que el número máximo de módulos que se pueden instalar en serie es de 31 módulos, lo que resulta en una tensión de vacío de 1.483,35 V. Esta configuración cumple con todos los requisitos establecidos y consideraciones previas.

Por lo tanto, se ha seleccionado la configuración de 31 módulos por string, ya que cumple con las especificaciones técnicas y los criterios establecidos para el diseño eléctrico de la planta fotovoltaica. Esta configuración garantiza que la tensión de vacío se mantenga dentro de los límites permitidos y proporciona un rendimiento óptimo del sistema fotovoltaico.

### 9.2.5.4 Cálculo de la intensidad máxima a la entrada del inversor

Es importante asegurarse de que la intensidad de cortocircuito del módulo bifacial sea menor que la capacidad máxima de corriente que puede soportar cada seguidor de punto de máxima potencia (MPPT) del inversor. En este caso, el inversor tiene la capacidad de manejar 1 o 2 strings por cada MPPT. Por lo tanto, se deben cumplir las siguientes condiciones:

Para el primer MPPT del inversor, la intensidad de cortocircuito del módulo bifacial debe ser inferior a 18,51 A. Esto garantiza que la corriente generada por los módulos no supere la capacidad máxima de corriente admitida por el MPPT.

Para el segundo MPPT del inversor, la intensidad de cortocircuito del módulo bifacial debe ser inferior a 50 A. Esto asegura que la corriente generada por los módulos no exceda la capacidad máxima de corriente admitida

por el segundo MPPT.

|                               | <b>Intensidad de Cortocircuito<br/>I<sub>sc</sub> (A)</b> |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Módulo                        | 18,51                                                     |
| Módulo<br>(+20% bifacialidad) | 22,21                                                     |
| 2 strings                     | 44,42                                                     |
| Inversor                      | 44,42 A < 60 A                                            |

Tabla 49. Intensidades de corto circuito a la entrada del inversor.

## 9.2.6 Cálculo de los circuitos de Baja Tensión

En todas las propuestas de instalación, se han tenido en cuenta todas las consideraciones técnicas establecidas en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) y sus instrucciones técnicas complementarias. Esto garantiza que la instalación cumple con los estándares de seguridad y calidad requeridos.

La elección de la sección del cableado se basa en dos criterios principales: el criterio térmico y el criterio de caída de tensión. Ambos criterios están fundamentados en el principio del Efecto Joule, que establece que la intensidad de corriente debe mantenerse por debajo de la capacidad de carga del cable para evitar sobrecalentamientos.

En cada caso, se selecciona la sección de cable más grande entre aquellas obtenidas mediante los dos métodos mencionados. Esto asegura que el cable tenga la capacidad suficiente para soportar la corriente sin sobrepasar sus límites de temperatura y garantiza una pérdida mínima de tensión en el circuito.

Al aplicar estos criterios, se asegura un dimensionamiento adecuado del cableado, evitando situaciones de sobrecarga y asegurando un rendimiento óptimo del sistema eléctrico. Esto contribuye a la eficiencia y fiabilidad de la instalación fotovoltaica, cumpliendo con los requisitos establecidos en las normativas vigentes.

### 9.2.6.1 Criterio de caída de tensión

En todos los casos, se asegurará que la caída de tensión en el tramo de baja tensión sea inferior al 0,5% en promedio. Para determinar la sección adecuada del cableado, se realizará un cálculo basado en condiciones estándar de funcionamiento, que incluyen un nivel de irradiancia de 1.000 W/m<sup>2</sup> y una temperatura del módulo de 25°C.

La expresión utilizada para calcular la sección teórica de las líneas de corriente continua es la siguiente:

$$S = \frac{L \cdot P}{\varepsilon \cdot U_n^2 \cdot \sigma} \times 2$$

En esta fórmula:

σ: Representa la conductividad del material del cable (cobre o aluminio) a la temperatura del conductor.

P: Es la potencia generada por cada agrupación de módulos en las condiciones consideradas.

ε: Es la caída de tensión deseada en forma de porcentaje.

U<sub>n</sub>: Es la tensión de máxima potencia en las condiciones consideradas.

Al aplicar esta expresión, se obtendrá la sección teórica del cableado que cumple con los requisitos de caída de tensión establecidos. Esto garantiza un adecuado transporte de la corriente eléctrica y evita pérdidas significativas de energía en el sistema.

### 9.2.6.2 Criterio térmico

La intensidad máxima que se transporta en cada tramo del sistema corresponde a la intensidad máxima de cortocircuito del módulo fotovoltaico, considerando condiciones de alta insolación y elevada temperatura exterior.

Siguiendo las directrices establecidas en la ITC-BT-40 para instalaciones generadoras, se tomará un valor de intensidad que sea un 25% superior al mencionado. Sin embargo, es importante asegurarse de que este valor resultante sea inferior a la intensidad máxima permitida por el cable utilizado en el sistema.

Esto se debe a que, durante momentos de alta insolación y temperaturas elevadas, la intensidad de corriente puede alcanzar valores máximos en el sistema fotovoltaico. Para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento del cableado, se toma en consideración este aumento de intensidad y se selecciona un cable que pueda soportar dicha corriente de manera segura.

Es fundamental cumplir con las especificaciones de capacidad de corriente del cable para evitar situaciones de sobrecarga y proteger la integridad del sistema eléctrico en su conjunto. Al tomar en cuenta este factor, se garantiza un funcionamiento confiable y seguro de la instalación fotovoltaica.

### 9.2.6.3 Cálculos de los circuitos de corriente continua (DC)

- **Tramo 1: Módulos-inversor string**

Los circuitos de corriente continua en la instalación fotovoltaica se refieren al tramo de cableado que conecta los módulos solares con los inversores. Este tramo se divide en varias secciones, y nos centraremos en el tramo 1, que abarca desde los módulos hasta los inversores de string.

Para el cableado de los strings, se utilizará un conductor solar de cobre con una sección mínima de 10 mm<sup>2</sup>. Al diseñar este tramo, se aplican criterios térmicos y de caída de tensión para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro.

- **Criterio térmico**

En el criterio térmico, consideramos la corriente de cortocircuito de un string, que se calcula en:

$$I_{sc} = 18,5 A$$

Sin embargo, se incrementa este valor en un 20% para tener en cuenta la posible ganancia por bifacialidad del panel, lo que nos da una corriente corregida de:

$$I_{sc \text{ bifacial}} = 22,21 A$$

Siguiendo las pautas de la ITC-BT-40 para instalaciones generadoras, adoptaremos un valor de intensidad un 25% superior a este, asegurándonos de que sea inferior a la capacidad máxima del cable.

$$I_{sc, sobredimensionado} = 27,77 A$$

En el caso de tramos aéreos que atraviesan los perfiles de la estructura fija, se asemeja al método de instalación en bandeja no perforada. Para estos tramos, debemos seleccionar un cable con una intensidad admisible mayor que la corriente corregida. Con una sección de 10 mm<sup>2</sup>, la intensidad máxima admisible del cable, considerando las condiciones de temperatura, agrupamiento y montaje sobre la estructura del seguidor solar, es de:

$$I_{adm} = 71 A \text{ (condiciones estandar)}$$

Sin embargo, se ve reducida por factores como:

- Coeficiente de temperatura del ambiente: 0,91
- Coeficiente de agrupamiento: 0,7

Resultando en una intensidad corregida admisible de 45,227 A.

Se debe verificar que la corriente corregida sea menor o igual a la intensidad admisible.

$$1,25 * 1,2 * I_{sc} \leq I_{adm}; 27,77 \leq 45,227$$

Para tramos enterrados dentro de tubos que conectan un seguidor solar con otro, se aplican diferentes

coeficientes. Estos incluyen:

- Coeficiente de temperatura del terreno: 1
- Coeficiente de agrupamiento para conductores enterrados en tuberías: 0,5
- Coeficiente de resistividad del terreno: 1,1 Km/W

Resultando en una intensidad admisible sobredimensionada de:

$$I_{adm} = 35,75 A$$

Nuevamente, se debe verificar que la corriente corregida sea inferior o igual a la intensidad admisible:

$$1,25 * 1,2 * I_{sc} \leq I_{adm}; \quad 27,77 A \leq 35,75 A$$

- **Pérdida de potencia:**

Además, se considera la pérdida de potencia en el tramo debido al efecto Joule. A plena carga, se producen pérdidas de potencia que se calculan mediante la fórmula:

$$P_{pérdidas} = I_{mpBIFACIAL}^2 * L * \frac{R}{1000}$$

Donde:

L: La longitud del cable.

R: Es la resistencia del cable por unidad de longitud.

Estas pérdidas se expresan como un porcentaje de la potencia pico del string.

- **Criterio de caída de tensión:**

Por último, se tiene en cuenta el criterio de caída de tensión. La caída de tensión en un tramo se calcula utilizando la fórmula:

$$\Delta U = 2 \cdot R \cdot L \cdot \frac{I_{mpBIFACIAL}}{U_{U1}}$$

Donde:

L: La longitud del cable (m).

R: Resistencia del cable por unidad de longitud.

$I_{mpBifacial}$ : Intensidad de máxima potencia (A).

$U_{U1}$ : Tensión del string (V).

Al considerar tanto el criterio térmico como el criterio de caída de tensión, podemos seleccionar la sección adecuada del cableado para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro de los circuitos de corriente continua en la instalación fotovoltaica.

- **Tramo 2: Inversor-Transformador**

El siguiente tramo que considerar es el que abarca desde el inversor de strings hasta el transformador. En este tramo, se utilizarán conductores de aluminio de 1x400mm<sup>2</sup>.

- **Criterio térmico:**

Siguiendo el criterio térmico, calculamos la corriente de cortocircuito del inversor de string de 320 kW de potencia, obteniendo un valor de:

$$I_{sc} = 230,94 A$$

Aplicando el incremento del 25% establecido por la ITC-BT-40 para instalaciones generadoras, obtenemos una corriente corregida de:

$$I_{sc \text{ sobredim}} = 288,68 \text{ A}$$

Se debe seleccionar un cable con una intensidad admisible mayor que este valor corregido.

Considerando las condiciones de temperatura, agrupamiento y utilizando un conductor de  $1 \times 400 \text{ mm}^2$ , obtenemos una intensidad máxima admisible del cable de:

$$I_{adm} = 393 \text{ A (en condiciones estándar)}$$

Sin embargo, esta intensidad se ve reducida por factores como:

- Coeficiente de temperatura del terreno ( $25^\circ\text{C}$ ): 0,96
- Coeficiente de agrupamiento para circuitos enterrados (separación 500 mm): 0,76
- Coeficiente de resistividad del terreno para conductores directamente enterrados (1,5 Km/W): 1,28

Como resultado, la intensidad admisible corregida es de 367,018 A.

Se debe verificar que la corriente corregida esté dentro del rango establecido:

$$1,25 * I_{sc} \leq I_{seccionador} \leq I_{adm}$$

$$288,68 \leq 315 \leq 367,018$$

- **Pérdida de potencia:**

En cuanto a la pérdida de potencia en el tramo, se produce debido al efecto Joule y se calcula utilizando la fórmula:

$$P_{pérdidas} = I_{mpBIFACIAL}^2 \cdot L \cdot R / 1000$$

Donde:

- L: Longitud del cable (m)
- R: Resistencia del cable por unidad de longitud.
- $I_{mpBIFACIAL}$ : Intensidad de máxima potencia (A)

Estas pérdidas se expresan como un porcentaje de la potencia pico del agrupamiento.

- **Criterio de caída de tensión:**

En el criterio de caída de tensión, se calcula la caída de tensión en el tramo utilizando la fórmula:

$$\Delta U = 2 \cdot R \cdot L \cdot \frac{I_{mp \text{ BIFACIAL}}}{U_{U1}}$$

Donde:

- L: Longitud del cable (m)
- R: Resistencia del cable por unidad de longitud
- $I_{mpBIFACIAL}$ : Intensidad de máxima potencia (A)
- $U_{U1}$ : Tensión del agrupamiento (V).

Teniendo en cuenta tanto el criterio de pérdida de potencia como el criterio de caída de tensión, podemos determinar las características adecuadas del cableado para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro en el tramo que va desde el inversor de strings hasta el transformador en la instalación fotovoltaica.

## 9.2.7 Cálculos de los circuitos de MT

En esta sección nos centraremos en los cálculos eléctricos relacionados con la línea de 20 kV que se encarga de recolectar la energía generada en los Centros de Transformación (CT) a través de sus transformadores y transportarla hasta la subestación. Para este propósito, se utilizarán conductores específicos de aluminio

conocidos como HEPRZ 12/20 Kv 1x400 mm<sup>2</sup>, 1x500 mm<sup>2</sup>, 1x630 mm<sup>2</sup> los cuales son adecuados para los dos circuitos involucrados en este proceso.

Estos conductores están diseñados para operar a una tensión nominal de 20 kV, lo que los hace idóneos para transmitir la energía generada de manera eficiente y segura. La elección del tipo de conductor, en este caso HEPRZ, se basa en su capacidad para soportar las condiciones de funcionamiento requeridas, así como su resistencia a la temperatura y a los factores ambientales.

Al emplear conductores de aluminio de 1x630 mm<sup>2</sup>, se garantiza una sección transversal adecuada para el flujo de corriente necesario en la línea de 20 kV. Esto es fundamental para evitar pérdidas excesivas de energía y mantener una transmisión eficiente.

#### 9.2.7.1 Intensidad máxima

La intensidad máxima calculada para el diseño de la línea se determina mediante la fórmula:

$$I_p = P / (\sqrt{3} * U * \cos(\varphi))$$

Donde:

- $I_p$ : Intensidad nominal (A)
- P: Potencia
- U: Tensión (V)
- $\Phi$ : Ángulo de desfase.

La intensidad de cortocircuito, que representa la corriente máxima que puede circular por los conductores, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$I_{cc} = K * \frac{S}{\sqrt{t}}$$

En esta ecuación:

- K: Coeficiente que depende del tipo de conductor utilizado (142 para cobre y 94 para aluminio).
- S: Sección del conductor en milímetros cuadrados.
- t: duración del cortocircuito en segundos.

En cuanto a la caída de tensión, se establece un límite máximo del 3% entre el Centro de Transformación (CT) y el centro de entrega 3L. La caída de tensión total se calcula sumando las caídas de tensión por tramos utilizando la siguiente fórmula:

$$\Delta V \approx I * L * (R * \cos(\varphi) + X * \sin(\varphi))$$

Donde:

- $\Delta V$ : Caída de tensión.
- I: Intensidad nominal.
- L: Longitud del cable.
- R: Resistencia del cable.
- X: Reactancia del cable.

En cuanto a las pérdidas de potencia, a plena carga se producen pérdidas por efecto Joule en la línea, las cuales se calculan utilizando la siguiente fórmula:

$$P_{p\acute{e}rdidas} = 3 * I^2 * L * R$$

En esta ecuación:

- L: Longitud del cable (m).

- R: Resistencia del cable.
- I: Intensidad nominal (A).

En el caso del sistema de media tensión (MT) de la instalación fotovoltaica, el circuito tiene:

- Longitud total del circuito es de 2.117 m.

Los cálculos realizados en el circuito de media tensión demuestran que las pérdidas de potencia máximas del circuito son inferiores al 1%, lo que indica una eficiencia satisfactoria. Además, la caída de tensión máxima del circuito es inferior al 3%, cumpliendo así con los criterios establecidos.

| Criterios de pérdidas         |       |          |
|-------------------------------|-------|----------|
| Criterio                      | Valor | ¿Cumple? |
| Caída de tensión circuito (%) | 0,50% | CUMPLE   |
| Pérdida de potencia (%)       | 0,23% | CUMPLE   |

Tabla 50. Resultados cálculos de MT.

De acuerdo con el cumplimiento de las regulaciones establecidas en el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión, junto con las Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23, aprobadas en el Real Decreto 337/2014 de 9 de mayo, se presentan las tablas de cálculo de las secciones del cableado eléctrico. Estas tablas justifican el cumplimiento de los requisitos reglamentarios especificados en la Instrucción Técnica Complementaria ITC-RAT 20, apartado 3.2.1.d).

### 9.2.7.2 Conclusión

En conclusión, los resultados obtenidos de los cálculos de los circuitos de media tensión (MT) demuestran el cumplimiento de los siguientes aspectos:

- Las pérdidas de potencia en todos los circuitos representan un valor inferior al 1% de la potencia total de la planta, cumpliendo así con los límites establecidos.
- La caída de tensión en todos los circuitos es inferior al 3%, garantizando una calidad de suministro adecuada.
- El factor de carga en todos los circuitos es inferior al 95%, lo que indica que la capacidad de los circuitos es suficiente para soportar las demandas de carga previstas.
- La potencia que se ha considerado para la potencia máxima de cada centro es de aproximadamente 4,30 MVA, suponiendo que todos están equilibrados en cuanto a la alimentación de la potencia nominal de inversores.

Estos resultados respaldan el diseño y la instalación del cableado eléctrico de acuerdo con las regulaciones y garantizan un funcionamiento seguro y eficiente de la planta fotovoltaica.

## 9.2.8 Componentes principales

### 9.2.8.1 Características del módulo fotovoltaico

Para el diseño de la planta, se ha planificado la instalación de módulos bifaciales con una capacidad de 665 vatios pico (Wp) de la marca Canadian Solar. El módulo seleccionado presenta una alta tensión de aislamiento de 1.500 voltios (V), lo que permite la configuración de diseños con un mayor número de módulos conectados en serie, lo cual se traduce en una reducción de los costos de implementación.

El módulo elegido incorpora tres diodos de derivación (bypass) para prevenir problemas causados por sombreados parciales. Cuando un módulo individual se encuentra sombreado parcialmente, puede generar una tensión inversa a lo largo de ese módulo específico. Los demás módulos de la cadena forzarán que la corriente circule a través del área sombreada. Sin embargo, al contar con un diodo de derivación en paralelo con la cadena en serie, la corriente dirigida pasará a través del diodo en lugar del módulo sombreado, minimizando así el calentamiento del módulo y la pérdida de corriente en la matriz.

En términos de características mecánicas, el módulo tiene capacidad para soportar cargas de viento de hasta 2.400 pascales (Pa) en la cara trasera y cargas de nieve de hasta 5.400 Pa en la cara frontal.

El captador solar se compone de 132 células monocristalinas y está protegido por un vidrio frontal de alta transparencia, recubierto con un material antirreflectante (AR) y vidrio solar templado. El recubrimiento del módulo presenta una alta resistencia al impacto de partículas de arena en suspensión, así como a sustancias alcalinas y ácidas.

Cada módulo estará equipado con una caja de conexión hermética de clasificación IP 68 y conectores del tipo MC4-EVO2.

#### 9.2.8.2 Datos del modulo

Se adjunta una tabla donde se muestran las características principales del módulo de Canadian-Solar:

| MÓDULO FOTOVOLTAICO        |                    |
|----------------------------|--------------------|
| Condiciones STC            |                    |
| Fabricante                 | Canadian Solar     |
| Modelo                     | CS7N-665MB-AG      |
| Factor de bifacialidad (%) | 70                 |
| Nº Células                 | 132                |
| Potencia Módulo Front (Wp) | 665                |
| Vmp Módulo (V)             | 38,5               |
| Imp Módulo (A)             | 17,28              |
| Voc (V)                    | 45,6               |
| Isc Módulo (A)             | 18,51              |
| Vmax sistema (V)           | 1.500              |
| dPmax/Dt (%/°C)            | -0,34              |
| dVoc/dT (%/°C)             | -0,26              |
| dIsc/dT (%/°C)             | 0,05               |
| TONC (°C)                  | 41 ± 3             |
| Dimensiones (mm)           | 2.384 x 1.303 x 35 |
| Peso (kg)                  | 37,9               |

Tabla 51. Características principales del módulo fotovoltaico. Fuente: BiHiKu7 CS7N-640–665MB-AG, versión 2.1 EN (CSI Solar, s. f.)

Las Condiciones Estándar de Medida (STC, por sus siglas en inglés) son un conjunto específico de condiciones de irradiación y temperatura de la célula solar que se utilizan de manera universal para caracterizar células, módulos y generadores solares. Estas condiciones se definen de la siguiente manera:

- Irradiancia solar: 1.000 vatios por metro cuadrado (W/m²).
- Distribución espectral: AM 1,5, que se refiere al espectro de radiación solar estándar considerado para pruebas y mediciones en aplicaciones fotovoltaicas.

- Temperatura de la célula: 25 grados Celsius (°C).

Estas condiciones estandarizadas permiten comparar y evaluar de manera consistente el rendimiento de las células solares, los módulos y los generadores solares en diferentes lugares y condiciones. Al utilizar las STC, se establece una base común para la caracterización y la comparación de los productos solares en la industria.

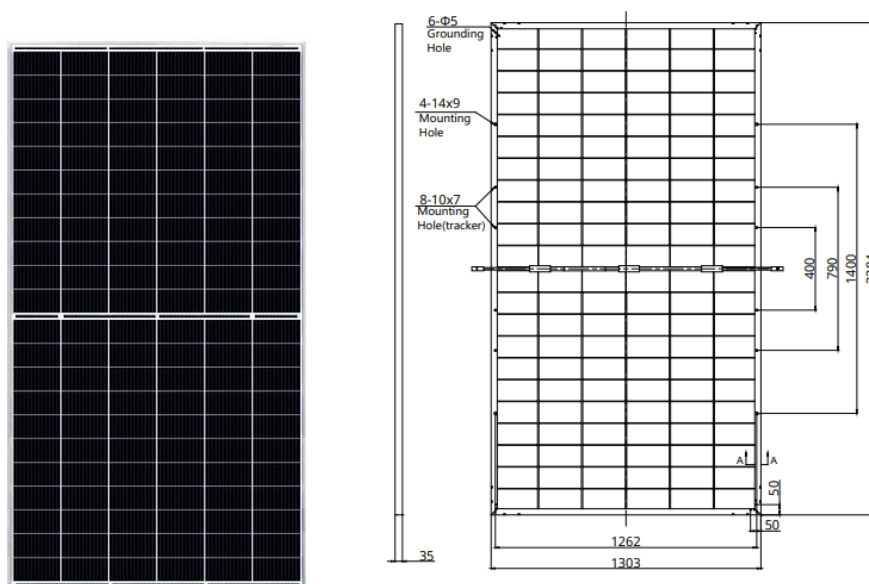


Ilustración 14. Dimensiones del módulo fotovoltaico.

## 9.2.9 Estructuras de apoyo de los módulos

Las estructuras se utilizan para sostener los paneles solares. Su función principal es brindar soporte y asegurar la fijación adecuada de los paneles, al mismo tiempo que les proporciona la inclinación y orientación óptimas para aprovechar al máximo la radiación solar. Estas estructuras están diseñadas para resistir el peso de los paneles, así como las cargas adicionales generadas por el viento y la nieve, siguiendo las regulaciones establecidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE). Se utilizará acero galvanizado como material de construcción, el cual se empotra directamente en el suelo, proporcionando una protección contra la corrosión de al menos nivel C4.

Las cargas a tener en cuenta serán calculadas según la normativa actual establecida en el Documento Básico SE-AE Acciones en la Edificación, teniendo en cuenta el tipo de estructura a utilizar. Estas cargas incluyen las cargas permanentes, las cargas adicionales generadas por el uso, el viento, la nieve y los posibles sismos. Las combinaciones de carga a considerar serán las especificadas en el CTE.

En el caso de la planta fotovoltaica en cuestión, se propone utilizar una estructura fija con una orientación azimutal de 90 grados y un ángulo de inclinación de 35 grados. La estructura está diseñada para instalar mesas que contengan 3 paneles en posición vertical y 31 paneles longitudinales, lo que resulta en un total de 93 paneles por estructura. En total, se instalarán 372 estructuras en la planta fotovoltaica.

Las características de dichas estructuras son:

| ESTRUCTURA MESAS                 |          |
|----------------------------------|----------|
| Características de la Estructura |          |
| Fija / Seguidor                  | Fija     |
| Dirección del módulo             | Vertical |

| <b>ESTRUCTURA MESAS</b>                 |      |
|-----------------------------------------|------|
| <b>Características de la Estructura</b> |      |
| Nº de módulos transversales             | 3    |
| Nº de módulos longitudinales            | 31   |
| Configuración de la mesa                | 3V31 |
| Módulos / mesa                          | 31   |
| Tilt                                    | 35°  |
| Azimut                                  | 90°  |
| Nº strings / estructura                 | 3    |
| Pitch [m]                               | 10   |

Tabla 52. Características de las estructuras.

Se garantizará una distancia mínima de 50 cm entre los módulos fotovoltaicos y el suelo. La estructura, al estar directamente hincada en el terreno, se encuentra conectada a tierra a través de su propio sistema de instalación. Con el fin de cumplir con los requisitos de seguridad eléctrica y evitar situaciones peligrosas, todas las estructuras se conectarán a la malla de tierra de la planta mediante un cable de cobre desnudo de 35 mm<sup>2</sup>, asegurando así las tensiones de paso y contacto adecuadas. Además, las estructuras adyacentes se unirán entre sí utilizando un cable aislado de color amarillo verde con una sección de 35 mm<sup>2</sup>.

### 9.2.10 Inversores string

Los inversores desempeñan un papel fundamental en los sistemas fotovoltaicos al convertir la corriente continua generada por cada panel solar en corriente alterna, la cual está en sincronía con la red a la que se conecta el sistema. Estos equipos operan de manera totalmente automática y están diseñados para garantizar un óptimo rendimiento energético.

Cuando la potencia de entrada alcanza un nivel adecuado, la electrónica de potencia integrada en los inversores supervisa constantemente la tensión y la frecuencia de la red eléctrica. A partir de esta información, el inversor inicia el proceso de acondicionamiento de potencia, asegurándose de que la electricidad generada por los paneles solares se ajuste a los parámetros requeridos por la red de distribución.

Los inversores están diseñados para maximizar la producción de energía al seguir continuamente el punto de máxima potencia de los módulos solares. Sin embargo, cuando la radiación solar no es suficiente para generar la corriente necesaria para abastecer la red eléctrica, el inversor se apaga de forma automática. Es importante saber que, durante la noche, cuando no hay producción de energía solar, el inversor no consume energía, ya que se alimenta únicamente de la energía generada por el sistema fotovoltaico.

Los fabricantes de inversores se comprometen a fabricar sus equipos de acuerdo con las normativas de seguridad aplicables, garantizando así su calidad y cumplimiento con los estándares establecidos.

El inversor se desconectará en las siguientes circunstancias:

- Fallo en la red eléctrica: en caso de una interrupción en el suministro de la red eléctrica, el inversor se desconecta automáticamente para evitar el funcionamiento en modo aislado. Se volverá a conectar cuando la tensión de la red se haya restablecido.
- Tensión fuera de rango: si la tensión de entrada está por encima o por debajo del rango de operación establecido para el inversor, este se desconectará automáticamente y esperará condiciones más favorables antes de reanudar su funcionamiento.

- Frecuencia fuera de rango: si la frecuencia de la red eléctrica está fuera del rango admisible, lo cual puede indicar un funcionamiento inestable o en modo de isla, el inversor se apagará de forma inmediata para proteger tanto el sistema fotovoltaico como la red eléctrica.
- Temperatura elevada: el inversor está equipado con un sistema de refrigeración que utiliza convección y ventilación forzada para mantener una temperatura adecuada de funcionamiento. En caso de que la temperatura interior del equipo aumente por encima de los límites establecidos, el inversor reducirá su potencia de salida para evitar daños y, si es necesario, se desconectará automáticamente para proteger su integridad y prolongar su vida útil.

Dichos inversores se encontrarán instalados en el exterior en el soporte de la estructura de los módulos.

También se debe destacar que el inversor cumple con dichas normativas: IEC 62109, IEC 61727, IEC 62116, IEC 60068, IEC 61683, VDE-AR-N 4110:2018, VDE-AR-N 4120:2018, EN 50549-1/2, UNE 206007-1:2013, P.O.12.3, UTE C15-712-1:2013.

A continuación, se adjunta las características del modelo de inversor seleccionado:

| Características eléctricas          | Valor                    | Unidad          |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Fabricante                          | SUNGROW                  | -               |
| Modelo                              | SG350HX                  | -               |
| Potencia nominal de inversor (30°C) | 352                      | kW              |
| Potencia nominal de inversor (40°C) | 320                      | kW              |
| Intensidad máxima por MPPT          | 30                       | A               |
| Cantidad de entradas                | 24                       | -               |
| Cantidad de MPPT                    | 12                       | -               |
| Rango de tensión MPP                | 500-1.500                | V <sub>dc</sub> |
| Máxima tensión de entrada           | 1.500                    | V               |
| Tensión de salida                   | 800                      | V               |
| Rango de temperatura de trabajo     | -30 a +60                | °C              |
| Frecuencia de trabajo               | 50                       | Hz              |
| Máxima distorsión armónica (THD)    | <3                       | %               |
| Rendimiento europeo                 | 98,8                     | %               |
| Sistema de refrigeración            | Smart forced air cooling |                 |
| Dimensiones                         | 1136 x 870 x 361         | mm              |
| Grado de protección                 | IP66                     |                 |

Tabla 53. Características del modelo de inversor seleccionado. Fuente: SG350HX Ficha Técnica.

### 9.2.11 Centros de transformación

El centro de transformación de 0,8/20 kV se ubicará dentro de un contenedor metálico para su integración y

protección adecuada. Este centro de transformación estará equipado con cubetos de recogida de aceite para cada transformador, con capacidad suficiente para contener todo el volumen de aceite en caso de rotura o fuga. Estos cubetos cuentan con sistemas de extracción de aceite, como grifos de drenaje, así como sistemas de extracción de agua de lluvia que retienen las trazas de aceite mediante filtros y pre-filtros.

En el plano de Detalle Power Block se muestra la disposición del centro de transformación para una mejor comprensión visual.

La aparamenta de Media Tensión se instalará dentro del centro de transformación mencionado anteriormente, de manera independiente a los inversores de string que estarán distribuidos en el campo fotovoltaico. Esta aparamenta estará compuesta principalmente por el transformador BT/MT, que eleva la tensión a la salida de los inversores, y por las celdas de media tensión.

En esta instalación fotovoltaica se empleará un transformador BT/MT en el centro de transformación para adaptar la tensión de salida de los inversores a la tensión nominal de la red de la instalación. La relación de transformación será de 0,8/20 kV.

El diseño del transformador estará preparado para soportar sin daños las cargas mecánicas y térmicas generadas por un cortocircuito externo, en cualquiera de las tomas. Para determinar los esfuerzos mecánicos en condiciones de cortocircuito, se calculará el valor máximo de la corriente de cortocircuito inicial de acuerdo con las indicaciones de la norma IEC 60076-5.

En las mismas plataformas que alojarán los transformadores, se instalarán las correspondientes celdas de media tensión. Estas celdas incluirán dos posiciones de línea con interruptor-seccionador de tres posiciones (abierto, cerrado y puesto a tierra) y una celda de protección para el transformador. Además, las celdas contarán con pasatapas para conectores enchufables y un captador capacitivo de tensión con indicador luminoso en todas las posiciones, lo que permitirá verificar la presencia de tensión y la secuencia de fases.

Las celdas tendrán una corriente nominal de 630 A y podrán soportar una corriente eficaz de corta duración (3 s) de 20 kA, con una tensión nominal asignada de 24 kV.

Las principales características de los centros de transformación a instalar son:

| <b>Centro de transformación 0,8/20 kV</b>  |                                   |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| CTs                                        | CT-01, CT-02, CT-03, CT-04, CT-05 |
| Tipo                                       | Aceite                            |
| Número máximo de inversores por CT         | 14                                |
| <b>Transformador</b>                       |                                   |
| Ratio de potencia                          | 4.500 kVA (a 51°C)                |
| Max potencia                               | 5.280 kVA, 30°C                   |
| Grupo de conexión                          | Dy11                              |
| Intensidad nominal                         | 3.811 A                           |
| Tensión BT/MT                              | 0,8/20 kV                         |
| Frecuencia                                 | 50 Hz                             |
| Tipo de refrigeración                      | ONAN                              |
| Rango de temperatura ambiente de operación | -25 a 60°C                        |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| Grado de protección            | IP54  |
| <b>Celdas de Media Tensión</b> |       |
| Clase de aislamiento           | SF6   |
| Rango de tensión               | 24 kV |
| Intensidad                     | 630 A |

Tabla 54. Características de los centros de transformación. Fuente: Datasheet Sungrow MVS4500-LV.

### 9.2.12 Cableado

En esta sección se detallan las instalaciones eléctricas requeridas para el diseño de la planta fotovoltaica. Los componentes principales que forman parte de la instalación son los siguientes:

- **Cableado solar de corriente continua:** Se refiere al conjunto de cables utilizados para conectar los paneles solares en una configuración de corriente continua. Estos cables transportan la electricidad generada por los paneles hacia los inversores, como se ha detallado anteriormente, dichos cables serán de 10 mm<sup>2</sup>.
- **Cableado de corriente alterna entre el inversor, el string y el transformador:** Esta parte del cableado se encarga de llevar la electricidad desde los inversores de string hasta el transformador, donde la tensión se transforma a un nivel adecuado para su conexión a la red eléctrica. Aquí se utilizan cables específicos para corriente alterna de 400 mm<sup>2</sup>.
- **Cableado de media tensión:** Este cableado se utiliza para la distribución de electricidad en niveles de tensión más altos, generalmente en el rango de media tensión (20kV). Se emplea para conectar el transformador a la red eléctrica o a los puntos de conexión correspondientes. En este caso serán de 400 mm<sup>2</sup>, 500 mm<sup>2</sup> y 630 mm<sup>2</sup>.

#### 9.2.12.1 Cableado solar de corriente continua

El cableado solar de corriente continua se refiere a los circuitos que conectan los módulos fotovoltaicos con los inversores string.

En el caso de una configuración con inversores string, se propone el siguiente diseño preferido para la parte de corriente continua (DC) en el diseño eléctrico de la instalación fotovoltaica. El primer tramo de cableado se utiliza para conectar los módulos fotovoltaicos entre sí. Para unir el final de cada serie con el inversor se utilizará cableado de sección 10 mm<sup>2</sup> (cobre), del tipo Solar o similar, con aislamiento de 1,8 kVDC y específico para este tipo de instalación. Se empleará un cable para el polo positivo y otro igual para el negativo.

En el caso de una configuración con módulos bifaciales, es importante evitar crear sombras en la parte posterior del cableado durante la instalación.

La instalación de este cableado se colocará el cableado al aire bajo los módulos fotovoltaicos, asegurándolo con abrazaderas a la estructura. Luego, otro tramo de cableado se enterrará bajo tubos hasta llegar al inversor string.

#### 9.2.12.2 Cableado de corriente alterna desde el inversor hasta el transformador

El cableado de corriente alterna (AC) que conecta los inversores string con los transformadores se instalará bajo tierra directamente en el terreno.

Para este tramo, se utilizará cable de aluminio clase II, del tipo XZ-1, con un aislamiento nominal de 0,6/1 kV y una sección mínima de 400 mm<sup>2</sup>. Este cable se instalará directamente enterrado en zanjas específicas, sobre una cama de arena, con una profundidad mínima de 0,65 metros. Esta configuración proporciona protección y seguridad adecuadas para el cableado.

El cable de baja tensión (BT) está dimensionado para una caída de tensión máxima del 1% en promedio y una

pérdida de potencia del 1,5% en promedio. Esto se realiza para garantizar una transmisión eficiente de la energía eléctrica desde los inversores hasta los transformadores, evitando pérdidas significativas de potencia y asegurando un rendimiento óptimo del sistema.

### 9.2.12.3 Cableado de media tensión

Los circuitos de media tensión en la instalación fotovoltaica estarán compuestos por cables de aluminio trenzado, con triple extrusión. Estos cables tendrán un aislamiento de 12/20 kV y una sección de 400 mm<sup>2</sup>, 500 mm<sup>2</sup> y 630 mm<sup>2</sup>. Se instalarán directamente enterrados y están diseñados para operar a temperaturas de hasta 105°C en condiciones normales y hasta 250°C en situaciones de cortocircuito.

El cableado de media tensión se dimensiona teniendo en cuenta una caída de tensión máxima del 3% en los respectivos circuitos que convergen en la subestación principal. Además, se establece una pérdida de potencia máxima del 1% para el total de la planta fotovoltaica. Estos valores garantizan una transmisión eficiente de la energía eléctrica a través de los circuitos de media tensión.

El circuito de media tensión a 20 kV se encarga de conectar el centro de transformación de la planta fotovoltaica con la SET, ubicada al norte de la planta. Esta conexión permite la transferencia de energía desde el centro de transformación hacia la red de distribución principal.

### 9.2.13 Obra civil

Dentro del ámbito de la construcción de la planta, se identifican diversas actividades de obra civil que requieren ser realizadas para una durabilidad de 25 años. Estas incluyen:

- Desmonte, terraplenado, acondicionamiento y nivelación del terreno: Se llevarán a cabo labores de remoción de la vegetación existente, movimiento de tierras, preparación del terreno y nivelación para facilitar el montaje de las estructuras fotovoltaicas.
- Obras de acceso: Se realizarán las obras necesarias para proporcionar acceso seguro y adecuado a la planta fotovoltaica, considerando aspectos como caminos de acceso, vías de entrada y salidas de vehículos, así como señalización y demarcación correspondiente.
- Diseño de viales internos: Se diseñarán y construirán los caminos internos dentro de la planta, permitiendo la circulación eficiente de vehículos y personal.
- Desvío de caminos públicos existentes: En caso de que la construcción de la planta afecte a caminos públicos preexistentes, se llevarán a cabo los desvíos necesarios para garantizar la continuidad del tráfico y la seguridad vial.
- Reposición de caminos afectados: Si la implantación de la planta afecta a caminos existentes, se realizarán las acciones requeridas para restituir y rehabilitar los tramos afectados, asegurando su buen estado de conservación.
- Drenaje de la zona de actuación: Se implementarán sistemas de drenaje adecuados para gestionar y controlar el agua en la zona de la planta, evitando problemas de acumulación y asegurando la estabilidad del terreno.
- Montaje de las estructuras fijas: Se llevará a cabo el ensamblaje e instalación de las estructuras fijas destinadas a soportar los paneles solares, asegurando su correcta colocación y alineación.
- Cimentación de los Centros de Transformación (CTs): Se realizará la construcción de las bases y cimentaciones necesarias para los Centros de Transformación, asegurando su estabilidad y correcto funcionamiento.
- Cerramiento perimetral: Se procederá a la instalación de un cerramiento que delimitará el perímetro de la planta fotovoltaica, proporcionando seguridad y control de acceso.
- Zanjas de baja y media tensión: Se realizarán excavaciones para la instalación de zanjas destinadas a alojar el cableado de baja y media tensión, asegurando su correcta protección y canalización.
- Estas actividades de obra civil son fundamentales para la construcción y puesta en marcha exitosa de la

planta fotovoltaica, garantizando tanto la eficiencia operativa como la seguridad y estabilidad de las instalaciones.

### 9.3 Dimensionamiento y especificación de ELC-100 – Sistema eléctrico de potencia

El dimensionamiento de dicha unidad alberga transformadores, rectificadores, celdas de MT, cuadros de BT, distribución y protecciones eléctricas.

#### 9.3.1 Dimensionamiento

La carga de la unidad ELC-100 es la potencia del electrolizador EL-100 de 20 MW.

A esta potencia debe añadirse los servicios auxiliares tales como CP-100, WT-100, HY-100, refrigeración y resto de SSAA.

#### 9.3.2 Transformador principal

Una estimación de la potencia de SSAA puede ser de 2 MW.

Por lo que dimensionaremos el transformador para una potencia de 22 MW.

La Potencia aparente viene dada por:

$$S = P / \cos\varphi$$

Adoptando un valor de  $\cos\varphi$  igual a 0,95.

$$S = \frac{22 \text{ MW}}{\cos(0,95)} = 23,16 \text{ MVA}$$

Si aplicamos un margen del 15%:

$$S_D = 1,15 \cdot 23,16 = 26,63 \text{ MVA}$$

Por tanto, seleccionaremos un transformador de 30 MVA.

$$S_{TR} = 30 \text{ MVA}$$

#### 9.3.3 Transformación dedicada al electrolizador

Para EL-100 resulta preferible una arquitectura modular, coherente con la modularización de los stacks y rectificadores.

Se divide la potencia del electrolizador en 4 trenes:

$$P_{train} = \frac{20}{4} = 5 \text{ MW}$$

Para cada tren:

$$S_{train} = \frac{5 \text{ MW}}{\cos(0,95)} = 5,26 \text{ MVA}$$

Aplicando un margen del 15%:

$$S_{train} = 1,15 \cdot 5,26 = 6,05 \text{ MVA}$$

Por tanto, se propone preliminarmente cuatro trenes de 6,3 MVA para la alimentación de los 4 trenes de electrólisis.

$$4 \times 6,3 \text{ MVA}$$

#### 9.3.4 Rectificadores AC/DC

Los stacks PEM necesitan corriente continua.

Si se adopta un rendimiento del 98%:

$$P_{DC,train} = 5 \text{ MW}$$

$$\eta_{rec} = \frac{P_{DC}}{P_{AC}}$$

$$P_{AC} = \frac{P_{DC}}{\eta_{rec}} = \frac{5}{0,98} = 5,10 \frac{\text{MW}}{\text{tren}}$$

El dimensionamiento definitivo de corriente DC se realizará después de diseñar el Stack:

$$I_{rect,D} \geq I_{stack,D}$$

### 9.3.5 Transformador de SSAA

Se requiere alimentación para bombas, compresores, refrigeración, instrumentación, iluminación etc.

Se ha optado por una hipótesis preliminar de 2 MW y  $\cos\varphi = 0,9$

Por tanto:

$$S_{SSAA} = \frac{2 \text{ MW}}{0,9} = 2,22 \text{ MVA}$$

Aplicando un margen del 20%:

$$S_{SSAA,D} = 2,22 \cdot 1,20 = 2,67 \text{ MVA}$$

Por lo que seleccionamos un rectificador con una potencia de:

$$S_{SSAA,TR} = 3,15 \text{ MVA}$$

## 9.4 Dimensionamiento y especificación de EL-100–Sistema electrólisis PEM

El EL-100 constituye el equipo principal de producción de hidrógeno. Para el proyecto FEED se adopta como referencia comercial el Nel MC4000, pero se desarrolla un diseño electroquímico propio del stack con objeto de definir las principales variables internas del sistema.

La base de diseño será:

- Potencia del sistema: 20MW
- Producción de hidrógeno: 354 kg/h
- Presión nominal: 30 barg

### 9.4.1 Dimensionamiento

#### 9.4.1.1 Potencia electroquímica de los stacks y total del sistema

En primer lugar, se diferenciará la potencia consumida por el sistema completo y por los stacks.

- Consumo específico Stack: 53,2 kWh/kg H<sub>2</sub>
- Consumo específico del sistema: 56,77 kWh/kg H<sub>2</sub>

Por tanto, la potencia electroquímica será:

$$P_{total,stack} = m_{H_2} \cdot SEC_{stack}$$

$$P_{total,stack} = 354 \cdot 53,2 = 18,83 \text{ MW}$$

La potencia del sistema completo será:

$$P_{sistema} = m_{H_2} \cdot SEC_{sistema}$$

$$P_{total,stack} = 354 \cdot 56,77 = 20,10 \text{ MW}$$

La diferencia corresponde al consumo del balance de la planta:

$$P_{BOP} = P_{sistema} - P_{total,stack} = 20,10 - 18,83 = 1,26 \text{ MW}$$

El valor comercial de 20 MW se mantiene como clase nominal del MC4000.

#### 9.4.1.2 Configuración modular

Nel publica unidades de 1,25 MW y 2,5 MW. Además, publica una configuración de 2,5 MW compuesto de dos stacks PEM de 1,25 MW. Por tanto, para una instalación de 20 MW se adoptará:

$$N^{\circ}_{módulos} = 8$$

$$P_{módulos} = 2,5 \text{ MW}$$

De manera que si cada módulo de 2,5 MW contiene 2 stacks de 1,25 MW:

$$N^{\circ}_{stacks} = 8 \cdot 2 = 16$$

#### 9.4.1.3 Producción de hidrógeno por stack

La producción total es de 354 kg/h.

Por tanto, la producción por stack es:

$$m_{H_2,stack} = \frac{354}{16} = 22,13 \text{ kg/h}$$

La producción por módulo es:

$$m_{H_2,módulo} = \frac{354}{8} = 44,25 \text{ kg/h}$$

#### 9.4.1.4 Número total de celdas y corriente

La producción electroquímica viene dada por la ecuación de Faraday:

$$n_{H_2} = \frac{\eta_f \cdot I \cdot N_{cell,total}}{2 \cdot F}$$

Donde:

- $F$ : 96.485 C/mol
- $\eta_f$ : Eficiencia de 0,99 (Adoptada)
- $N_{cell,total}$ : Se adopta 120 celdas/stack

Por lo que el número de celdas totales es de:

$$N^{\circ}_{cell,total} = 120 \cdot 16 = 1.920 \text{ celdas}$$

Despejando la corriente:

$$I = \frac{n_{H_2} \cdot 2 \cdot F}{\eta_f \cdot N_{cell,total}}$$

$$\bullet \quad n_{H_2} = 354 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ kmol } H_2}{2 \text{ kg}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}} = 48,78 \frac{\text{mol}}{\text{s}} H_2$$

$$I = \frac{48,78 \cdot 2 \cdot 96.485}{0,99 \cdot 1.920} = 4.952 \text{ A}$$

#### 9.4.1.5 Área activa de celda

Se adoptará como densidad nominal de corriente:

$$j_N = 2 \text{ A/cm}^2$$

El área activa requerida:

$$A_{act} = \frac{4.952}{2} = 2.476 \text{ cm}^2$$

Se selecciona:

$$A_{act} = 2.500 \text{ cm}^2$$

La densidad de corriente real será:

$$j_N = \frac{4.952}{2.500} = 1,98 \text{ A/cm}^2$$

El punto nominal de operación queda prácticamente en 2 A/cm<sup>2</sup>.

La geometría cuadrada se superficie electroquímica activa queda:

$$L = \sqrt{0,25} = 0,5 \text{ m}$$

#### 9.4.1.6 Potencia por stack

La potencia electroquímica total es:

$$P_{total,stack} = 18,83 \text{ MW}$$

Para 16 stacks:

$$P_{stack} = \frac{18,83}{16} = 1,177 \text{ MW}$$

La capacidad física nominal de referencia del stack comercial es de aproximadamente 1,25 MW, por lo que nuestro punto de operación es de:

$$LF_{stack} = \frac{1,177}{1,25} = 94,2\%$$

Esto presenta coherencia, ya que el stack dispone de cierta capacidad nominal adicional respecto al punto de producción utilizado en el balance.

#### 9.4.1.7 Tensión del stack

La potencia:

$$P_{stack} = V_{stack} \cdot I$$

Por lo que:

$$V_{stack} = \frac{1,177 \cdot 10^6}{4.952} = 237,7 \text{ V}_{DC}$$

La tensión media por celda será:

$$V_{cell} = \frac{V_{stack}}{N_{cell,stack}^o} = \frac{237,7}{120} = 1,98 \text{ V}$$

Esta tensión es exactamente la necesaria para reproducir el consumo específico del stack adoptado:

$$SEC_{stack} = 53,2 \text{ kWh/kg}$$

#### 9.4.1.8 Comprobación de potencia

Para cada stack:

$$P_{stack} = 237,7 \cdot 4.952 = 1,177 \text{ MW}$$

Para 16 stacks:

$$P_{stack,total} = 1,177 \cdot 16 = 18,83 \text{ MW}$$

Añadiendo el BOP:

$$P_{sistema} = 18,83 + 1,26 = 20,10 \text{ MW}$$

Por tanto, el diseño satisface simultáneamente:

$$m_{H_2} = 354 \text{ kg/h}$$

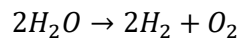
$$SEC_{stack} = 53,2 \text{ kWh/kg}$$

$$SEC_{sistema} = 56,77 \text{ kWh/kg}$$

$$P_{EL-100} = 20 \text{ MW}$$

#### 9.4.1.9 Producción de oxígeno

La reacción global es:



La relación másica es:

$$\frac{m_{O_2}}{m_{H_2}} = 8$$

Por lo que:

$$m_{O_2} = 8 \cdot 354 = 2.832 \text{ kg/h}$$

Por stack:

$$m_{O_2,stack} = \frac{2.832}{16} = 177 \text{ kg/h}$$

#### 9.4.1.10 Consumo estequiométrico de agua

La relación estequiométrica entre agua consumida e hidrógeno producido es:

$$\frac{m_{H_2O}}{m_{H_2}} = 9$$

Por tanto:

$$m_{H_2O,st} = 9 \cdot 354 \frac{\text{kg}}{\text{h}} H_2 = 3.186 \frac{\text{kg}}{\text{h}} H_2O$$

Aproximadamente:

$$V_{H_2O,st} = 3,19 \text{ m}^3/\text{h}$$

Sin embargo, Nel publica un consumo de agua potable de 15,9 L/kg por lo que el suministro exterior será:

$$V_{H_2O,BL} = 354 \cdot \frac{15,9}{1000} = 5,63 \text{ m}^3$$

La diferencia corresponde a consumos y pérdidas del sistema de purificación y BOP.

#### 9.4.1.11 Circuito de recirculación de agua

Tomamos como base un consumo de 7,5 L/min/celda y número de celdas calculada anteriormente de 1.920

celdas.

El volumen reaccionado es:

$$V_{reacc} = 7,5 \cdot 1.920 = 14.400 \frac{L}{min} = 864 m^3/h$$

Por stack:

$$V_{reacc,stack} = \frac{864}{16} = 54 m^3/h$$

Y por módulo de 2,5 MW:

$$V_{reacc,módulo} = 108 m^3/h$$

#### 9.4.1.12 Generación térmica

La carga térmica del stack puede calcularse a partir de la diferencia entre el consumo específico eléctrico de stack y la energía térmica asociada al hidrógeno:

$$SEC_Q = SEC_{stack} - SEC_{th}$$

Adoptando  $SEC_{th}=39,4$  kWh/kg:

$$SEC_Q = 53,2 - 39,4 = 13,8 \frac{kWh}{kg}$$

Por tanto, el calor producido en el stack:

$$Q_{stack} = 354 \cdot 13,8 = 4,89 kWh$$

El circuito de agua de 864 m<sup>3</sup>/h dispone de capacidad suficiente para evacuar esta carga con un salto térmico aproximado de:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot C_p}$$

El caudal másico es:

$$m = \frac{864.000 kg/h}{3.600 s/1h} = 240 kg/s$$

Por tanto:

$$\Delta T = \frac{4.890}{240 \cdot 4,18} = 4,87 ^\circ C \approx 5 ^\circ C$$

#### 9.4.1.13 Condiciones dinámicas de operación

El diseño deberá respetar el rango de operación del MC4000 entre 20-100 %.

Nel publica también un arranque desde standby por debajo de los 8 minutos, transición desde carga mínima a carga completa inferior a 15 s y una tasa de rampa máxima publicada del 7,4 % del rango completo por segundo.

## 9.5 Dimensionamiento y especificación de WT-100–Sistema de tratamiento de agua

### 9.5.1 Objeto y alcance

De acuerdo con el PFD desarrollado, WT-100 comprende principalmente:

- TK-101-depósito de agua de alimentación.
- WTP-101-sistema de tratamiento de agua, WTP.
- AC-101-Air-Cooler.
- IX-101-Ion Exchanger.
- P-101 A/B-bomba de recirculación.
- tuberías, válvulas, instrumentación y elementos auxiliares asociados.

El Nel MC4000 establece como referencia un consumo de agua potable de 15,9 L/kg H<sub>2</sub>, temperatura admisible de entrada de 5–35 °C y presión de alimentación de 2,7–4,8 barg.

Bases de diseño contempladas:

- $V_{agua,BL} = 5,63 \frac{m^3}{h}$
- $V_{reacc} = 864 \frac{m^3}{h}$
- $m_{O_2} = 2.832 \frac{kg}{h}$
- $T_{stack,in} = 70 \text{ } ^\circ C$
- $T_{stack,out} = 65 \text{ } ^\circ C$

### 9.5.2 TK-101 – Depósito de agua de alimentación

#### 9.5.2.1 Dimensionamiento

Para una producción nominal de 354 kg H<sub>2</sub> /h y un consumo específico de 15,9 L/kg H<sub>2</sub>, el caudal de agua requerido es:

$$Q = \frac{354 \cdot 15,9}{1000} = 5,63 \text{ m}^3/h$$

Se adopta una hipótesis de 24 h de autonomía, por tanto, el volumen requerido será:

$$V = Q \cdot t = 5,63 \cdot 24 = 135,1 \text{ m}^3$$

Además, se toma una fracción útil del 85 % para que queden márgenes de nivel mínimo, máximo y espacio libre en el depósito:

$$V_{geom} = \frac{V_{util}}{f_{util}} = \frac{135,1}{0,85} = 158,9 \text{ m}^3$$

Finalmente se selecciona un depósito de:

$$V_{TK-101} = 160 \text{ m}^3$$

Tomando una aproximación de altura de 6 m, se obtiene un diámetro del tanque de:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 160}{\pi \cdot 6}} = 5,83 \text{ m}$$

Se adopta unas dimensiones de:

$$D = 5,83 \text{ m}$$

$$h = 6 \text{ m}$$

### 9.5.3 WTP-101 – Acondicionamiento del agua de alimentación

#### 9.5.3.1 Dimensionamiento

El caudal normal es 5,63 m<sup>3</sup>/h.

Aplicando un margen hidráulico del 15%:

$$V_D = 1,15 \cdot 5,63 = 6,47 \text{ m}^3/\text{h}$$

Se selecciona 6,5 m<sup>3</sup>/h equivalente a:

$$6,5 \cdot 24 = 156 \text{ m}^3/\text{día}$$

La presión requerida a batería límite se mantendrá dentro del intervalo seleccionado para el electrolizador:

$$2,7 \leq P_{BL} \leq 4,8 \text{ barg}$$

$$5 \leq T_{BL} \leq 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 9.5.4 V-101 – Separador O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O

V-101 recibe la corriente bifásica procedente del lado anódico del electrolizador. Su función es separar el O<sub>2</sub> del agua recirculada no reaccionada en el stack, para que esta sea recuperada y recirculada hacia los stacks.

#### 9.5.4.1 Dimensionado

##### 9.5.4.1.1 Balance de material en el lado anódico

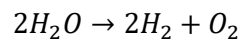
El caudal de circulación a los stacks es de 864 m<sup>3</sup>/h.

A 65 °C la densidad del agua es 981 kg/m<sup>3</sup>.

Por tanto, el caudal de agua circulada por los stacks es de:

$$m_{H_2O,in} = 864 \cdot 981 = 847.584 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

La reacción global es:



La relación estequiométrica entre agua consumida e hidrógeno producido es:

$$\frac{m_{H_2O}}{m_{H_2}} = 9$$

Por tanto:

$$m_{H_2O,st} = 9 \cdot 354 = 3.186 \text{ kg/h}$$

La relación másica para el oxígeno es:

$$\frac{m_{O_2}}{m_{H_2}} = 8$$

Por lo que:

$$m_{O_2} = 8 \cdot 354 = 2.832 \frac{\text{kg}}{\text{h}} O_2$$

La corriente líquida que abandona los stacks es:

$$m_{H_2O} = 847.584 - 3.186 = 844.398 \text{ kg/h}$$

Y llega a V-101 acompañada de:

$$m_{O_2,V-101} = 2.832 \text{ kg/h}$$

La entrada total al separador es de:

$$m_{V-101,in} = 844.398 + 2.832 = 847.230 \text{ kg/h}$$

El balance queda visualmente como:

$$844.398 \text{ H}_2\text{O} + 2.832 \text{ O}_2 \rightarrow V-101 \rightarrow \begin{cases} 2.832 \text{ O}_2 \\ 844.398 \text{ H}_2\text{O} \end{cases}$$

Esto representa el producto bifásico del stack en el separador de O<sub>2</sub> donde el agua irá destinada al air-cooler y O<sub>2</sub> a la salida.

#### 9.5.4.1.2 Caudal que sale de V-101

A aproximadamente 70°C la densidad del agua es de 978 kg/m<sup>3</sup>.

Por tanto:

$$V_{L,V-101} = \frac{844.398}{978} = 863,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

Aproximadamente 964 m<sup>3</sup>/h hidráulicos iniciales. La diferencia se debe al agua reaccionada.

Para el dimensionamiento sencillo de V-101 se toma un tiempo de residencia de 30s. Por lo que el volumen es de:

$$V_L = \frac{863,4}{3.600} \cdot 30 = 7,20 \text{ m}^3$$

Aplicando un margen del 50% para el oxígeno:

$$V_{sep} = 1,5 \cdot 7,20 = 10,8 \text{ m}^3$$

Se selecciona un volumen normalizado:

$$V_{V101} = 12 \text{ m}^3$$

Tomando una aproximación de altura de 4 m, se obtiene un diámetro del tanque de:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{\pi \cdot 4}} = 2 \text{ m}$$

Se adopta unas dimensiones de:

$$D = 2 \text{ m}$$

$$h = 4 \text{ m}$$

$$V_{V101,final} = 12,6 \text{ m}^3$$

### 9.5.5 AC-101 – AIR-COOLER

#### 9.5.5.1 Dimensionamiento

La corriente líquida que abandona los stacks y es separada en el separador de O<sub>2</sub> es:

$$m_{H_2O,V101} = 844.398 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 234,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El agua debe enfriarse desde los 70 °C que sale del stack hasta los 65 °C, por tanto:

$$Q_{air-cooler} = m_{H_2O,V101} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_{air-cooler} = 234,6 \text{ kg/s} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 5 = 4,90 \text{ MW}_{th}$$

Aplicando un 10% de margen:

$$Q_{air-cooler,D} = 1,10 \cdot 4,90 = 5,39 \text{ MW}_{th}$$

Para una estimación preliminar se utiliza la ecuación general de transferencia de calor (Lienhard, J. H. IV & Lienhard, J. H. V., *A Heat Transfer Textbook*, 6th ed., Sec. 2.4, Eq. (2.32)):

$$Q_{air-cooler,D} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Adoptando  $U=50 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  y  $\Delta T=25 \text{ K}$  se obtiene:

$$A = \frac{Q_{air-cooler,D}}{U \cdot \Delta T} = \frac{5,39 \cdot 10^6}{50 \cdot 25} = 4.310 \text{ m}^2$$

La superficie deberá de recalcularse con la temperatura ambiente de diseño del emplazamiento. Se mantienen 4 celdas:

$$4 \times 1,35 \text{ MW}_{th}$$

## 9.5.6 Dimensionamiento y especificación técnica de IX-101 – Ion-Exchanger

### 9.5.6.1 Dimensionamiento

El caudal de agua es el mismo que el procedente de AC-101, aproximadamente 864 m<sup>3</sup>/h.

Aplicando un 10% de margen:

$$V_D = 864 \cdot 1,10 = 950 \frac{\text{m}^3}{h}$$

Se mantienen 4 trenes:

$$V_{train} = \frac{950}{4} = 237,5 \frac{\text{m}^3}{h}$$

Por lo que se selecciona:

$$V_{train} = 240 \frac{\text{m}^3}{h}$$

Se adopta una velocidad espacial de 30 BV/h, rango típico para el pulido de agua desmineralizada, DuPont indica velocidades entre 20-50 BV/h con profundidades de lecho entre 0,9 y 1,6 m.

Por tanto:

$$SV = Q/V_R$$

Por lo que el volumen del lecho:

$$V_R = \frac{240}{30} = 8 \text{ m}^3$$

Para los 4 trenes:

$$V_{R\text{TOTAL}} = 4 \cdot 8 = 32 \text{ m}^3$$

La cantidad de resina seguirá pendiente de la carga iónica real:

$$m_R = \frac{C_i \cdot V \cdot t_c}{q_R}$$

No se procederá al cálculo del dimensionamiento del ion-exchanger, se calculará en la ingeniería de detalle.

### 9.5.7 Dimensionamiento y especificación técnica de P-101 A/B

Las bombas deben restaurar el caudal de circulación después de incorporar el make-up:

$$Q_N = 864 \frac{m^3}{h} = 0,240 \frac{m^3}{s}$$

La configuración será 2x100% con una bomba operativa y otra de reserva. Manteniendo provisionalmente un salto de presión de 10 bar.

La potencia hidráulica será:

$$P_h = Q \cdot \Delta P$$

$$P_h = 0,240 \cdot 10^6 = 240 \text{ kW}$$

Tomando como rendimiento el 82% y un rendimiento mecánico del 96% la potencia eléctrica será:

$$P_{el} = \frac{P_h}{\eta_p \cdot \eta_m} = \frac{240}{0,82 \cdot 0,96} = 305 \text{ kW}$$

Aplicando un margen del 10%

$$P_{motor,min} = 1,10 \cdot 305 = 336 \text{ kW}$$

Se selecciona una bomba con una potencia de:

$$P_{motor} = 355 \text{ kW}$$

Los 10 bar incremento de presión es una base preliminar de pérdida de carga total del stack, del separador de O<sub>2</sub>, del air-cooler, del ion-exchanger, tuberías válvulas etc.

## 9.6 Dimensionamiento y especificación de HY-100 - Sistema de acondicionamiento de hidrógeno

La corriente procedente del electrolizador contiene mayoritariamente hidrógeno y una determinada cantidad de humedad, por lo que es fundamental realizar la separación de agua condensada.

La presión de salida del hidrógeno MC4000 es de 30 barg.

### 9.6.1 V-102 – Separador H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O

V-102 recibe la corriente de hidrógeno procedente del lado catódico del stack y elimina el agua líquida arrastrada antes de las etapas posteriores.

#### 9.6.1.1 Dimensionamiento

Para obtener el caudal volumétrico real se utiliza:

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2} \cdot Z \cdot R \cdot T}{P}$$

Donde:

- T: 343,15 K
- P: 31 bar(a)=3.100 kPa
- Z=1
- $n_{H_2}$ : 175,6 kmol
- R: 8,314  $\frac{kPa \cdot m^3}{kmol \cdot K}$

$$V_{H_2} = \frac{175,6 \cdot 1 \cdot 8,314 \cdot 343,15}{3.100} = 161,5 \text{ m}^3/h$$

Aunque el volumen es bastante elevado, a 30 barg el volumen real manejado por el separador es reducido.

Para dimensionar un separador gas-líquido se utilizará el procedimiento de cálculo de Souders-Brown, para obtener la velocidad máxima admisible de gas:

$$v_g = K \cdot \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}}$$

Donde:

- $K$ : Factor de Souders-Brown.
- $\rho_L$ : Densidad del agua.
- $\rho_G$ : Densidad del gas (hidrógeno)

A 70 °C y 31 bar(a) la densidad del hidrógeno es:

$$\rho_{H_2} = \frac{P M}{Z R T}$$

$$\rho_{H_2} = \frac{3.100 \cdot 2,016}{8,314 \cdot 343,15} = 2,19 \text{ kg/m}^3$$

Para el agua a 70°C:

$$\rho_{H_2O} = 978 \text{ kg/m}^3$$

Para separadores verticales se adopta los valores de GPSA de 0,097 m/s, por lo que la ecuación se resolvería:

$$v_{g,max} = 0,097 \cdot \sqrt{\frac{978 - 2,19}{2,19}} = 2,05 \text{ m/s}$$

Suponiendo un valor de velocidad por debajo de este, garantizamos la captación del agua. Se adopta por tanto 0,1 m/s.

En consecuencia, se adoptará un separador vertical suficiente para proporcionar capacidad de acumulación y separación del agua condensada:

$$161,5 \frac{\text{m}^3}{h} \cdot \frac{1h}{3.600s} = 0,0449 \frac{\text{m}^3}{s}$$

$$v_g = \frac{V_g}{A}$$

Por tanto:

$$A = \frac{0,0449}{0,1} = 0,449 \text{ m}^2$$

Con unas dimensiones aproximadas de:

- $D=0,8 \text{ m}$
- $H=2 \text{ m}$

El volumen cilíndrico correspondiente es:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H = \frac{\pi \cdot (0,8)^2}{4} \cdot 2 = 1,01 \text{ m}^3$$

## 9.6.2 E-102 – Heat Exchanger

### 9.6.2.1 Dimensionamiento

La corriente de hidrógeno que abandona los stacks y es separada en el separador de H<sub>2</sub>O es:

$$m_{H_2, E102} = 354 \frac{kg}{h} = 0,0983 \frac{kg}{s}$$

El hidrógeno debe enfriarse desde los 70 °C que sale del stack hasta los 20 °C, por tanto:

$$Q_{enfriador} = m_{H_2} \cdot C_p \cdot \Delta T$$
$$Q_{sensible} = 0,0983 \frac{kg}{s} \cdot 14,2 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 50 K = 69,8 kW$$

Como el contenido exacto de humedad que va con la corriente de hidrógeno no se puede saber se adopta un margen amplio sobre la carga sensible.

Se selecciona un 25% de margen:

$$Q_D = 1,25 \cdot 69,8 = 87 kW$$

Se selecciona:

$$HX - 101 = 90 kW_{th}$$

### 9.6.2.2 Caudal de agua fría

El PFD conceptual trabaja con agua de chiller aproximadamente entre 5-25 °C.

Por tanto, el salto térmico es de 20 °C.

El caudal másico requerido:

$$m_{wt} = \frac{Q_D}{C_{p,w} \cdot \Delta T_{cw}} = \frac{87}{4,18 \cdot 20} = 1,04 kg/s$$

Equivalente aproximadamente a 3,75 m<sup>3</sup>/h.

Por tanto, el circuito de chiller se dimensiona para 4 m<sup>3</sup>/h aproximadamente.

## 9.6.3 CH-101 – Chiller

### 9.6.3.1 Dimensionamiento

CH-101 suministra agua fría a HX-101.

La carga térmica mínima requerida es:

$$Q_{CH} = Q_{HX}$$
$$Q_{CH} = 87 kW$$

Aplicando un margen del 15% se selecciona un chiller de aproximadamente 100 kW.

La temperatura de impulsión será de 5 °C y la de retorno de 25 °C.

El caudal nominal es de 4 m<sup>3</sup>/h.

La potencia eléctrica requerida por el chiller será:

$$P_{CH} = \frac{Q_{cool}}{COP}$$

Donde:

- $P_{CH}$ : Potencia eléctrica del Chiller.

- $Q_{cool}$ : Carga frigorífica.
- $COP$ : Coeficiente de rendimiento del sistema frigorífico (Se adopta 3 ya que referencias lo sitúan entre 2,8 y 3,6).

Se define una potencia frigorífica de diseño de 100 kW, para un caudal de agua de 4 m<sup>3</sup>/h y con unas temperaturas de impulsión y retorno de 5 y 25 °C, respectivamente.

Por tanto:

$$P_{CH-101} = \frac{100}{3} = 33,3 \approx 35 \text{ kW}$$

#### 9.6.4 R-101 - Deoxidiser

El sistema de electrólisis incluye la etapa de desoxidación antes del secado.

El balance original representa aproximadamente una concentración de oxígeno de en la corriente de hidrógeno de 25 ppm, cuyo objetivo de dicho equipo es reducirla a 5ppm.

El caudal másico de hidrógeno producido es de 354 kg/h.

Calculando el caudal molar de hidrógeno se obtiene 175,6 kmol/h.

##### 9.6.4.1 Dimensionamiento

Para una concentración de O<sub>2</sub> de 25 ppm molar:

$$n_{O_2,in} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot n_{H_2}$$

$$n_{O_2,in} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 175,6 = 0,00439 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

En masa:

$$m_{O_2,in} = 0,00439 \cdot 32 = 0,140 \text{ kg/h}$$

A 5ppm de salida:

$$n_{O_2,out} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 175,6$$

En masa:

$$m_{O_2,out} = 0,028 \text{ kg/h}$$

Por tanto, el oxígeno eliminado es:

$$m_{O_2,eliminado} = 0,140 - 0,028 = 0,112 \text{ kg/h}$$

##### 9.6.4.1.1 Consumo de hidrógeno

Por estequiometría:

$$32 \text{ kg } O_2 \leftrightarrow 4 \text{ kg } H_2$$

Por tanto:

$$m_{H_2,consumido} = m_{O_2,consumido} \cdot \frac{4}{32}$$

$$m_{H_2,consumido} = 0,112 \cdot 0,125 = 0,014 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Despreciable frente a los 354 kg/h producidos.

##### 9.6.4.1.2 Agua generada

Por estequiometría:

$$32 \text{ kg } O_2 \leftrightarrow 36 \text{ kg } H_2$$

Por tanto:

$$m_{H_2O \text{ consumido}} = 0,112 \cdot \frac{36}{32} = 0,126 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Esta agua será posteriormente eliminada en el proceso de secado.

#### 9.6.4.1.3 Volumen catalítico

En FEED el tamaño del reactor puede estimarse a través de la velocidad espacial:

$$GHSV = \frac{V_{gas,N}}{V_{cat}}$$

Donde:

- $V_{gas,N}$ : Caudal volumétrico del gas en condiciones normales (C.N)
- $V_{cat}$ : Volumen ocupado por el lecho catalítico.

El caudal normal de  $H_2$  es aproximadamente:

$$V_{H_2,N} = 175,6 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} H_2 \cdot 22,414 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} = 3.936 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Adoptando una velocidad espacial de:

$$GHSV = 10.000 \text{ h}^{-1}$$

El volumen mínimo de catalizador será:

$$V_{cat} = \frac{3.936}{10.000} = 0,394 \text{ m}^3$$

Aplicando un margen del 25%:

$$V_{cat,D} = 1,25 \cdot 0,394 = 0,49 \approx 0,5 \text{ m}^3$$

Para un reactor vertical de un diámetro de 0,7 m.

$$A = \frac{\pi \cdot (0,7)^2}{4} = 0,385 \text{ m}^2$$

La altura del lecho sería:

$$H_{lecho} = \frac{0,5}{0,385} = 1,30 \text{ m}$$

Con espacio para distribuidores y soportes se adopta:

$$H_{reactor} = 2 \text{ m}$$

### 9.6.5 Dimensionamiento de DR-101 A/B – Sistema de secado de hidrógeno

El sistema DR-101 A/B tiene como función eliminar la humedad residual presente en la corriente de hidrógeno después del enfriamiento, separación de condensados y eliminación de oxígeno.

Se adopta un sistema de adsorción regenerativa de doble torre, de forma que una torre permanezca en adsorción mientras la segunda se regenera.

Corriente de diseño:

- $m_{H_2} = 354 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$
- $P = 30 \text{ barg}$
- $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Se establece como especificación de salida una concentración de agua por debajo de 5ppm.

$$H_2O \leq 5ppm$$

### 9.6.5.1 Dimensionamiento

#### 9.6.5.1.1 Humedad del hidrógeno a la entrada

Después del enfriamiento hasta 20 °C aproximadamente, se considera que el hidrógeno que abandona el separador de condensados se encuentre saturado de vapor de agua.

La presión de vapor del agua a 20 °C es de 2,34 kPa.

La presión total del gas es 31 bar o 3.100 kPa.

La fracción molar de vapor de agua mediante la ley de Dalton de las presiones parciales:

$$y_{H_2O} = \frac{P_{sat,H_2O}}{P}$$
$$y_{H_2O} = \frac{2,34}{3.100} = 7,55 \cdot 10^{-4} \approx 755 \text{ ppmv}$$

El caudal molar de hidrógeno es 175,6 kmol/h.

El caudal molar de vapor de agua asociado será aproximadamente:

$$n_{H_2O} = n_{H_2} \cdot \frac{y_{H_2O}}{1 - y_{H_2O}} = 175,6 \cdot \frac{7,55 \cdot 10^{-4}}{1 - 7,55 \cdot 10^{-4}} = 0,133 \frac{kmol}{h}$$

Por tanto:

$$m_{H_2O} = 0,133 \cdot 18 = 2,39 \text{ kg/h}$$

#### 9.6.5.1.2 Agua generada en R-101

El deoxidiser genera adicionalmente, como se pudo ver 0,126 kg/h de agua.

Por tanto, la humedad total que se debe considerar en el dryer es de:

$$m_{H_2O,in} = 2,39 + 0,126 = 2,52 \text{ kg/h}$$

#### 9.6.5.1.3 Humedad residual a la salida

Como la concentración de agua al final del dryer debe ser menor a 5 ppm:

$$y_{H_2O,out} = 5 \cdot 10^{-6}$$

El caudal molar residual:

$$n_{H_2O,out} = 175,6 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 8,78 \cdot 10^{-4} \frac{kmol}{h}$$

En masa:

$$m_{H_2O,out} = 8,78 \cdot 10^{-4} \cdot 18 = 0,016 \frac{kg}{h}$$

La cantidad que debe adsorberse será, por tanto:

$$m_{H_2O,ads} = 2,52 - 0,016 = 2,50 \frac{kg}{h}$$

#### 9.6.5.1.4 Ciclo de adsorción

Se adopta un ciclo de adsorción de 8h.

La cantidad de agua adsorbida durante un ciclo será de:

$$m_{H_2O,ciclo} = 2,50 \cdot 8 = 20 \text{ kg}$$

#### 9.6.5.1.5 Masa de adsorbente

Se selecciona un matiz molecular con material adsorbente.

Para un cálculo preliminar se adopta una capacidad útil conservadora del 10%, es decir:

$$0,10 \text{ kg} \frac{H_2O}{kg_{adsorbente}}$$

La masa mínima requerida será:

$$m_{ads,min} = \frac{m_{H_2O,ciclo}}{q_{ads}} = \frac{20}{0,10} = 200 \text{ kg}$$

Aplicando un margen del 25% de envejecimiento, pérdidas progresivas etc:

$$m_{ads,D} = 1,25 \cdot 200 = 250 \text{ kg}$$

Para mantener una elección conservadora y comercial se elige:

$$m_{ads} = 300 \text{ kg}$$

Por tanto, el sistema dispone de 2x300 kg de tamiz molecular.

#### 9.6.5.1.6 Volumen del lecho

Adoptando una densidad aparente aproximada del adsorbente de 650 kg/m<sup>3</sup>, el volumen del lecho requerido será de:

$$V_{bed} = \frac{m_{ads}}{\rho_{ads}} = \frac{300}{650} = 0,46 \text{ m}^3$$

Se adopta:

$$V_{bed} = 0,5 \text{ m}^3$$

#### 9.6.5.1.7 Diámetro de cada torre

El caudal real de hidrógeno a aproximadamente 20 °C y 31 bar(a) será:

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2} \cdot R \cdot T}{P}$$
$$V_{H_2} = \frac{175,6 \cdot 8,314 \cdot 293,15}{31.000} = 138 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \approx 0,0383 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Para limitar la velocidad superficial en el lecho se adopta una velocidad de 0,10 m/s.

Por tanto, el área mínima:

$$A = \frac{V}{v_s} = \frac{0,0383}{0,10} = 0,383 \text{ m}^2$$

El diámetro:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,383}{\pi}} = 0,70 \text{ m}$$

#### 9.6.5.1.8 Altura del lecho

Para un volumen de lecho de 0,5 m<sup>3</sup>.

$$A = \frac{\pi \cdot (0,7)^2}{4} = 0,385 \text{ m}^2$$

La altura del adsorbente sería:

$$H_{lecho} = \frac{0,5}{0,385} = 1,30 \text{ m}$$

Añadiendo espacio para espacio libre, boquillas, distribuidor etc se adopta una altura total preliminar de:

$$H_{vessel} = 2,5 \text{ m}$$

#### 9.6.5.1.9 Regeneración

Después de la adsorción se produce la regeneración del adsorbente.

Se adopta una temperatura de regeneración de 200 °C mediante una corriente de hidrógeno seco caliente o circuito de regeneración cerrado.

Por tanto, se selecciona un heater de regeneración de 20 kW.

El dryer DR-101 A/B incluye un filtro de partículas aguas abajo, cuya función de retener los posibles finos del matiz moléculas que son arrastrados durante la operación y los ciclos de regeneración. Este filtro se considera dentro del Package del dryer y no como equipo independiente en el PFD.

$$Filtración = 5 \mu m$$

$$\Delta P_{filtro,limpio} < 0,1 \text{ bar}$$

### 9.6.6 Dimensionamiento y especificación técnica de Tanque buffer H<sub>2</sub>

El tanque buffer tiene como objetivo desacoplar hidráulicamente el HY-100 del CP-100, absorbiendo pequeñas diferencias entre la producción del electrolizador y la aspiración del compresor.

El buffer aporta solo un tiempo de autonomía a una presión de 30 barg aproximadamente.

#### 9.6.6.1 Dimensionamiento

El caudal de hidrógeno es de 354 kg/h y la presión de operación es de 30 barg (31 bara).

##### 9.6.6.1.1 Tiempo de buffer

Como hipótesis se adopta 15 min (0,25 h) de almacenamiento, ya que la función principal de dicho almacenamiento es absorber posibles efectos transitorios, cambios de capacidad o pequeños desajustes operativos.

$$m_{H_2,buffer} = 354 \cdot 0,25 = 88,5 \text{ kg}$$

Por tanto, el recipiente deberá albergar una capacidad de 88,5 kg de H<sub>2</sub>.

##### 9.6.6.1.2 Volumen del recipiente

El número de kilomoles de hidrógeno es:

$$n_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} = \frac{88,5}{2,016} = 43,9 \text{ kmol } H_2$$

Para el cálculo del volumen:

$$P \cdot V = Z \cdot n_{H_2} \cdot R \cdot T$$

Se adopta una temperatura de almacenamiento de 293,15 K, el factor de compresibilidad,  $z=1,01$  y la presión de operación 31 bara.

$$V_{\text{útil}} = \frac{1,01 \cdot 43,90 \cdot 8,314 \cdot 293,15}{3100} = 34,8 \text{ m}^3$$

Aplicamos un 20% para disponer de margen:

$$V_D = 1,20 \cdot 34,8 = 41,8$$

Se selecciona un volumen nominal:

$$V_{buffer} = 45 \text{ m}^3$$

#### 9.6.6.1.3 Geometría preliminar

Se utilizará un recipiente cilindro horizontal a presión.

El diámetro interior aproximado será de 2,4 m.

La longitud cilíndrica se obtiene mediante:

$$L = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 45}{\pi \cdot (2,4)^2} = 9,95 \text{ m}$$

Por tanto, se adopta preliminarmente:

$$D = 2,4 \text{ m}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

El volumen cilíndrico resultante es:

$$V = \frac{\pi \cdot (2,4)^2}{4} \cdot 10 = 45,2 \text{ m}^3$$

#### 9.6.6.1.4 Presiones de diseño

La condición normal será:

$$P_{op} = 30 \text{ barg}$$

Para esta fase se adopta una presión preliminar de diseño mecánica de:

$$P_D = 36 \text{ barg}$$

La presión mínima de operación deberá mantener alta para dar una aspiración estable a CP-100, por lo que se debería de operar en una banda operativa entre 25 y 30 barg.

## 9.7 Dimensionamiento y especificación de CP-100 – Sistema de compresión de hidrógeno

El sistema de compresión tiene como objetivo elevar la presión del hidrógeno seco desde el buffer a 30 barg hasta el almacenamiento final.

Base de diseño:

- $m_{H_2,N} = 354 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$
- $P_{suc} = 30 \text{ barg}$
- $P_{desc} = 350 \text{ barg}$
- $T_{suc} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

### 9.7.1 Dimensionamiento

Para el caudal de diseño se tomará un margen de 10% sobre la producción nominal:

$$m_D = 354 \cdot 1,10 = 389,4 \approx 390 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

### 9.7.1.1 Relación de compresión

Se tienen las siguientes presiones absolutas de trabajo:

$$P_1 = 31 \text{ bara}$$

$$P_2 = 351 \text{ bara}$$

La relación total de compresión:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{351}{31} = 11,32$$

Como es una relación demasiado elevada, la compresión se realizará en 3 etapas con refrigeración intermedia.

$$r_{p,et} = r_p^{1/3}$$

$$r_{p,et} = 11,32^{1/3}$$

$$r_{p,et} = 2,25$$

Las presiones quedan aproximadamente:

| Punto      | Presión |
|------------|---------|
| Aspiración | 30      |
| Etapas 1   | 69      |
| Etapas 2   | 155     |
| Etapas 3   | 350     |

Tabla 55. Etapas de compresión

La selección del compresor debe ser un equipo que trabaje con hidrógeno de alta pureza por lo que se elegirá un compresor alternativo oil-free.

$$C_1 \rightarrow IC_1 \rightarrow C_2 \rightarrow IC_2 \rightarrow C_3 \rightarrow AC$$

### 9.7.1.2 Temperatura de descarga por etapa

La temperatura isentrópica se calcula mediante:

$$T_{2s} = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Adoptando:

$$k = 1,405$$

$$T_1 = 308,15 \text{ K}$$

$$r_{p,et} = 2,25$$

Se obtiene:

$$T_{2s} = 389,3 \text{ K}$$

Para una eficiencia isentrópica preliminar:

$$\eta_{is} = 0,75$$

La temperatura real de descarga se calcula mediante:

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{is}}$$

Resultando:

$$T_2 = 416,35 - 273,15 \approx 143 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Esto nos indica que la refrigeración intermedia es necesaria, por lo que después de cada intercooler se establece una temperatura de 35 °C, por lo que cada etapa se iniciará con las mismas condiciones térmicas.

### 9.7.1.3 Potencia del compresor

La constante específica del hidrógeno es:

$$R_{H_2} = 4,124 \frac{kJ}{kg \text{ } K}$$

Para tres etapas con refrigeración intermedia, el trabajo específico puede obtenerse aproximadamente mediante:

$$w = N \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R_{H_2} \cdot T_1 \cdot \frac{\left(r_{P,et}^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{\eta_{is}}$$

Sustituyendo:

$$N = 3$$

$$k \text{ (coeficiente adiabático)} = 1,405$$

$$r_{P,et} = 2,25$$

$$\eta_{is} = 0,75$$

Se obtiene un trabajo específico:

$$w = 4,63 \frac{MJ}{kg} \approx 1,29 \frac{kWh}{kg \text{ } H_2}$$

Para el caudal de diseño:

$$P_D = 390 \cdot 1,29 = 502 \text{ } kW$$

Con un margen del 10%:

$$P_{motor,min} = 502 \cdot 1,10 = 552 \text{ } kW$$

Por lo que se selecciona un compresor de:

$$P_{motor} = 560 \text{ } kW$$

### 9.7.1.4 Refrigeración intermedia

Después de cada etapa intermedia se enfría de 143 °C a 35 °C, por lo que el salto térmico es de:

$$\Delta T = 108 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La capacidad de diseño:

$$m_D = \frac{390}{3600} = 0,1083 \frac{kg}{s}$$

Tomando:

$$C_{p,H_2} = 14,3 \text{ } kJ/(kg \text{ } K)$$

La carga aproximada por enfriador será:

$$Q_{IC} = m_D \cdot C_{p,H_2} \cdot \Delta T$$

$$Q_{IC} = 0,1083 \cdot 14,3 \cdot 108 = 167 \text{ kW}$$

Se adopta por intercambiador:

$$Q_{IC,D} = 175 \text{ kW}$$

Por tanto:

$$IC_1 = 175 \text{ kW}_{th}$$

$$IC_2 = 175 \text{ kW}_{th}$$

Y para el aftercooler:

$$AC = 175 \text{ kW}_{th}$$

La capacidad total aproximada de refrigeración será:

$$Q_{cool \text{ total}} = 3 \cdot 175 = 525 \text{ kW}_{th}$$

#### 9.7.1.5 Configuración y redundancia

Se contempla la necesidad de una configuración 2x50% para proporcionar mayor flexibilidad, seguridad y permite realizar mantenimientos sin parar la producción.

Por tanto, cada tren deberá manejar:

$$m_{train} = \frac{354}{2} = 177 \frac{kg}{h}$$

Considerando margen:

$$m_{train,D} = 195 \frac{kg}{h}$$

La potencia de cada tren:

$$P_{train} = \frac{560}{2} = 280 \text{ kW}$$

## 9.8 Dimensionamiento y especificación de ST-100 – Sistema de almacenamiento de hidrógeno

Consideraciones de operación:

$$m_{H_2} = 354 \frac{kg}{h} H_2$$

$$P_{st,in} = 350 \text{ barg}$$

Se establece un tiempo de almacenamiento de 8 h:

$$t_{alm} = 8 \text{ h}$$

### 9.8.1 Dimensionamiento

La masa de hidrógeno que se almacenará como máximo en las 8 h es:

$$m_{alm,H_2} = 354 \cdot 8 = 2.832 \text{ kg } H_2$$

### 9.8.2 Volumen requerido a 350 barg

A esta presión no resulta adecuado utilizar la ecuación de los gases ideales, por lo que se añade el factor de compresibilidad:

$$\rho_{H_2} = \frac{P \cdot PM_{H_2}}{Z \cdot R \cdot T}$$

El número de kilomoles almacenados es:

$$n_{alm,H_2} = \frac{m_{alm,H_2}}{PM_{H_2}} = \frac{2.832}{2,016} = 1.404,8 \text{ kmol } H_2$$

Se almacena a una temperatura de 20 °C, con una presión de 351 bara, atendiendo a un factor de compresibilidad de 1,17 dando lugar a dicha ecuación de estado (Leachman et al. 2009):

$$\rho_{H_2} = \frac{P \cdot PM_{H_2}}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{35.100 \cdot 2,016}{1,17 \cdot 8,314 \cdot 293,15} = 24,8 \text{ kg/m}^3$$

### 9.8.3 Densidad del H<sub>2</sub> a presión mínima

La presión mínima del hidrógeno será de 30 barg o 31 bara:

$$\rho_{H_2,min} = \frac{P \cdot PM_{H_2}}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{3.100 \cdot 2,016}{1,17 \cdot 8,314 \cdot 293,15} = 2,54 \text{ kg/m}^3$$

### 9.8.4 Capacidad útil

El hidrógeno realmente disponible durante la descarga será de:

$$\Delta\rho_{H_2} = \rho_{H_2,max} - \rho_{H_2,min} = 24,8 - 2,54 = 22,26 \text{ kg/m}^3$$

Por tanto, el volumen interno mínimo será:

$$V_{min} = \frac{m_{H_2,requ}}{\Delta\rho_{H_2}} = \frac{2.832}{22,26} = 127,2 \text{ m}^3$$

El margen de diseño será del 10%:

$$V_D = 127,2 \cdot 1,10 = 139,9 \approx 140 \text{ m}^3$$

### 9.8.5 Comprobación de la capacidad de almacenamiento

A 350 barg:

$$m_{max} = \rho_{max} \cdot V = 24,8 \cdot 140 = 3.472 \text{ kg}$$

Cuando la presión disminuye a 30 barg:

$$m_{min} = \rho_{min} \cdot V = 2,54 \cdot 140 = 356 \text{ kg}$$

La capacidad útil del recipiente será de:

$$m_{\text{útil}} = m_{max} - m_{min} = 3.472 - 356 = 3.116 \text{ kg}$$

Como:

$$3.116 \text{ kg} > 2.832 \text{ kg}$$

El recipiente cumple con la capacidad requerida.

La autonomía efectiva será entonces de:

$$t_{ef} = \frac{3.116 \text{ kg}}{354 \text{ kg/h}} = 8,8 \text{ h}$$

### 9.8.6 Geometría del recipiente

Al tratarse de un recipiente de gran volumen a presión se adopta una configuración de un recipiente esférico, donde se volumen se calcula mediante:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

Despejando el radio:

$$r = \left( \frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi} \right)^{1/3} = \left( \frac{3 \cdot 140}{4 \cdot \pi} \right)^{1/3} = 3,22 \text{ m}$$

Por tanto, el diámetro interior será:

$$D_{in} = 3,22 \cdot 2 = 6,44 \approx 6,5 \text{ m}$$

## 10

## P&ID Y LAYOUT

Los diagramas P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) son representaciones gráficas utilizadas en la ingeniería para mostrar la disposición de los equipos, tuberías, instrumentación y otros elementos en un sistema industrial o de procesos (International Organization for Standardization, 2014).

Estos diagramas proporcionan información detallada sobre cómo funciona un sistema de proceso, mostrando las interconexiones entre los diversos componentes.

En un diagrama P&ID, se utilizan símbolos estandarizados para representar equipos como bombas, compresores, intercambiadores de calor, reactores, columnas de destilación, tanques, entre otros. También se utilizan símbolos para representar instrumentos de medición, control y seguridad, como transmisores de presión, controladores de temperatura, válvulas de control, alarmas y sistemas de seguridad (International Society of Automation, 2024).

Los diagramas P&ID muestran la dirección del flujo de los fluidos a través de las tuberías, utilizando líneas y flechas para indicar el movimiento del material o el flujo de energía. También se incluyen etiquetas y números de línea para identificar y rastrear los diferentes equipos y tuberías en el sistema.

Estos diagramas son importantes para la comprensión del diseño y la operación de los sistemas de proceso. Permiten a los ingenieros y técnicos identificar y comprender las relaciones entre los componentes, los puntos de medida y control, así como los flujos de materiales y energía dentro del sistema. También son útiles para la planificación de la seguridad, la optimización del proceso y la solución de problemas.

En el caso de los electrolizadores, los diagramas P&ID se utilizarían para representar la disposición de los componentes relacionados con la electrólisis del agua, como el electrolizador en sí, los sistemas de suministro de agua y electricidad, los sistemas de control y seguridad, y las tuberías de entrada y salida de hidrógeno, oxígeno y agua.

A continuación, se muestra el PYID del proceso de electrólisis (plano anexado en el apartado Anexos).

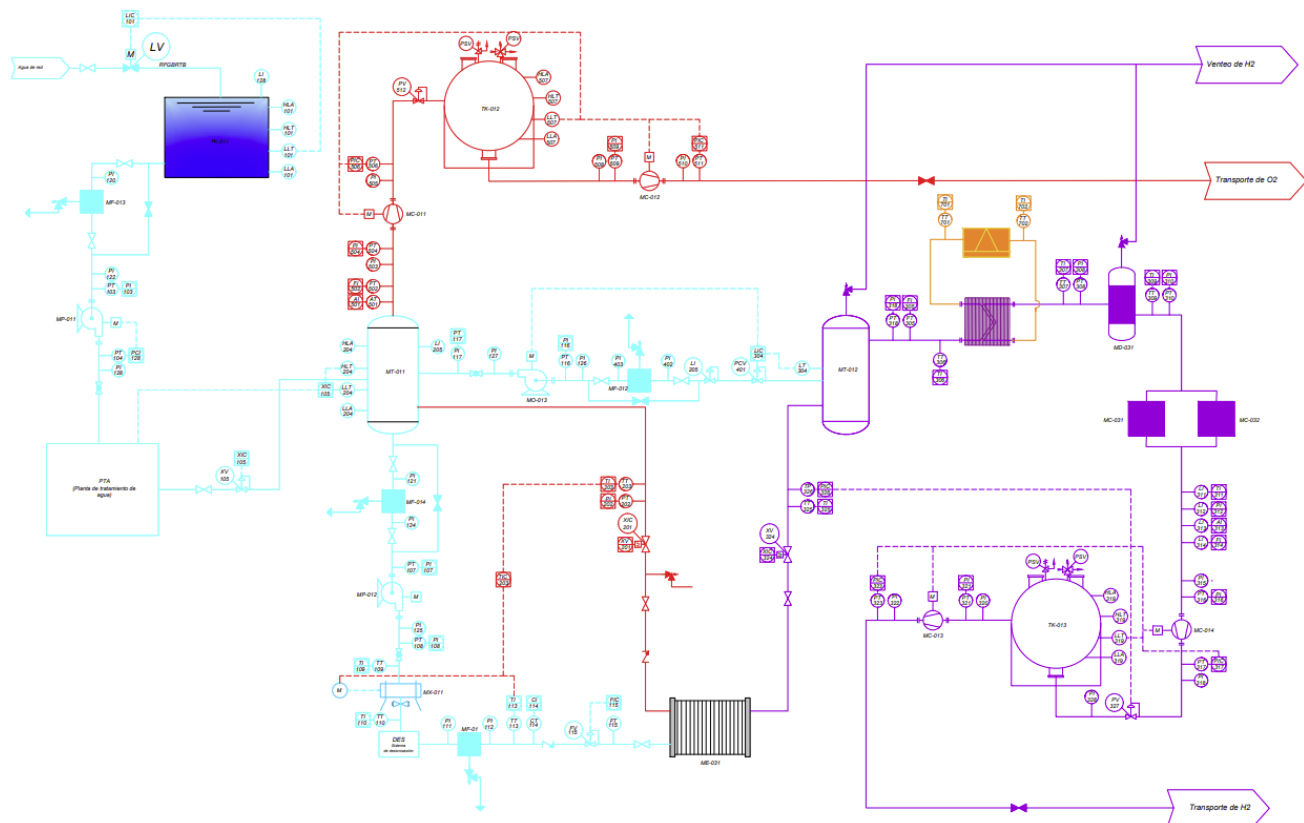


Ilustración 15. PYID del proceso.

El plano completo y detallado del PYID se recoge en el anexo 13.2 donde se podrá observar con mayor detalle tanto el plano como la leyendo de equipos e instrumentación utilizada.

Comenzando por el lado derecho del plano el agua procedente de la red llena el tanque para su acumulación. Dicho tanque cuenta con 4 sensores de nivel que activan el controlador indicador de nivel que corta o abre la válvula automática.

Antes de la entrada a la planta de tratamiento de agua, el retorno de agua del separador de hidrógeno y antes de la entrada de agua al electrolizador, la línea de agua pasa a través de un filtro para eliminación de impurezas, dicho filtro presenta un indicador de presión que comunica el llenado total del filtro y un alivio de presión, así como un bypass para su intercambio cuando sea necesario.

Tanto las bombas centrífugas para impulsar el agua como los compresores para comprimir los gases como el hidrógeno y oxígeno están equipadas por indicadores y sensores de presión antes y después de esta con el objetivo de cortar, activar y regular la presión de la bomba a través del nivel de presión indicado en la línea. También se encuentran equipadas con válvulas de regulación manual que regular el caudal y la presión de la línea.

En cuanto al separador de oxígeno que sirve también de acumulador de agua de retorno del electrolizador, se encuentra equipado de sensores de nivel conectados a un controlador indicador de nivel a su vez conectado con la unidad de tratamiento de agua para regular la entrada de agua al separador de oxígeno (tanque de acumulación de agua).

Los tanques de almacenamiento de oxígeno e hidrógeno cuentan con sensores de nivel, así como válvulas de alivio de presión (PSV) y válvulas de presión de vacío (PW) atendiendo al Reglamento de Equipos a Presión (REP) que satisfacen la seguridad del sistema. Los sensores de nivel están enlazados con un lógico de control de manera que active o desactive el compresor para el vaciado o llenado del tanque.

Los intercambiadores de calor y los chiller presentan sensores de temperatura antes y después con la finalidad de conocer el salto térmico en el equipo, sensores de presión para saber la pérdida de carga en el equipo e indicadores de flujo con la finalidad de saber la cantidad de flujo que intercambia calor.

## 10.1 Layout de la planta

El layout de una planta industrial, en este caso referido a una planta de producción de hidrógeno verde, se refiere a la disposición física de todos los elementos que componen la planta, como áreas, equipos. Es muy importante el diseño espacial y la forma de cómo se distribuyen los recursos, almacenes, oficinas, así como otros componentes en el espacio disponible de la planta.

El objetivo principal del diseño del layout es maximizar la eficiencia de la planta, minimizando las distancias y optimizando los flujos de materiales y coordinación entre diferentes áreas y equipos. También es primordial contemplar aspectos de seguridad, como normativas aplicables para garantizar un entorno seguro para el buen funcionamiento de la planta.

El layout preliminar de la planta se adjunta a continuación (anexo 13.7), dando lugar a un área para la planta de hidrógeno de aproximadamente 3,26 Ha (suponiendo toda la zona interior de la carretera).

# 11 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

---

## 11.1 Objetivo y metodología de evaluación

El objetivo de este capítulo es determinar la viabilidad del proyecto definida en los capítulos anteriores, considerando conjuntamente la inversión inicial, los costes de operación y mantenimiento, la producción anual de hidrógeno y los ingresos asociados a su comercialización.

La evaluación se desarrolla a nivel FEED, por lo que los resultados económicos deben interpretarse como una estimación preliminar orientada a la toma de decisiones y no como una valoración financiera definitiva de inversión (AACE International, 2020).

La metodología seguida integra un caso base de operación: maximizar la producción de hidrógeno mediante recurso eléctrico de la planta fotovoltaica e importación de la red eléctrica cuando sea necesario.

En primer lugar, se realiza una evaluación técnica, en la que se determinarán para cada escenario:

- energía fotovoltaica generada
- energía destinada al electrolizador
- energía importada de la red
- horas equivalentes de funcionamiento
- producción anual de hidrógeno
- utilización del electrolizador
- utilización de los sistemas de compresión y almacenamiento
- energía no aprovechada, cuando exista.

Posteriormente, estos resultados se utilizarán como entrada de la evaluación económica, mediante la estimación de CAPEX, OPEX, LCOH, VAN, TIR y PAYBACK.

Finalmente, se realizará un análisis de sensibilidad sobre las principales variables económicas que presenten mayor incertidumbre sobre la rentabilidad del proyecto. Se estudiará principalmente la influencia del precio de venta del hidrógeno, el coste de adquisición de electricidad de red, el CAPEX total de la instalación y la tasa de descuento.

## 11.2 Estrategia de operación adoptada

La evaluación técnica y económica de la planta se realiza considerando un escenario de operación cuyo objetivo es maximizar la producción anual de hidrógeno y el factor de utilización del electrolizador.

La potencia eléctrica disponible para producción de hidrógeno en cada instante puede expresarse como:

$$P_{EL} = P_{FV} + P_{red}$$

Respetando siempre la potencia máxima del electrolizador:

$$P_{EL} \leq P_{EL,nom}$$

La generación fotovoltaica se destina en primer lugar al consumo de la planta. Cuando ésta no sea suficiente para mantener el régimen de operación establecido, podrá utilizarse electricidad procedente de la red.

De esta forma, la prioridad energética será:

$$FV \rightarrow \text{Producción de } H_2 \leftarrow \text{Red como apoyo}$$

La importación de electricidad puede expresarse como:

$$P_{imp} = \max(0, P_{dem} - P_{FV})$$

Donde  $P_{dem}$  representa la demanda eléctrica total de la instalación.

Este escenario proporcionará previsiblemente una mayor producción anual de hidrógeno y un mayor factor de utilización del electrolizador, aunque también podrá presentar un mayor coste de electricidad debido a la importación desde la red.

## 11.3 Bases e hipótesis económicas

La evaluación económica requiere establecer unas bases para el escenario analizado. Estas hipótesis constituyen la Economic Design Basis del proyecto y se mantendrán constantes para determinar el VAN, TIR, LCOH y Payback.

Los valores adoptados en este apartado tienen carácter preliminar FEED. Aquellas variables económicas serán sometidas posteriormente a análisis de sensibilidad con el objetivo de evaluar su influencia sobre la rentabilidad del proyecto.

### 11.3.1 Economic Design Basis

| Parámetro                    | Caso Base                | Tipo           |
|------------------------------|--------------------------|----------------|
| Año monetario                | 2026                     | DB económica   |
| Horizonte del Proyecto       | 25 años                  | ASS            |
| Tasa de descuento            | 8 %                      | ASS            |
| Moneda                       | €                        | Base de diseño |
| Inflación general            | No considerada           | Metodología    |
| Precio H <sub>2</sub> base   | 6 €/kg H <sub>2</sub>    | ASS            |
| Coste electricidad importada | 95 €/MWh                 | MITECO 2025    |
| Reposición STACK             | Según vida útil adoptada | REPEX          |

| Degradación FV          | A incluir                   | DB/vendor   |
|-------------------------|-----------------------------|-------------|
| Subvenciones            | 0 €                         | ASS         |
| Valor residual          | 0 €                         | ASS         |
| Financiación específica | No considerada inicialmente | Metodología |

Tabla 56. Economic Design Basis.

## 11.4 Estimación del CAPEX

El CAPEX (Capital Expenditure) representa la inversión necesaria para construir y poner en servicio la instalación. La estimación se realiza con un nivel de precisión propio de una fase FEED, utilizando el dimensionamiento desarrollado en el Capítulo 9 y costes específicos de referencia para los principales paquetes.

La estimación debe incluir tanto los costes directos de los equipos e instalaciones como los costes indirectos de ingeniería, construcción, puesta en marcha y contingencias.

Los valores deberán actualizarse posteriormente mediante ofertas presupuestarias de fabricantes. Esto es especialmente importante para EL-100: la IEA (International Energy Agency, s. f.) señala que los costes de sistemas de electrólisis instalados presentan una dispersión elevada según tecnología y alcance del suministro, y sitúa actualmente los sistemas PEM en torno a 2.450 USD/kW como referencia internacional, por lo que no resulta adecuado utilizar únicamente el precio del stack.

### 11.4.1 Costes directos

Se adoptan los siguientes costes preliminares.

#### 11.4.1.1 Planta FV

Para la fotovoltaica a gran escala en Europa, el coste total instalado medio ponderado de los proyectos de 2024 fue de 779 USD/kW, expresados en dólares de 2024 (International Renewable Energy Agency, 2025, p. 95, tabla 3.1).

Para mantener el modelo en euros de 2026 y evitar una falsa precisión derivada del tipo de cambio, se adopta como hipótesis FEED redondeada a 700€/kWp.

Por tanto, si la potencia fotovoltaica instalada definida en el proyecto es de 23 MWp el coste de la planta FV queda definido en:

$$C_{FV} = \frac{700\text{€}}{\text{kWp}} \cdot 23.000 \text{ kWp} = 16.100.000 \text{ €}$$

#### 11.4.1.2 Electrolizador EL-100

Para el sistema PEM de 20 MW se adopta un coste específico instalado preliminar de 1.200 €/kW tomando como referencia una publicación de Fuel Cells and Hydrogen para sistemas PEM (Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, 2017, p.6).

Por tanto:

$$C_{EL} = 20.000 \text{ kW} \cdot 1.200 \text{ €/kW} = 24.000.000 \text{ €}$$

### 11.4.2 Resto de unidades

Para las restantes unidades se adoptan costes FEED preliminares basados en la capacidad dimensionada:

| Unidad       | Base de diseño                               | CAPEX adoptado  |
|--------------|----------------------------------------------|-----------------|
| ELC-100      | Transformación, rectificación y distribución | 3,00 M€         |
| WT-100       | Agua + circuito térmico                      | 2,00 M€         |
| EL-100       | PEM 20 MW                                    | 24,00M€         |
| HY-100       | 354 kg H <sub>2</sub> /h                     | 1,50 M€         |
| CP-100       | 354 kg/h: 30 a 350 barg                      | 2,50 M€         |
| ST-100       | 2.832 kg H <sub>2</sub> @ 350 barg           | 4,50 M€         |
| OX-100       | Gestión básica de O <sub>2</sub>             | 0,50 M€         |
| UT-100       | SSAA                                         | 1,50 M€         |
| <b>TOTAL</b> |                                              | <b>39,50 M€</b> |

Tabla 57. CAPEX resto de unidades.

A continuación, se consideran conjuntamente tuberías, obra civil, estructuras, interconexiones y montaje mediante un factor del 15 %:

$$C_{inst} = 0,15 \cdot C_{H_2}$$

$$C_{inst} = 0,15 \cdot 39,50 = 5,93 \text{ M€}$$

Por tanto:

$$C_{dire,H_2} = 39,50 + 5,93 = 45,43 \text{ M€}$$

#### 11.4.3 Costes indirectos y contingencias

Se adopta un 10 % para ingeniería sobre el coste directo.

$$C_{ind} = 0.1 \cdot 45,43 = 4,54 \text{ M€}$$

La contingencia se aplica en un 15% y se aplica sobre el coste indirecto.

$$C_{cont} = 0,15 \cdot (45,43 + 4,54) = 7,50 \text{ M€}$$

#### 11.4.4 CAPEX total del proyecto

Por tanto, el CAPEX total del proyecto queda:

| Unidad        | CAPEX adoptado |
|---------------|----------------|
| <b>PV-100</b> | <b>16,1 M€</b> |
| ELC-100       | 3,00 M€        |
| WT-100        | 2,00 M€        |
| EL-100        | 24,00M€        |
| HY-100        | 1,50 M€        |

|                                                 |                 |
|-------------------------------------------------|-----------------|
| CP-100                                          | 2,50 M€         |
| ST-100                                          | 4,50 M€         |
| OX-100                                          | 0,50 M€         |
| UT-100                                          | 1,50 M€         |
| <b>Subtotal planta H<sub>2</sub></b>            | <b>57,47 M€</b> |
| Instalación, piping y obra civil H <sub>2</sub> | 5,93 M€         |
| Ingeniería y otros indirectos H <sub>2</sub>    | 4,54 M€         |
| Contingencia H <sub>2</sub>                     | 7,50 M€         |
| <b>CAPEX TOTAL</b>                              | <b>73,57 M€</b> |

Tabla 58. CAPEX total del proyecto.

Por tanto, el CAPEX total se calcula mediante:

$$CAPEX = C_{direc} + C_{ing} + C_{cont} = 73,57 \text{ M€}$$

## 11.5 Estimación del OPEX

El OPEX (Operating Expenditure) representa los costes necesarios para operar y mantener la instalación durante cada año de explotación. El OPEX dependerá de las horas de funcionamiento del electrolizador, la producción anual de hidrógeno y, especialmente, de la electricidad importada desde la red.

Se distinguirán dos componentes:

$$OPEX_{total} = OPEX_{fijo} + OPEX_{variable}$$

Los costes de sustitución de equipos de larga duración, como una eventual reposición de stacks, se tratarán posteriormente como REPEX y no como mantenimiento ordinario anual.

### 11.5.1 OPEX Fijo

Los costes fijos incluyen mantenimiento preventivo, inspecciones, personal, seguros, seguridad, gestión y otros costes que se producen con independencia directa de la cantidad anual de hidrógeno producido.

La IEA (International Energy Agency. (2024)) utiliza actualmente valores de referencia de OPEX anual de 19–30 USD/kW para electrolisis y 8–26 USD/kW para fotovoltaica, dependiendo del emplazamiento y de las condiciones económicas.

Para el presente FEED se adoptan valores redondeados dentro de estos órdenes de magnitud.

### 11.5.2 Coste mantenimiento Planta FV

Se adopta 15 €/kWp·año).

Por, tanto:

$$OPEX_{FV} = 23.000 \text{ kWp} \cdot \frac{15\text{€}}{\text{año}} = 345.000 \text{ €/año}$$

### 11.5.3 Coste mantenimiento Electrolizador

Se adopta 22 €/kW·año).

Por, tanto:

$$OPEX_{EL} = 20.000 \text{ kW} \cdot \frac{22\text{€}}{\text{año}} = 440.000 \text{ €/año}$$

### 11.5.4 OPEX resto de equipos del electrolizador (sin stack)

Se adopta preliminarmente un valor del 2% con respecto al CAPEX de la planta.

El CAPEX de estos equipos constituye 15,5 M€

Por tanto:

$$OPEX_{resto \text{ equipos}} = 0,02 \cdot 15,5 \text{ M€} = 0,310 \text{ M€/año}$$

### 11.5.5 Seguros y administración

Se adopta como hipótesis FEED un coste anual equivalente al 0,5 % del CAPEX total.

Para un CAPEX total del 73,57 M€ se obtiene:

$$OPEX_{seg} = 0,05 \cdot 73,57 \text{ M€} = 0,368 \text{ M€/año}$$

Adicionalmente se adopta una partida anual para seguridad, vigilancia, comunicaciones, inspecciones y servicios generales de:

$$OPEX_{serv} = 0,15 \text{ M€}$$

Por tanto, el OPEX fijo anual es de:

| Unidad                                                                   | OPEX adoptado  |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Planta fotovoltaica                                                      | 0,345 M€       |
| Electrolizador                                                           | 0,440 M€       |
| Resto de equipos                                                         | 0,310 M€       |
| Seguros y administración                                                 | 0,368 M€       |
| Seguridad, vigilancia, comunicaciones, inspecciones y servicios generale | 0,150 M€       |
| <b>TOTAL</b>                                                             | <b>1,61 M€</b> |

Tabla 59. OPEX fijo anual.

### 11.5.6 OPEX Variable

Los costes variables dependen directamente del funcionamiento anual de la planta. Los principales son electricidad importada, agua y consumibles.

#### 11.5.6.1 Electricidad importada

Este será previsiblemente el componente variable más importante, especialmente en el Escenario base.

El coste anual de electricidad se calculará mediante un precio medio de 95 €/MWh, basado en el orden de magnitud para grandes consumidores industriales (MITECO 2025).

La importación anual del caso de máxima producción es aproximadamente 147,8 GWh/año, lo que pertenece a la banda IF de consumidores no domésticos del MITECO. Para esa banda se establecen los siguientes precios:

- 89,8 €/MWh sin impuestos.
- 97,2 €/MWh sin IVA ni otros impuestos recuperables.
- 116,4 €/MWh con impuestos e IVA.

Se adopta por tanto 95 €/MWh, por lo que no se utiliza el precio del OMIE ya que los 63,04 €/MWh del mercado diario en 2024 es la componente mayorista, mientras que la instalación soporta un coste efectivo adicional de suministro.

#### 11.5.6.2 Consumo de agua

El consume de agua específico adoptado es de 15,9 L/kg H<sub>2</sub>.

El coste anual de agua se adopta preliminarmente 2,65 €/m<sup>3</sup> tomando como referencia la tarifa oficial de Aguas del Huesna para consumos industriales superiores a 18 m<sup>3</sup>/mes.

Por tanto, el coste específico de agua por kilogramo de H<sub>2</sub> será de:

$$C_{agua,H_2} = 0,0159 \frac{m^3}{kg H_2} \cdot 2,65 \frac{€}{m^3} = 0,0421 \frac{€}{kg H_2}$$

Se observa que el coste del agua será relativamente pequeño frente al coste energético de producción.

#### 11.5.6.3 Consumibles

En esta categoría se incluyen principalmente:

- filtros
- resinas
- consumibles del WTP
- desecantes
- lubricantes cuando correspondan
- reactivos
- pequeños repuestos

Se adopta preliminarmente 0,05 €/kg H<sub>2</sub>.

Por tanto:

$$C_{consumibles} = 0,05 \cdot m_{H_2}$$

#### 11.5.7 OPEX escenario base

| Partida                  | Escenario base |
|--------------------------|----------------|
| O&M PV-100               | 0,345 M€/año   |
| O&M EL-100               | 0,440 M€/año   |
| O&M resto de planta      | 0,310 M€/año   |
| Seguros y administración | 0,368 M€/año   |
| Servicios generales      | 0,150 M€/año   |

|                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| <b>OPEX Fijo</b>       | <b>1,61 M€/año</b> |
| Electricidad importada | 14,041 M€/año      |
| Agua                   | 0,131 M€/año       |
| Consumibles            | 0,155 M€/año       |
| <b>OPEX TOTAL</b>      | <b>A calcular</b>  |

Tabla 60. OPEX de los dos escenarios.

### 11.5.7.1 REPEX

La sustitución futura de stacks, inversores u otros componentes de vida útil inferior a 25 años no se incorpora dentro de los 1,61 M€/año de OPEX fijo.

Se contabilizará separadamente como:

$$REPEX_t$$

en el año correspondiente, ya que su tratamiento como una sustitución de capital permite obtener posteriormente un LCOH y un flujo de caja más coherentes.

Con este criterio podemos adoptar como OPEX fijo base del proyecto de 1,61 M€/año.

El stack presenta una vida útil de 80.000 h y con 8.760 h/año de funcionamiento del electrolizador se contempla la reposición del stack en:

$$\frac{80.000}{8760} = 9,13 \text{ años}$$

Por lo que se considera sustituciones alrededor de los años 10 y 19.

La REPEX será de 7,2 M€. Esta suposición se hace suponiendo que dicho coste es aproximadamente el 30% del CAPEX del paquete de electrólisis (0,3x24 M€), en consonancia con la referencia sacada de EPRI (2024) que adopta un coste del 31% respecto al CAPEX del paquete de electrólisis. Así mismo, FCHU 2 JU (2017, p.6) estima para un electrolizador PEM de 20 MW, un coste de reposición de 420 €/kW, igual a 8,40 M€, por lo que la hipótesis adoptada se considera adecuada.

## 11.6 Evaluación económica del escenario base

### 11.6.1 Escenario: Máxima producción de H<sub>2</sub>

En este escenario EL-100 funciona a plena capacidad durante todo el año y la red cubre la diferencia entre la demanda y la generación fotovoltaica.

La producción anual será:

$$m_{H_2,1} = 354 \cdot 8.760 = 3.101.040 \text{ kg/año}$$

La energía anual requerida por la planta es de 58,92 kWh/kg H<sub>2</sub>, que se simplifica a unos 60 kWh/ kg H<sub>2</sub>, debido a los consumos de auxiliares pendientes:

$$E_{planta,1} = m_{H_2,1} \cdot SEC_{planta} = 3.101.040 \frac{kg}{año} \cdot 60 \frac{kWh}{kg H_2} = 186.062 \text{ MWh/año}$$

La instalación FV produce 38.263,72 MWh/año. Por tanto, en el modelo anual equivalente:

$$E_{red,1} = E_{planta,1} - E_{FV}$$

$$E_{red,1} = 186.062 - 38.263,72 = 147.799 \text{ MWh/año}$$

La fracción renovable directa y la suministrada por la red son:

$$f_{FV,1} = \frac{38.263,72}{186.062} \cdot 100 = 20,6\%$$

$$f_{red,1} = 100 - 20,6 = 79,4\%$$

Las horas equivalentes de electrolizador son de 8.760 h/año con un factor de utilización de 100%.

### 11.6.2 Información técnica de escenario base

| Indicador                 | Escenario base    |
|---------------------------|-------------------|
| Producción FV             | 38.263,72 MWh/año |
| Demanda planta            | 186.062 MWh/año   |
| Importación de red        | 147.799 MWh/año   |
| Producción H <sub>2</sub> | 3.101 t/año       |
| Horas equivalentes        | 8760 h            |
| Factor de utilización     | 100 %             |
| Cobertura FV              | 20,6 %            |

Tabla 61. Comparación técnica de escenarios.

### 11.6.3 OPEX escenario base

El coste de la electricidad importada es:

$$C_{red} = 147.798,68 \text{ MWh} \cdot 95 \text{ €/MWh} = 14,04 \text{ M€/año}$$

El coste de agua y consumibles:

$$C_{agua} + C_{consumibles} = 0,0421 + 0,05 = 0,092 \frac{\text{€}}{\text{kg H}_2}$$

$$C_{var} = 3.101.040 \cdot 0,092 = 0,285 \text{ M€/año}$$

Por tanto:

$$OPEX = C_{fijos} + C_{red} + (C_{agua} + C_{consumibles}) = 15,94 \text{ M€/año}$$

$$OPEX = 1,61 + 14,04 + 0,285 = 15,94 \text{ M€/año}$$

### 11.6.4 Producción e ingresos escenario base

Para el escenario base:

$$I_{H_2,1} = 3.101.040 \text{ kg H}_2/\text{año} \cdot 6 \frac{\text{€}}{\text{kg H}_2} = 18,61 \text{ M€/año}$$

El margen operativo anual antes de REPEX es:

$$FC_{op} = 18,61 \frac{\text{M€}}{\text{año}} - 15,94 \frac{\text{M€}}{\text{año}} = 2,67 \frac{\text{M€}}{\text{año}}$$

| Concepto                | Escenario base      |
|-------------------------|---------------------|
| Ingresos H <sub>2</sub> | 18,61 M€/año        |
| Coste electricidad red  | 14,04 M€/año        |
| Otros OPEX              | 1,89 M€/año         |
| <b>OPEX TOTAL</b>       | <b>15,94 M€/año</b> |
| <b>Flujo operativo</b>  | <b>2,67 M€/año</b>  |

Tabla 62. Comparación de escenarios.

## 11.7 LCOH

El LCOH representa el ingreso que es necesario por cada kg de hidrógeno para rentabilizar los costes durante 25 años.

Utilizando 25 años, una tasa del 8 %, el CAPEX de 73,57 M€ y los REPEX, se obtiene 7,51 €/kg H<sub>2</sub> para el escenario base cuyo desglose es:

$$LCOH = \frac{CAPEX_{anualizado} + OPERX_{fijo} + C_{electricidad} + C_{consumibles} + C_{agua} + REPEX_{anualizado}}{m_{H_2,anual}}$$

El factor de actualización (FA) es:

$$FA = \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1 + 0,08)^t} = \frac{1 - (1 + 0,08)^{-25}}{0,08} = 10,6748$$

- Para convertir el CAPEX de 73,57 M€ en un coste anual equivalente:

$$CAPEX_{anualizado} = \frac{73,57 \text{ M€}}{10,6748} = 6,8919 \frac{\text{M€}}{\text{año}}$$

Dividiendo entre la producción anual de hidrógeno:

$$C_{CAPEX} = \frac{6,8919 \frac{\text{M€}}{\text{año}}}{3.101.040 \text{ kg H}_2/\text{año}} = 2,222 \frac{\text{€}}{\text{kg H}_2}$$

| Componente                 | €/kg H <sub>2</sub> |
|----------------------------|---------------------|
| CAPEX                      | 2,222               |
| OPEX Fijo                  | 0,519               |
| Electricidad de red        | 4,528               |
| Agua                       | 0,042               |
| Consumibles                | 0,05                |
| REPEX                      | 0,151               |
| <b>LCOH Escenario base</b> | <b>7,51</b>         |

Tabla 63. LCOH Escenario base

## 11.8 Flujo de caja, VAN, TIR y Payback

Para el Escenario base se considera una sustitución de stack de 7,2 M€ aproximadamente en los años 10 y 19, debido a las elevadas horas acumuladas de funcionamiento.

Los resultados económicos son:

| Indicador                      | Escenario base |
|--------------------------------|----------------|
| CAPEX                          | 73,57 M€       |
| Flujo operativo antes de REPEX | 2,67 M€/año    |
| VAN a 8%                       | -50,10 M€      |
| TIR                            | -2,52 %        |
| Payback simple                 | >25 años       |
| Payback descontado             | No alcanzado   |

Tabla 64. Flujo caja, VAN, TIR y Payback.

## 11.9 Precio de equilibrio de H<sub>2</sub>

Podemos resolver también una de las variables más útiles, qué precio de H<sub>2</sub> hace viable cada escenario a una tasa del 8 %.

La condición de equilibrio es VAN=0:

| Escenario 1 |
|-------------|
| 7,513 €/kg  |

Esto coincide prácticamente con el LCOH debido a la estructura simplificada y constante del caso base.

Comparándolo con el precio considerado en el modelo (6 €/kg) es insuficiente, sería necesario un incremento del 25% para alcanzar el umbral de rentabilidad:

$$\frac{7,51 - 6}{6} \cdot 100 = 25,16\%$$

## 11.10 Análisis de sensibilidad

Con el nivel de definición propio de una ingeniería FEED y la incertidumbre asociada a variables económicas, se realiza un análisis de sensibilidad para calificar su influencia sobre la rentabilidad del proyecto.

Se adopta como indicador principal el VAN, manteniendo de manera fija el resto de las hipótesis del caso base y modificando individualmente las variables consideradas más relevantes.

| Variable                     | Caso base | Rango de sensibilidad |
|------------------------------|-----------|-----------------------|
| Precio de venta de Hidrógeno | 6 €/kg    | 4-10 €/kg             |
| Coste de electricidad de red | Caso base | -30% / +30%           |
| CAPEX total                  | 73,57 M€  | -30% / +30%           |
| Tasa de descuento            | 8%        | 6-10 %                |

Tabla 65. Análisis de sensibilidad.

### 11.10.1 Precio de venta del hidrógeno

Los ingresos venta de hidrógeno se expresa con la siguiente fórmula:

$$I_{H_2} = m_{H_2} \cdot p_{H_2}$$

Con una producción anual de 3.101 t H<sub>2</sub>/año.

El caso base de 6 €/kg de hidrógeno da lugar a un VAN negativo, mientras que el punto de equilibrio se sitúa aproximadamente en 7,513 €/kg.

Por tanto, el análisis entre 4 y 10 €/kg permite visualizar tanto condiciones desfavorables como situaciones en las que el proyecto se hace rentable.

### 11.10.2 Coste de la electricidad de la red

Se va a considerar una variación del coste de la electricidad de ± 30% respecto al CAPEX obtenido de 73,57 M€:

$$CAPEX_{sens} = 73,57 \cdot (1 + \Delta)$$

Se va a estudiar este rango ya que muestras la incertidumbre asociada al nivel FEED sin dar una falsa precisión al presupuesto.

### 11.10.3 Tasa de descuento

Se van a evaluar tasas de descuento (r) del 6, 8 y 10%.

Permitiendo comprobar la influencia del coste de capital sobre el VAN.

### 11.10.4 Presentación de resultados

Se van a realizar dos gráficos:

1. Diagrama de VAN por colores: Mostrará qué variables tiene mayor influencia económica.
2. Matriz precio H<sub>2</sub>-precio electricidad: Es interesante para este proyecto, en el eje horizontal se pondrá el precio del H<sub>2</sub> entre 4 y 10 €/kg y la vertical la variación del precio de la electricidad entre -30% y +30%. Cada celda representa el VAN obtenido:

$$VAN = f(p_{H_2}, C_{electricidad})$$

La frontera donde:

$$VAN = 0$$

En esta situación separa directamente las combinaciones económicamente viables de las no viables.

### 11.10.5 Conclusión del análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite identificar el precio de venta del hidrógeno y el coste de la electricidad

importada como variables determinantes de la viabilidad económica del proyecto. El gran consumo de electricidad de red hace que variaciones en su precio tengan una incidencia directa en el OPEX y consecuentemente en el VAN. De la misma forma, el precio de la venta de hidrógeno presenta una influencia importante sobre los ingresos, situándose el umbral de rentabilidad del caso base alrededor de 7,51 €/kg H<sub>2</sub>. El CAPEX y la tasa de descuento también afectan a la rentabilidad, aunque su influencia debe analizarse de manera conjunta con las condiciones de comercialización del hidrógeno y adquisición de la electricidad.

## 11.11 Resultados definitivos

| Indicador                        | Escenario base: máxima producción |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| FV Instalada                     | 23 MWp                            |
| Producción FV                    | 38,26 GWh/año                     |
| H <sub>2</sub> producido         | 3.101 t/año                       |
| Factor utilización               | 100 %                             |
| Electricidad importada           | 147,80 GWh/año                    |
| Cobertura FV                     | 20,6 %                            |
| OPEX                             | 15,94 M€/año                      |
| Ingresos H <sub>2</sub>          | 18,61 M€/año                      |
| LCOH                             | 7,51 €/kg                         |
| VAN al 8%                        | -50,10 M€                         |
| TIR                              | -2,52%                            |
| Payback                          | >25 años                          |
| Precio H <sub>2</sub> equilibrio | 7,51 €/kg H <sub>2</sub>          |

Tabla 66. Comparación definitiva.

## 11.12 Conclusión económica

La evaluación económica realizada permite analizar la viabilidad del proyecto, basada en maximizar la producción de hidrógeno mediante el aprovechamiento de la energía eléctrica procedente de la planta fotovoltaica y el suministro de la red eléctrica.

La inversión inicial estimada es de 73,57 M€, mientras que la producción anual de hidrógeno alcanza aproximadamente 3.101 t/año. Para el caso de estudio, con precio de venta del hidrógeno de 6 €/kg, se obtienen unos ingresos de aproximadamente 18,61 M€/año y unos costes de operación de 15,88 M€/año.

El coste nivelado del hidrógeno (LCOH) es de 7,51 €/kg de hidrógeno. De igual manera, el análisis de flujo de caja muestra que, para una tasa de descuento del 8% el proyecto no es rentable, presentando un VAN negativo, por lo que no se recupera la inversión durante la vida útil del proyecto de 25 años. En resumen, el proyecto no es rentable para un precio de venta de hidrógeno de 6 €/kg.

El análisis de sensibilidad muestra que la rentabilidad depende especialmente de dicho precio de venta de hidrógeno y del coste de la electricidad importada de la red. Por otro lado, las variaciones de en el CAPEX también presentan una influencia importante.

Se necesita electricidad renovable abundante y barata durante muchas más horas, no basta con instalar mucha fotovoltaica, falta combinar recursos (eólica, PPAs...) para que el electrolizador pueda acumular muchas horas de operación a un coste eléctrico bajo.

Con esto se concluye con que la viabilidad económica del proyecto dependerá de la evolución futura del mercado de hidrógeno y la electricidad, así como la posibilidad de reducir los costes de inversión y operación.

## **12 TRAMITACIÓN ADMINISTRATIVA Y LEGALIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN**

---

La construcción de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis hibridada con una planta solar fotovoltaica requiere la adquisición de diferentes autorizaciones de carácter ambiental, energético, urbanístico y de seguridad industrial. Dicha tramitación debe realizarse frente a los organismos competentes de carácter autonómico y local, sin perjuicios de las autorizaciones que puedan corresponder a otros organismos en función de las infraestructuras finalmente desarrolladas.

Para la legalización del presente proyecto, ubicado en la provincia de Sevilla y constituido principalmente por una planta fotovoltaica de 23 MWp, un sistema de electrólisis PEM de 20 MW, instalaciones eléctricas, tratamientos de agua, acondicionamiento y compresión de hidrógeno y almacenamiento a presión elevada, el proceso de legalización se diferencia en las siguientes etapas:

### **12.1 Compatibilidad urbanística y disponibilidad de terrenos**

Con anterioridad se deberá verificar la compatibilidad de la construcción con el planeamiento urbanístico aplicable y la clasificación del suelo. Será necesario tener un título habilitante sobre los terrenos y recibir de los ayuntamientos correspondientes los informes, licencias urbanísticas exigibles para la implantación de la actividad y ejecución de las obras (Andalucía, 2021).

La compatibilidad urbanística resulta también importante para la posterior tramitación ambiental, ya que la normativa ambiental en Andalucía requiere la incorporación del informe urbanístico a la documentación del procedimiento ambiental (Andalucía, 2007).

### **12.2 Tramitación ambiental**

La tramitación ambiental del proyecto se fundamenta en la Ley 2/2026, de 12 de marzo, para la Gestión Ambiental de Andalucía (LEGAM), vigente desde el 20 de junio de 2026, y en la legislación estatal de evaluación ambiental y de prevención y control integrados de la contaminación. La LEGAM deroga la Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental, sin perjuicio del régimen transitorio aplicable a los procedimientos iniciados anteriormente (Ley 2/2026, disposición derogatoria única y disposiciones transitorias).

La producción industrial de hidrógeno mediante electrólisis se encuadra en la categoría 4.2.a del anejo I del texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, correspondiente a la fabricación de productos químicos inorgánicos, entre los que se incluye el hidrógeno. En consecuencia, la instalación proyectada está sometida a Autorización Ambiental Integrada (AAI), conforme al artículo 57.1 de la LEGAM (Real Decreto Legislativo 1/2016, anejo I, apartado 4.2.a; Ley 2/2026, art. 57.1).

Para este proyecto se plantea una tramitación ambiental conjunta del sistema de electrólisis, acondicionamiento, compresión y almacenamiento de hidrógeno, la planta fotovoltaica asociada y los servicios auxiliares. Su documentación deberá justificar la delimitación de la instalación y la vinculación técnica de sus componentes. Las instalaciones que se encuentran sometidas a AAI quedan excluidas de la AAU, por lo que no se plantea una AAU adicional para los componentes comprendidos en la instalación autorizada (Ley 2/2026, arts. 3 y 67.1.a).

La solicitud se dirigirá al órgano territorial competente en materia de medio ambiente en Sevilla, considerando que la instalación se ubica íntegramente en esta provincia. Se acompañará del proyecto básico, el informe municipal de compatibilidad urbanística y la documentación ambiental exigible. El proyecto básico describirá los procesos, las materias primas, los consumos de agua y energía, las emisiones, los vertidos, los residuos y las medidas de prevención y control. La evaluación de impacto ambiental y la tramitación de la AAI se coordinarán, incorporándose a esta última la declaración de impacto ambiental (Real Decreto Legislativo 1/2016, art. 12; Decreto 5/2012, art. 5; Ley 2/2026, arts. 52 y 53).

La AAI no sustituye las autorizaciones eléctricas ni los restantes títulos urbanísticos y sectoriales exigibles. La planta fotovoltaica y las instalaciones eléctricas correspondientes mantendrán su tramitación sustantiva, que comprende la autorización administrativa previa, la autorización administrativa de construcción y la autorización de explotación, de acuerdo con el régimen aplicable a su configuración definitiva (Ley 24/2013, art. 53; Real Decreto 1955/2000).

### **12.3 Autorización de las instalaciones eléctricas**

La planta fotovoltaica y las infraestructuras eléctricas de alta tensión deberán tramitarse ante el órgano competente en materia de energía de la Junta de Andalucía de acuerdo con la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico y al Real Decreto 1995/2000, de 1 de diciembre.

La tramitación sustantiva de las instalaciones eléctricas se desarrollará ante el órgano competente en materia de energía y comprenderá las autorizaciones que se enumeran a continuación. Su alcance se concretará conforme a la configuración eléctrica definitiva de la planta, y se coordinará con la tramitación ambiental, sin quedar sustituida por la AAI (Ley 24/2013, art. 53; Real Decreto 1955/2000).

1. Autorización Administrativa Previa (AAP).
2. Autorización Administrativa de Construcción (AAC).
3. Autorización de Explotación (AE).

El diseño y legalización de los centros de transformación, celdas, líneas y demás instalaciones de alta tensión se elaborará conforme al Real Decreto 337/2014 y al Real Decreto 223/2008 y sus respectivas Instrucciones Técnicas Complementarias. Las instalaciones de baja tensión estarán sujetas al Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión y a sus ITC correspondientes. Referencias legales: Reglamento de alta tensión (España, 2014), líneas de alta tensión (España, 2008) y Reglamento electrotécnico para baja tensión (España, 2002).

### **12.4 Seguridad industrial de la instalación de hidrógeno**

Los equipos que operan a presión (separadores, reactores, secadores, tanque buffer, compresores, tuberías y especialmente almacenamiento de hidrógeno a 350 barg) deberán cumplir el Real Decreto 809/2021, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión, así como la Directiva 2014/68/UE sobre equipos a presión cuando sea aplicable.

La instalación deberá disponer de los proyectos, certificados de fabricación, declaraciones de conformidad, pruebas e inspecciones reglamentarias correspondientes antes de su puesta en servicio.

Debido a la presencia de hidrógeno se deberá evaluar aquellas zonas en las que pueda ser habitual generarse atmósferas explosivas. Se realizará la correspondiente clasificación de zonas ATEX y el documento de Protección Contra Explosiones de acuerdo con el Real Decreto 681/2003. Los equipos que son eléctricos y los que no instalados dentro de las zonas clasificadas deberán presentar la categoría y marcado ATEX adecuados, conforme al Real Decreto 144/2016.

El almacenamiento de sustancias químicas deberá de comprobarse también frente al Real Decreto 656/2017, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos (APQ), determinándose durante la ingeniería de detalle las ITC y requisitos concretamente aplicables a cada almacenamiento.

## **12.5 Prevención de accidentes graves**

Se debe comprobar la aplicabilidad del Real Decreto 840/2015, de acuerdo con el control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. Para el hidrógeno, esta normativa define umbrales de 5 toneladas para establecimientos de nivel inferior y 50 toneladas para nivel superior. Por tanto, la clasificación definitiva dependerá de los lugares o equipos máximos de hidrógeno que puedan encontrarse de manera simultánea en la instalación, y no únicamente de la capacidad útil de almacenamiento calculada en este proyecto.

La instalación debe cumplir con el Reglamento de Protección Contra Incendios en los establecimientos industriales (RSCIEI), actualmente aprobado por el Real Decreto 164/2025, así como el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios aprobado por el Real Decreto 513/2017. El proyecto definitivo deberá justificar la sectorización, nivel de riesgo, medios de detección y alarma, sistemas de extinción, accesibilidad de los servicios de emergencia y demás medidas de protección que correspondan.

## **12.6 Ejecución, certificación y puesta en servicio**

Como continuación del presente TFM, se propone desarrollar la ingeniería necesaria para la autorización, construcción y puesta en servicio de la instalación. En primer lugar, se completará el proyecto básico, definiendo los límites de la planta, los balances de materia y energía, los equipos principales, las necesidades de agua y electricidad y el inventario máximo simultáneo de hidrógeno. Se solicitará al ayuntamiento el informe de compatibilidad urbanística y se preparará la documentación de la AAI, incluyendo la información ambiental correspondiente (Real Decreto Legislativo 1/2016, art. 12).

El estudio de impacto ambiental analizará las alternativas de implantación y los efectos de la construcción, explotación y desmantelamiento, y establecerá las medidas preventivas, correctoras y de vigilancia. Para el proyecto se prestará especial atención al consumo y suministro de agua, los vertidos del tratamiento de agua, el ruido de los equipos, los residuos, la ocupación del suelo, el paisaje y las posibles afecciones a espacios protegidos. Estos contenidos se desarrollarán con el alcance exigido por la legislación de evaluación ambiental (Ley 21/2013, art. 35 y anexo VI).

En paralelo a la tramitación administrativa se desarrollará la ingeniería de detalle: planos de implantación, diagramas de tuberías e instrumentación, especificaciones de equipos, cálculos de obra civil y eléctricos, clasificación de zonas ATEX y medidas de protección contra incendios. Se incorporarán al proyecto de ejecución las condiciones de las autorizaciones obtenidas. Esta secuencia constituye la planificación propuesta para desarrollar el diseño del TFM; la preparación de documentación en paralelo no habilita por sí misma el inicio de las obras.

Antes de ejecutar las obras se dispondrá de las autorizaciones y títulos habilitantes exigibles. La construcción se realizará conforme al proyecto autorizado y bajo la dirección facultativa correspondiente. Durante la ejecución se documentarán los controles de calidad, las pruebas de presión y estanqueidad, las verificaciones eléctricas y las comprobaciones de los sistemas de seguridad, con intervención de los organismos de control en los casos previstos por la reglamentación aplicable (Real Decreto 809/2021; Real Decreto 337/2014; Real Decreto 842/2002).

Al finalizar los trabajos se reunirá la documentación final de obra, incluyendo los certificados de instalación y dirección de obra, las declaraciones de conformidad aplicables, los manuales de operación y mantenimiento y las actas de pruebas e inspecciones. Se comprobará la adecuación de los equipos y de las instalaciones a los requisitos de seguridad industrial, atmósferas explosivas y protección contra incendios (Real Decreto 681/2003; Real Decreto 144/2016; Real Decreto 164/2025; Real Decreto 513/2017).

La puesta en servicio requerirá completar los trámites eléctricos, industriales y municipales que correspondan. Antes del inicio de la actividad se presentará ante la Consejería competente en materia de medio ambiente la

declaración responsable que indique la fecha de inicio y el cumplimiento de las condiciones de la AAI, y se atenderán las comprobaciones previas que esta haya establecido (Ley 2/2026, arts. 62 y 65).

Finalmente, se implantará un programa de operación y mantenimiento que incluya la vigilancia ambiental, las inspecciones reglamentarias, la formación del personal, la gestión de emergencias y el control de modificaciones. La explotación se desarrollará conforme a las condiciones autorizadas y a las obligaciones de seguimiento que resulten aplicables a la instalación.

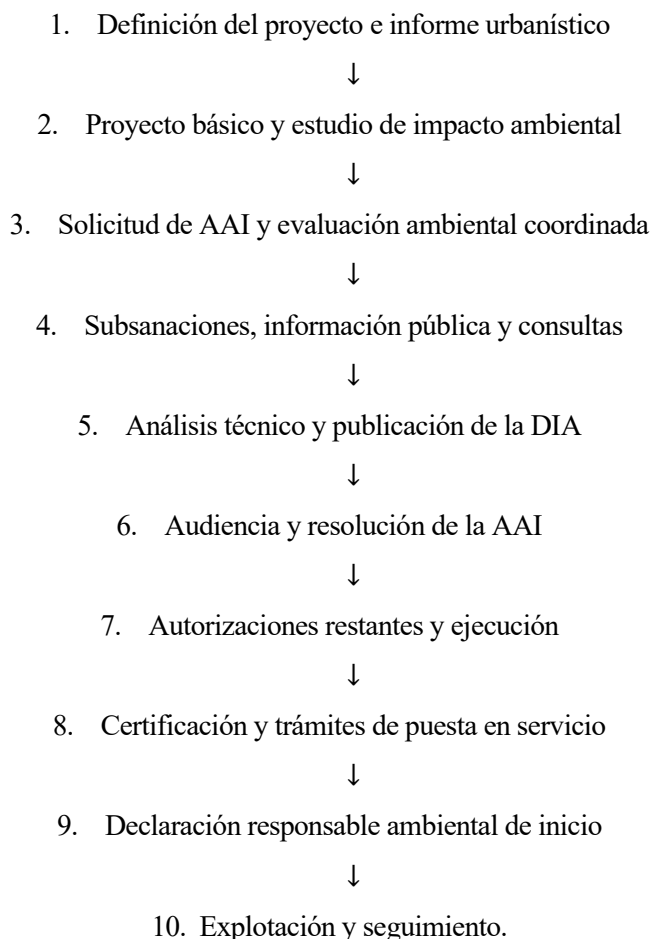
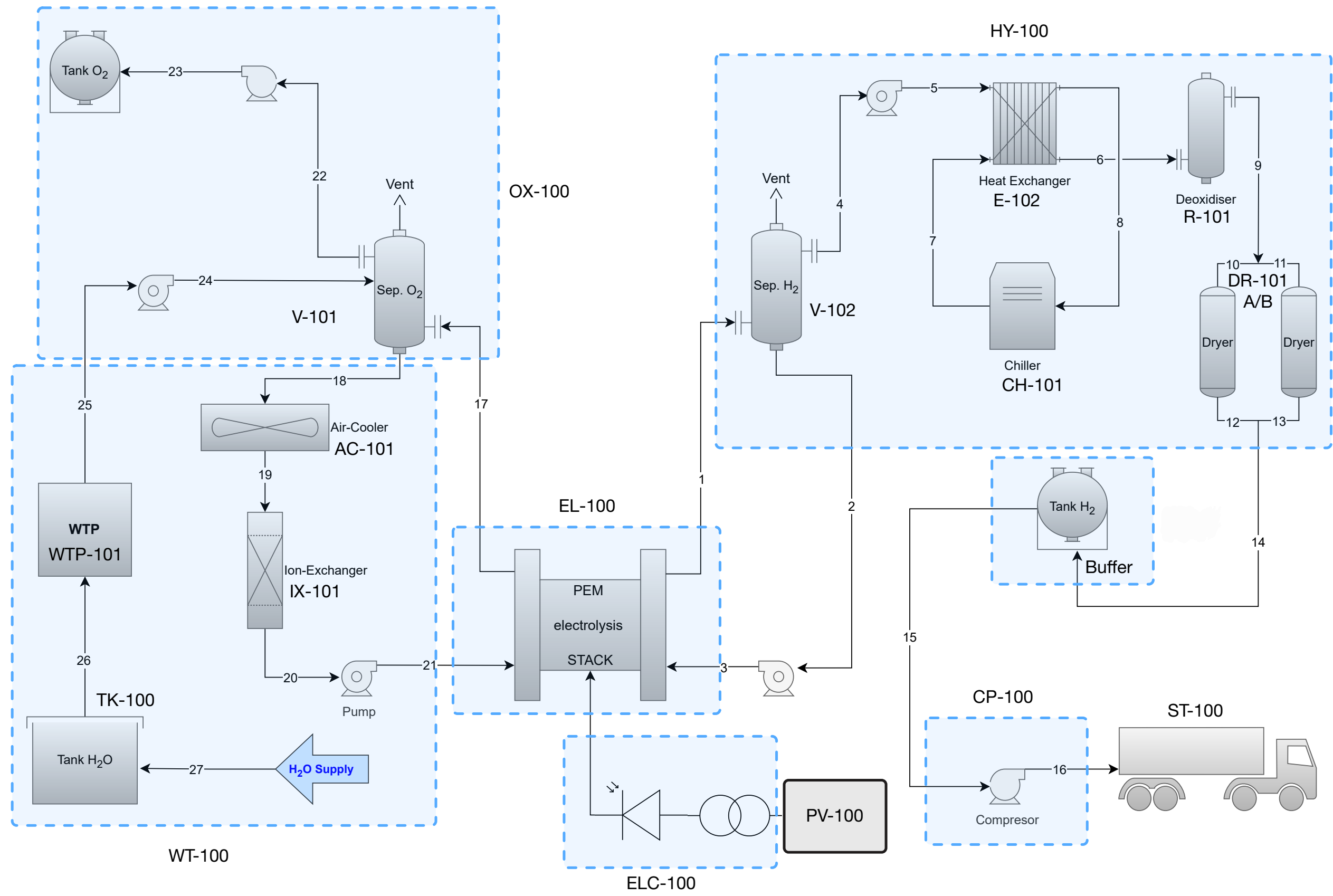


Ilustración 16. Esquema resumido de la tramitación del proyecto. Fuente: Elaboración propia a partir de la Ley 2/2026, el Real Decreto Legislativo 1/2016 y la normativa sectorial aplicable.

## 13 ANEXOS

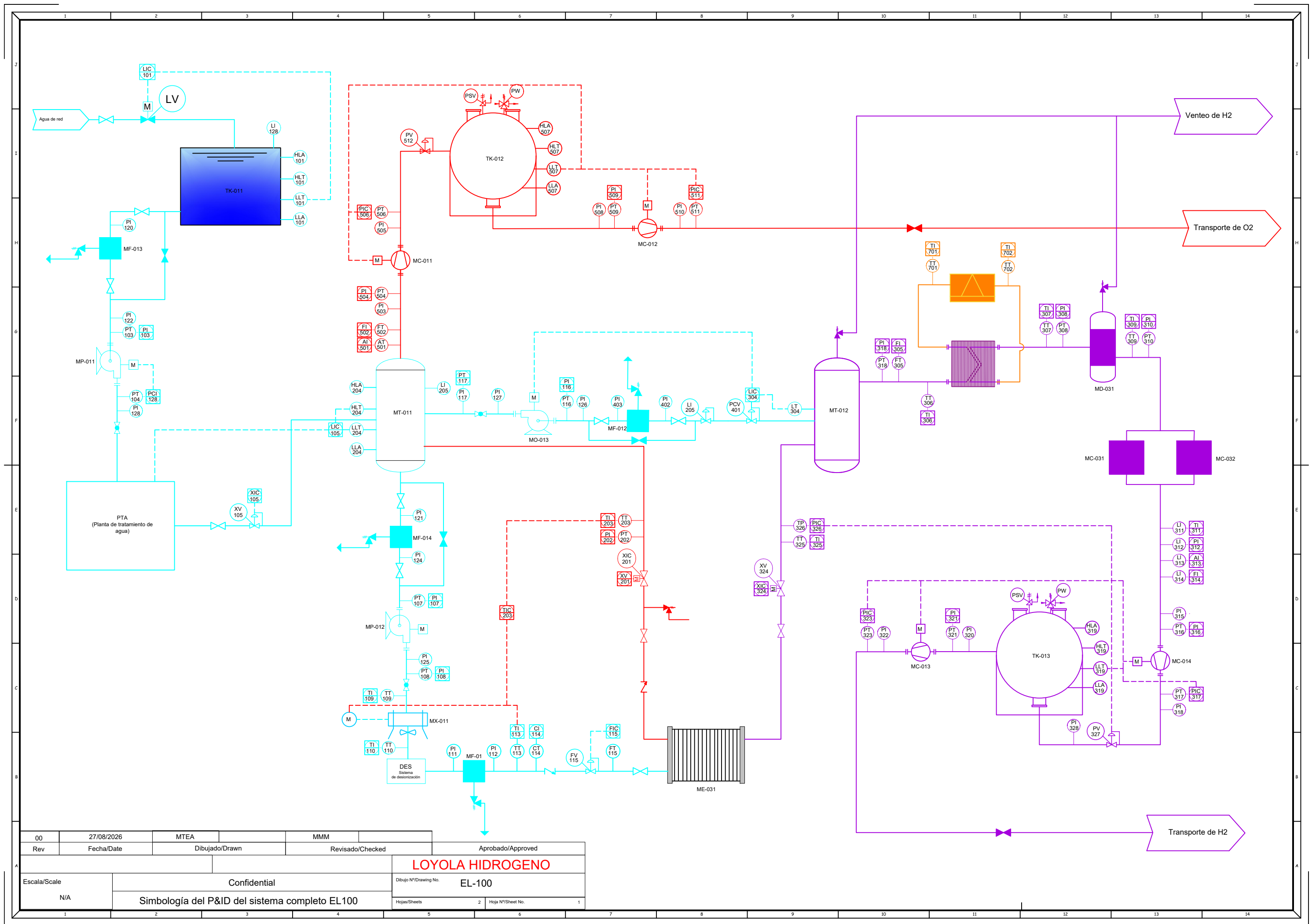
---

### 13.1 Process Flow Diagram (PFD)



|     |                                                             |                  |                    |                     |                                  |                                     |                                          |
|-----|-------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|
| TFM | PROYECTO:<br><b>PLANTA DE PRODUCCION DE HIDROGENO VERDE</b> | DIBUJADO / DRAWN | REVISADO / CHECKED | APROBADO / APPROVED | ESCALA / SCALE<br>REV. <b>03</b> | FORMATO<br>FECHA / DATE <b>2026</b> | HOJA / SHEET<br>DIBUJO N° <b>PFD-001</b> |
|     | PLANO:<br><b>DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (PFD)</b>         | JJ               | MTEA               | -                   | S/E                              | A3                                  | 1 / 1                                    |

## 13.2 Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)



|              |            |                                                |  |                  |                                    |                   |
|--------------|------------|------------------------------------------------|--|------------------|------------------------------------|-------------------|
| 00           | 27/08/2026 | MTEA                                           |  | MMM              |                                    |                   |
| Rev          | Fecha/Date | Dibujado/Drawn                                 |  | Revisado/Checked |                                    | Aprobado/Approved |
|              |            |                                                |  |                  | LOYOLA HIDROGENO                   |                   |
| Escala/Scale |            | Confidential                                   |  |                  | Dibujo N°/Drawing No. EL-100       |                   |
| N/A          |            | Simbología del P&ID del sistema completo EL100 |  |                  | Hojas/Sheets 2 Hoja N°/Sheet No. 1 |                   |

|   |                          |                               |                       |                                                           |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|---|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---|---|---|----|----|----|----|----|
|   | 1                        | 2                             | 3                     | 4                                                         | 5                                                           | 6                                                              | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| J | Unidades funcionales     |                               |                       | Identificación equipos mecánicos                          |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
| I | Código                   | Numeración                    | Unidad funcional      | Código                                                    | Denominación                                                |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   | W                        | 01                            | Agua de proceso       | MT                                                        | Tanque de almacenamiento / Separador gas-líquido            |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   | O                        | 02                            | Oxígeno               | MP                                                        | Bomba                                                       |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   | H                        | 03                            | Hidrógeno             | MX                                                        | Intercambiador de calor                                     |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   | D                        | 06                            | Drenaje               | MF                                                        | Filtro                                                      |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   | RW                       | 07                            | Agua de refrigeración | MC                                                        | Compresorr                                                  |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          |                               |                       | MDY                                                       | Secador                                                     |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          |                               |                       | MIE                                                       | Desionización                                               |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          |                               |                       | ME                                                        | Electrolizador                                              |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          |                               |                       | MD                                                        | Desoxidado                                                  |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
| H | Denominación de válvulas |                               |                       | Denominación de instrumentos                              |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
| G | Código                   | Nomenclatura                  |                       |                                                           |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          | Válvula reguladora de presión |                       | Transmisor de presión<br>(en campo)                       | Indicador de presión<br>(en sala de control)                | Indicador / controlador de presión<br>(en sala de control)     |   |   |   |    |    |    |    |    |
| F |                          | Válvula de corte automática   |                       |                                                           |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          | Válvula de corte manual       |                       | Transmisor de temperatura<br>(en campo)                   | Indicador de temperatura<br>(en sala de control)            | Indicador / controlador de temperatura<br>(en sala de control) |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          | Válvula de regulación manual  |                       |                                                           |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          | Válvula anti-retorno          |                       | Transmisor de nivel alto<br>(en campo)                    | Transmisor de nivel bajo<br>(en campo)                      | Indicador / controlador de nivel<br>(en sala de control)       |   |   |   |    |    |    |    |    |
| E |                          | Válvula rompedora de vacío    |                       |                                                           |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          | Válvula de alivio de presión  |                       | Transmisor de caudal<br>(en campo)                        | Indicador de caudal<br>(en sala de control)                 | Indicador / controlador de caudal<br>(en sala de control)      |   |   |   |    |    |    |    |    |
| D |                          | Válvula de seguridad          |                       |                                                           |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
| C | Estado de las válvulas   |                               |                       | Analizador / transmisor de la concentración<br>(en campo) | Indicador de concentración<br>(en sala de control)          |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
| B |                          | Válvula normalmente cerrada   |                       |                                                           |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          | Válvula normalmente abierta   |                       | Posicionador todo/nada<br>(en campo)                      | Indicador / controlador de posición<br>(en sala de control) | Regulación en función del caudal<br>(en campo)                 |   |   |   |    |    |    |    |    |
| A |                          |                               |                       |                                                           |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   |                          |                               |                       | Regulador de presión<br>(mecánico)                        |                                                             |                                                                |   |   |   |    |    |    |    |    |
|   | 1                        | 2                             | 3                     | 4                                                         | 5                                                           | 6                                                              | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |

|              |            |                                                |                  |                  |                       |                   |  |
|--------------|------------|------------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------------|-------------------|--|
|              |            |                                                |                  |                  |                       |                   |  |
| 00           | 27/08/2026 | MTEA                                           |                  | MMM              |                       |                   |  |
| Rev          | Fecha/Date | Dibujado/Drawn                                 |                  | Revisado/Checked |                       | Aprobado/Approved |  |
|              |            |                                                | LOYOLA HIDROGENO |                  |                       |                   |  |
| Escala/Scale |            | Confidential                                   |                  |                  | Dibujo N°/Drawing No. |                   |  |
| N/A          |            | Simbología del P&ID del sistema completo EL100 |                  |                  | EL-100                |                   |  |
|              |            | Hojas/Sheets                                   |                  | 2                |                       | Hoja N°/Sheet No. |  |
|              |            |                                                |                  |                  |                       | 2                 |  |

### 13.3 Balance de materia

| Corr. | H <sub>2</sub> O kg/h  | H <sub>2</sub> kg/h | O <sub>2</sub> kg/h | Agua refriger. kg/h | Agua Chiller kg/h | Agua alimentación kg/h | Otros kg/h | Total kg/h              | m <sup>3</sup> /h  | Estado              | P barg  | T °C     |
|-------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|------------------------|------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------|----------|
| 1     | TBD*                   | 354                 | ≈0                  | 0                   | 0                 | 0                      | ≈0         | 354 + TBD               | TBD                | Gas húmedo/bifásico | 30      | 70       |
| 2     | TBD*                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | TBD                     | TBD                | Líquido             | 30      | ≈70      |
| 3     | TBD*                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | TBD                     | TBD                | Líquido             | ≈30     | ≈65      |
| 4     | vapor H <sub>2</sub> O | 354                 | ≈0                  | 0                   | 0                 | 0                      | ≈0         | ≈354 + H <sub>2</sub> O | ≈162**             | Gas húmedo          | 30      | 70       |
| 5     | vapor H <sub>2</sub> O | 354                 | ≈0                  | 0                   | 0                 | 0                      | ≈0         | ≈354 + H <sub>2</sub> O | ≈162**             | Gas húmedo          | 30      | 70       |
| 6     | ≈2,39                  | 354                 | ≈0,141              | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | ≈356,53                 | ≈138               | Gas húmedo          | 30      | 20       |
| 7     | 0                      | 0                   | 0                   | 0                   | ≈4.000            | 0                      | 0          | ≈4.000                  | 4                  | Líquido             | —       | 5        |
| 8     | 0                      | 0                   | 0                   | 0                   | ≈4.000            | 0                      | 0          | 0                       | ≈4.000             | 4                   | Líquido | —        |
| 9     | ≈2,52                  | ≈353,986            | ≈0,028              | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | ≈356,53                 | ≈138               | Gas húmedo          | ≈30     | ≈20      |
| 10    | ≈2,52***               | ≈353,986***         | ≈0,028***           | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | ≈356,53***              | ≈138***            | Gas húmedo          | ≈30     | ≈20      |
| 11    | 0****                  | 0****               | 0****               | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | 0****                   | 0****              | Stand-by/reg.       | ≈30     | ≈20      |
| 12    | ≈0,016                 | ≈353,986            | trazas              | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | ≈354,00                 | ≈137               | Gas seco            | ≈30     | ≈20      |
| 13    | 0****                  | 0****               | 0****               | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | 0****                   | 0****              | Stand-by/reg.       | ≈30     | ≈20      |
| 14    | ≈0,016                 | ≈353,986            | trazas              | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | ≈354,00                 | ≈137               | Gas seco            | ≈30     | ≈20      |
| 15    | ≈0,016                 | ≈353,986            | trazas              | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | ≈354,00                 | ≈137               | Gas                 | ≈30     | ≈20–35   |
| 16    | ≈0,016                 | ≈353,986            | trazas              | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | ≈354,00                 | ≈14,3              | Gas comprimido      | 350     | ≈20***** |
| 17    | 844.419                | 0                   | 2.811               | 0                   | 0                 | 0                      | ≈0         | 847.230                 | ≈864 líquido + gas | Bifásico            | ≈30     | 70       |
| 18    | 844.419                | 0                   | 0                   | 0                   | 0                 | 0                      | 0          | 844.419                 | ≈863,41            | Líquido             | ≈30     | 70       |

|    |         |   |       |   |   |       |    |         |         |              |     |          |
|----|---------|---|-------|---|---|-------|----|---------|---------|--------------|-----|----------|
| 19 | 844.419 | 0 | 0     | 0 | 0 | 0     | 0  | 844.419 | ≈860,77 | Líquido      | ≈30 | 65       |
| 20 | 844.419 | 0 | 0     | 0 | 0 | 0     | 0  | 844.419 | ≈860,77 | Líquido      | ≈30 | 65       |
| 21 | 847.584 | 0 | 0     | 0 | 0 | 0     | 0  | 847.584 | 864     | Líquido      | ≈30 | 65       |
| 22 | ≈0      | 0 | 2.811 | 0 | 0 | 0     | ≈0 | ≈2.811  | ≈81     | Gas          | ≈30 | ≈70      |
| 23 | —       | — | —     | — | — | —     | —  | 0       | 0       | No operativa | —   | —        |
| 24 | 3.165   | 0 | 0     | 0 | 0 | 0     | 0  | 3.165   | ≈3,23   | Líquido      | ≈30 | ≈65      |
| 25 | 3.165   | 0 | 0     | 0 | 0 | 0     | 0  | 3.165   | ≈3,23   | Líquido      | —   | Ambiente |
| 26 | 0       | 0 | 0     | 0 | 0 | 5.629 | 0  | 5.629   | ≈5,63   | Líquido      | —   | Ambiente |
| 27 | 0       | 0 | 0     | 0 | 0 | 5.629 | 0  | 5.629   | ≈5,63   | Líquido      | —   | Ambiente |

#### Aclaraciones:

\* Corrientes 1–3. El balance de materia establece que el caudal de agua líquida arrastrada por el lado catódico no puede determinarse con la información del proveedor. Por tanto, son las únicas corrientes que se mantienen como TBD para el componente H<sub>2</sub>O. Esto no impide dimensionar V-102 conservadoramente.

\*\* Para 4–5, el caudal volumétrico de ≈162 m<sup>3</sup>/h corresponde aproximadamente al H<sub>2</sub> a 31 bara y 70 °C; el valor real será ligeramente superior por la humedad.

\*\*\* DR-101 A/B no opera 50/50. En condición normal una torre trata el 100 % de los 354 kg/h, mientras la otra regenera o permanece en espera. Por eso se ha asignado el caudal a 10→12 y cero flujo de proceso a 11→13.

\*\*\*\* Cero significa sin corriente principal de proceso durante ese modo de operación, no que la torre esté vacía.

\*\*\*\*\* Para corriente 16 se utiliza aproximadamente 20 °C como condición después del aftercooler. La descarga inmediata de cada etapa del compresor tendrá una temperatura superior.

13.4 Evaluación técnico económica y análisis de sensibilidad

Resumen Modelo económico TFM

Indicadores del caso base

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| CAPEX total (M€)                  | 73,57    |
| OPEX total (M€/año)               | 15,94    |
| Producción H <sub>2</sub> (t/año) | 3.101,04 |
| Ingresos H <sub>2</sub> (M€/año)  | 18,61    |
| Flujo operativo (M€/año)          | 2,67     |
| LCOH (€/kg H <sub>2</sub> )       | 7,51     |
| VAN @ 8% (M€)                     | (50,10)  |
| TIR                               | (2,5%)   |
| Payback                           | >25 años |

Criterios del modelo

Modelo de caso base único: prioridad a la producción de H<sub>2</sub>; la red cubre el déficit de generación FV.  
CAPEX total fijado en 73,57 M€  
No se considera reposición de inversores.  
Se consideran dos reposiciones de stacks de 7,2 M€ en los años 10 y 19.  
Se mantienen provisionalmente 38,264 GWh/año FV y 147,799 GWh/año de demanda electrolisis  
La hoja Sensibilidad analiza precio H<sub>2</sub>, coste de electricidad, CAPEX y tasa de descuento.

## Modelo económico FEED – Hipótesis del caso base

### Hipótesis técnicas y económicas

| Concepto                          | Valor     | Unidad              | Fuente / criterio                                        | Notas |
|-----------------------------------|-----------|---------------------|----------------------------------------------------------|-------|
| Año monetario                     | 2.026     | año                 | Base económica acordada                                  |       |
| Horizonte económico               | 25        | años                | Vida útil de la planta                                   |       |
| Tasa de descuento                 | 8,0%      | %                   | Estimada                                                 |       |
| Precio venta H <sub>2</sub>       | 6,00      | €/kg                | Hiipótesis FEED                                          |       |
| Producción nominal H <sub>2</sub> | 354       | kg/h                | Nel MC4000                                               |       |
| Horas operación                   | 8.760     | h/año               | Caso base: prioridad a producción de H <sub>2</sub>      |       |
| Producción FV                     | 38.263,72 | MWh/año             | Simulación PVGIS                                         |       |
| Demanda eléctrica planta          | 186.062   | MWh/año             | Se toma 60 kWh/kg H <sub>2</sub>                         |       |
| Electricidad importada            | 147.799   | MWh/año             | Calculado                                                |       |
| Coste electricidad importada      | 14,04     | M€/año              | Calculado                                                |       |
| Consumo específico agua           | 15,90     | L/kg H <sub>2</sub> | Nel MC4000                                               |       |
| Coste agua                        | 2,65      | €/m <sup>3</sup>    | Aguas del Huesna                                         |       |
| Consumibles                       | 0,05      | €/kg H <sub>2</sub> | Hiipótesis FEED                                          |       |
| Vida útil stack                   | 80.000    | h                   | Hipótesis económica                                      |       |
| Coste reposición stack            | 7,20      | M€                  | 30% CAPEX Electrólisis, EPRI (2024)                      |       |
| Año REPEX stack 1                 | 10        | año                 | 80.000 h / 8.760 h·año <sup>-1</sup> ≈ 9,13 años; año 10 |       |
| Año REPEX stack 2                 | 19        | año                 | Segunda reposición por horas acumuladas                  |       |
| precio electricidad               | 95        | €/MWh               | MITECO 2025                                              |       |
| Reposición inversores             | -         | M€                  | Decisión adoptada: no se considera                       |       |
| Valor residual                    | -         | M€                  |                                                          |       |

## CAPEX y OPEX – Caso base

| CAPEX Partida                                   | Base de diseño                     | CAPEX (M€)   | Criterio        | Tipo         | Comentario               |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|--------------|-----------------|--------------|--------------------------|
| PV-100                                          | 23 MWp                             | 16,10        | 700 €/kWp       | Directo      | Planta fotovoltaica      |
| ELC-100                                         | Sistema eléctrico                  | 3,00         | Estimación FEED | Directo      |                          |
| WT-100                                          | Agua + circuito térmico            | 2,00         | Estimación FEED | Directo      |                          |
| EL-100                                          | PEM 20 MW                          | 24,00        | 1.200 €/kW      | Directo      |                          |
| HY-100                                          | 354 kg H <sub>2</sub> /h           | 1,50         | Estimación FEED | Directo      |                          |
| CP-100                                          | 354 kg/h; 30→350 barg              | 2,50         | Estimación FEED | Directo      |                          |
| ST-100                                          | 2.832 kg H <sub>2</sub> @ 350 barg | 4,50         | Estimación FEED | Directo      |                          |
| OX-100                                          | Gestión básica O <sub>2</sub>      | 0,50         | Estimación FEED | Directo      |                          |
| UT-100                                          | Servicios auxiliares               | 1,50         | Estimación FEED | Directo      |                          |
| Instalación, piping y obra civil H <sub>2</sub> |                                    | 5,93         | Estimación FEED | Indirecto    | Cifra conservada del TFM |
| Ingeniería y otros indirectos H <sub>2</sub>    |                                    | 4,54         | Estimación FEED | Indirecto    | Cifra conservada del TFM |
| Contingencia H <sub>2</sub>                     |                                    | 7,50         | Estimación FEED | Contingencia | Cifra conservada del TFM |
| <b>CAPEX TOTAL</b>                              |                                    | <b>73,57</b> |                 |              |                          |

| OPEX anual Partida         | Base                     | OPEX (M€/año) | Criterio                        | Tipo     | Comentario                                                                       |
|----------------------------|--------------------------|---------------|---------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Mantenimiento PV-100       | 23 MWp                   | 0,35          | 15 €/kWp·año                    | Fijo     | Seguridad, vigilancia, comunicaciones e inspecciones<br>Principal coste variable |
| Mantenimiento EL-100       | 20 MW                    | 0,44          | 22 €/kW·año                     | Fijo     |                                                                                  |
| Mantenimiento resto planta | 15,5 M€                  | 0,31          | 2% CAPEX auxiliares             | Fijo     |                                                                                  |
| Seguros y administración   | 73,57 M€                 | 0,37          | 0,5% CAPEX total                | Fijo     |                                                                                  |
| Servicios generales        |                          | 0,15          | Hipótesis FEED                  | Fijo     |                                                                                  |
| Electricidad importada     | 147,799 GWh/año          | 14,04         | Modelo anual                    | Variable |                                                                                  |
| Agua                       | 15,9 L/kg H <sub>2</sub> | 0,13          | Producción × consumo específico | Variable |                                                                                  |
| Consumibles                | 0,05 €/kg H <sub>2</sub> | 0,16          | Producción × coste específico   | Variable |                                                                                  |
| <b>OPEX TOTAL</b>          |                          | <b>15,94</b>  |                                 |          |                                                                                  |

## Flujo de caja descontado – 25 años

| DCF del proyecto |                                |                              |               |           |            |                 |                  |                    |                          |
|------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|-----------|------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Año              | Producción H <sub>2</sub> (kg) | Precio H <sub>2</sub> (€/kg) | Ingresos (M€) | OPEX (M€) | REPEX (M€) | Flujo caja (M€) | Factor descuento | FC descontado (M€) | FC acum. descontado (M€) |
| 0                |                                |                              |               |           |            | -73,570         | 1,000            | -73,570            | -73,570                  |
| 1                | 3101040,000                    | 6,000                        | 18,606        | 15,939    | 0,000      | 2,668           | 0,926            | 2,470              | -71,100                  |
| 2                | 3101040,000                    | 6,000                        | 18,606        | 15,939    | 0,000      | 2,668           | 0,857            | 2,287              | -68,813                  |
| 3                | 3101040,000                    | 6,000                        | 18,606        | 15,939    | 0,000      | 2,668           | 0,794            | 2,118              | -66,696                  |
| 4                | 3101040,000                    | 6,000                        | 18,606        | 15,939    | 0,000      | 2,668           | 0,735            | 1,961              | -64,735                  |
| 5                | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,68             | 1,82               | -62,92                   |
| 6                | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,63             | 1,68               | -61,24                   |
| 7                | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,58             | 1,56               | -59,68                   |
| 8                | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,54             | 1,44               | -58,24                   |
| 9                | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,50             | 1,33               | -56,91                   |
| 10               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 7,20       | -4,53           | 0,46             | -2,10              | -59,01                   |
| 11               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,43             | 1,14               | -57,86                   |
| 12               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,40             | 1,06               | -56,80                   |
| 13               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,37             | 0,98               | -55,82                   |
| 14               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,34             | 0,91               | -54,91                   |
| 15               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,32             | 0,84               | -54,07                   |
| 16               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,29             | 0,78               | -53,29                   |
| 17               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,27             | 0,72               | -52,57                   |
| 18               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,25             | 0,67               | -51,91                   |
| 19               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 7,20       | -4,53           | 0,23             | -1,05              | -52,96                   |
| 20               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,21             | 0,57               | -52,38                   |
| 21               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,20             | 0,53               | -51,85                   |
| 22               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,18             | 0,49               | -51,36                   |
| 23               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,17             | 0,45               | -50,91                   |
| 24               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,16             | 0,42               | -50,49                   |
| 25               | 3101040,00                     | 6,00                         | 18,61         | 15,94     | 0,00       | 2,67            | 0,15             | 0,39               | -50,10                   |

### Indicadores de rentabilidad

|                                         |          |
|-----------------------------------------|----------|
| VAN (M€)                                | (50,10)  |
| TIR                                     | (2,52%)  |
| Payback simple                          | >25 años |
| Flujo operativo antes de REPEX (M€/año) | 2,67     |

## Coste nivelado del hidrógeno (LCOH)

| Cálculo descontado |                     |                                |            |           |            |                       |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|------------|-----------|------------|-----------------------|
| Año                | H <sub>2</sub> (kg) | H <sub>2</sub> descontado (kg) | CAPEX (M€) | OPEX (M€) | REPEX (M€) | Coste descontado (M€) |
| 0                  | -                   | -                              | 73,57      | -         | -          | 73,57                 |
| 1                  | 3.101.040,00        | 2.871.333,33                   | -          | 15,94     | -          | 14,76                 |
| 2                  | 3.101.040,00        | 2.658.641,98                   | -          | 15,94     | -          | 13,66                 |
| 3                  | 3.101.040,00        | 2.461.705,53                   | -          | 15,94     | -          | 12,65                 |
| 4                  | 3.101.040,00        | 2.279.356,97                   | -          | 15,94     | -          | 11,72                 |
| 5                  | 3.101.040,00        | 2.110.515,72                   | -          | 15,94     | -          | 10,85                 |
| 6                  | 3.101.040,00        | 1.954.181,22                   | -          | 15,94     | -          | 10,04                 |
| 7                  | 3.101.040,00        | 1.809.427,06                   | -          | 15,94     | -          | 9,30                  |
| 8                  | 3.101.040,00        | 1.675.395,42                   | -          | 15,94     | -          | 8,61                  |
| 9                  | 3.101.040,00        | 1.551.292,06                   | -          | 15,94     | -          | 7,97                  |
| 10                 | 3.101.040,00        | 1.436.381,53                   | -          | 15,94     | 7,20       | 10,72                 |
| 11                 | 3.101.040,00        | 1.329.982,90                   | -          | 15,94     | -          | 6,84                  |
| 12                 | 3.101.040,00        | 1.231.465,65                   | -          | 15,94     | -          | 6,33                  |
| 13                 | 3.101.040,00        | 1.140.245,97                   | -          | 15,94     | -          | 5,86                  |
| 14                 | 3.101.040,00        | 1.055.783,31                   | -          | 15,94     | -          | 5,43                  |
| 15                 | 3.101.040,00        | 977.577,14                     | -          | 15,94     | -          | 5,02                  |
| 16                 | 3.101.040,00        | 905.164,02                     | -          | 15,94     | -          | 4,65                  |
| 17                 | 3.101.040,00        | 838.114,83                     | -          | 15,94     | -          | 4,31                  |
| 18                 | 3.101.040,00        | 776.032,25                     | -          | 15,94     | -          | 3,99                  |
| 19                 | 3.101.040,00        | 718.548,38                     | -          | 15,94     | 7,20       | 5,36                  |
| 20                 | 3.101.040,00        | 665.322,57                     | -          | 15,94     | -          | 3,42                  |
| 21                 | 3.101.040,00        | 616.039,42                     | -          | 15,94     | -          | 3,17                  |
| 22                 | 3.101.040,00        | 570.406,87                     | -          | 15,94     | -          | 2,93                  |
| 23                 | 3.101.040,00        | 528.154,51                     | -          | 15,94     | -          | 2,71                  |
| 24                 | 3.101.040,00        | 489.031,95                     | -          | 15,94     | -          | 2,51                  |
| 25                 | 3.101.040,00        | 452.807,36                     | -          | 15,94     | -          | 2,33                  |

### Resultado

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| Costes descontados (M€)        | 248,716        |
| H <sub>2</sub> descontado (kg) | 33.102.907,952 |
| LCOH (€/kg H <sub>2</sub> )    | 7,513          |

## Análisis de sensibilidad – VAN

| Sensibilidad univariable     |           |           |           |               |               |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|
| Variable                     | Caso bajo | Caso base | Caso alto | VAN bajo (M€) | VAN alto (M€) |
| Precio H <sub>2</sub> (€/kg) | 4,00      | 6,00      | 10,00     | (116,30)      | 82,31         |
| Coste electricidad red       | (30,0%)   | -         | 30,0%     | (5,13)        | (95,06)       |
| CAPEX total                  | (30,0%)   | -         | 30,0%     | (51,50)       | (95,64)       |
| Tasa descuento               | 6,0%      | 8,0%      | 10,0%     | (45,87)       | (53,31)       |

### Matriz VAN (M€): precio H<sub>2</sub> vs coste de electricidad

| Coste red / Precio H <sub>2</sub> | 4,00     | 5,00     | 6,00    | 7,00    | 8,00    | 9,00  | 10,00  |
|-----------------------------------|----------|----------|---------|---------|---------|-------|--------|
| (30,0%)                           | (71,34)  | (38,24)  | (5,13)  | 27,97   | 61,07   | 94,18 | 127,28 |
| (15,0%)                           | (93,82)  | (60,72)  | (27,62) | 5,49    | 38,59   | 71,69 | 104,80 |
| -                                 | (116,30) | (83,20)  | (50,10) | (17,00) | 16,11   | 49,21 | 82,31  |
| 15,0%                             | (138,79) | (105,68) | (72,58) | (39,48) | (6,37)  | 26,73 | 59,83  |
| 30,0%                             | (161,27) | (128,17) | (95,06) | (61,96) | (28,86) | 4,25  | 37,35  |

### **13.5 Especificaciones técnicas de equipos principales**

| HOJAS DE DATOS                                         |                                       |              |                                     |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| ELC-100 – Sistema eléctrico y distribución de potencia |                                       |              |                                     |
| General                                                |                                       |              |                                     |
| Tag                                                    | ELC-100                               | Servicio     | Conversión y distribución eléctrica |
| Producto                                               | Energía eléctrica                     | Cantidad     | 1 sistema                           |
| Tipo                                                   | Sistema modular MT/BT + rectificación | Localización | Interior/exterior según componente  |
| Condiciones de operación                               |                                       |              |                                     |
| Potencia FV asociada                                   | MWp                                   | 23           |                                     |
| Potencia inversores FV                                 | MWAC                                  | 21,44        |                                     |
| Potencia nominal EL-100                                | MW                                    | 20           |                                     |
| Frecuencia                                             | Hz                                    | 50           |                                     |
| Factor de potencia de diseño                           | -                                     | 0,95         |                                     |
| Demanda SS.AA. de diseño                               | MW                                    | ≈2,0         | Hipótesis de carga conectada        |
| Detalles de construcción Equipo                        |                                       |              |                                     |
| Transformador principal                                | MVA                                   | ≈30          |                                     |
| Trenes eléctricos EL-100                               | ud                                    | 4            |                                     |
| Transformador por tren                                 | MVA                                   | ≈6,3         |                                     |
| Rectificadores                                         | ud × MWDC                             | 4 × ≈5       |                                     |
| Rendimiento rectificador                               | %                                     | ≈98          | ASS/VD                              |
| Transformador auxiliares                               | MVA                                   | ≈3,15        |                                     |

| HOJAS DE DATOS               |   |                                                                |                   |
|------------------------------|---|----------------------------------------------------------------|-------------------|
| Cortocircuito                | - | TBD                                                            | Estudio eléctrico |
| Internos y Accesorios        |   |                                                                |                   |
| Protecciones                 | - | Sobrecorriente, diferencial, tierra, sobretensión y subtensión |                   |
| Medición                     | - | V, I, P, Q, frecuencia y energía                               |                   |
| Control                      | - | Integración PLC/DCS/EMS                                        |                   |
| Refrigeración rectificadores | - | Aire/agua según fabricante                                     |                   |
| Redundancia                  | - | A definir según criticidad                                     |                   |
| MATERIALES                   |   |                                                                |                   |
| Envoltentes/celdas           | - | Por fabricante                                                 |                   |
| Barras y conductores         | - | Cu/Al según diseño eléctrico                                   |                   |
| Normativa                    | - | IEC aplicable                                                  |                   |
| Datos definitivos            | - | Vendor + SLD + Electrical Load List                            |                   |

| HOJAS DE DATOS                       |                                           |              |                              |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------|------------------------------|
| EL-100 – Sistema de electrólisis PEM |                                           |              |                              |
| General                              |                                           |              |                              |
| Tag                                  | EL-100                                    | Servicio     | Producción de H <sub>2</sub> |
| Producto                             | H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>           | Cantidad     | 1 sistema modular            |
| Tipo                                 | Electrolizador PEM; referencia Nel MC4000 | Localización | Exterior/package             |
| Condiciones de operación             |                                           |              |                              |
| Potencia nominal                     | MW                                        | 20           |                              |
| Producción nominal H <sub>2</sub>    | kg/h                                      | 354          |                              |
| Producción diaria H <sub>2</sub>     | kg/d                                      | 8.496        |                              |
| Producción O <sub>2</sub>            | kg/h                                      | ≈2.811       |                              |
| Agua estequiométrica                 | kg/h                                      | ≈3.165       |                              |
| SEC stack                            | kWh/kg H <sub>2</sub>                     | 53,20        |                              |
| SEC sistema                          | kWh/kg H <sub>2</sub>                     | 56,77        |                              |
| Presión H <sub>2</sub> salida        | barg                                      | 30           |                              |
| Temperatura entrada/recirculación    | °C                                        | ≈65          |                              |
| Temperatura salida                   | °C                                        | ≈70          |                              |
| Rango operativo                      | %                                         | 20–100       |                              |
| Detalles de construcción Equipo      |                                           |              |                              |

| HOJAS DE DATOS                      |      |                                                                                  |                 |
|-------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Configuración modular               | -    | 8 módulos × 2,5 MW                                                               |                 |
| Stacks                              | ud   | 16 × 1,25 MW                                                                     | 2 stacks/módulo |
| Celdas por stack                    | ud   | 120                                                                              | Hipótesis FEED  |
| Celdas totales                      | ud   | 1.920                                                                            |                 |
| Corriente aproximada                | kA   | ≈4,95                                                                            |                 |
| Tensión media por celda             | V    | ≈1,98                                                                            |                 |
| Caudal recirculación agua           | m³/h | 864                                                                              | Base FEED       |
| Internos y Accesorios               |      |                                                                                  |                 |
| Rectificación/alimentación DC       | -    | Según package/ELC-100                                                            |                 |
| Instrumentación                     | -    | P, T, caudal, conductividad, ΔP                                                  |                 |
| Seguridad                           | -    | ESD, venteos, detección H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> e interlocks              |                 |
| Control                             | -    | Automático; integración EMS/PLC/DCS                                              |                 |
| MATERIALES                          |      |                                                                                  |                 |
| Partes húmedas                      | -    | Compatibles con agua desmineralizada; por fabricante                             |                 |
| Lado H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> | -    | Material compatible con servicio H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ; por fabricante |                 |
| Normativa                           | -    | IEC/ISO aplicable + fabricante                                                   |                 |

| HOJAS DE DATOS                            |                                          |                    |                                        |
|-------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|
| TK-101 – Depósito de agua de alimentación |                                          |                    |                                        |
| General                                   |                                          |                    |                                        |
| Tag                                       | TK-101                                   | Servicio           | Almacenamiento de agua de alimentación |
| Producto                                  | Agua                                     | Cantidad           | 1                                      |
| Tipo                                      | Depósito cilíndrico vertical atmosférico | Localización       | Exterior                               |
| Condiciones de operación                  |                                          |                    |                                        |
| Caudal asociado                           | m³/h                                     | 5,63               |                                        |
| Autonomía                                 | h                                        | 24                 |                                        |
| Volumen útil                              | m³                                       | 135,1              |                                        |
| Volumen nominal                           | m³                                       | 160                |                                        |
| Presión operación                         | barg                                     | Atmosférica        |                                        |
| Temperatura operación                     | °C                                       | Ambiente           |                                        |
| Temperatura diseño                        | °C                                       | Según Design Basis |                                        |
| Detalles de construcción Equipo           |                                          |                    |                                        |
| Diámetro preliminar                       | m                                        | ≈5,8               |                                        |
| Altura cilíndrica                         | m                                        | ≈6,0               |                                        |
| Fondo/cubierta                            | -                                        | Por fabricante     |                                        |
| Volumen                                   | m³                                       | 160                |                                        |

| HOJAS DE DATOS           |    |                                                  |                       |
|--------------------------|----|--------------------------------------------------|-----------------------|
| Internos y Accesorios    |    |                                                  |                       |
| Venteo                   | -  | Atmosférico protegido                            |                       |
| Rebose                   | -  | Incluido                                         |                       |
| Drenaje                  | -  | Incluido                                         |                       |
| Instrumentación          | -  | LT, LAH, LAL e indicación local                  |                       |
| Boca de hombre           | -  | Incluida                                         |                       |
| Escalera/plataforma      | -  | Según fabricante                                 |                       |
| Pernos de anclaje        | -  | Incluidos                                        |                       |
| Placa de características | -  | Incluida                                         |                       |
| MATERIALES               |    |                                                  |                       |
| Cuerpo                   | -  | Acero al carbono revestido / FRP; por fabricante |                       |
| Tubuladuras              | -  | Compatibles con agua de alimentación             |                       |
| Sobreespesor corrosión   | mm | TBD                                              | Según material/código |

| HOJAS DE DATOS                           |                                |                                                           |                                |
|------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| WTP-101 – Sistema de tratamiento de agua |                                |                                                           |                                |
| General                                  |                                |                                                           |                                |
| Tag                                      | WTP-101                        | Servicio                                                  | Producción de agua para EL-100 |
| Producto                                 | Agua tratada/desmineralizada   | Cantidad                                                  | 1 package                      |
| Tipo                                     | Package de tratamiento de agua | Localización                                              | Interior/package               |
| Condiciones de operación                 |                                |                                                           |                                |
| Caudal normal                            | m³/h                           | 5,63                                                      |                                |
| Caudal de diseño                         | m³/h                           | 6,5                                                       |                                |
| Temperatura entrada admisible            | °C                             | 5–35                                                      | Referencia sistema MC          |
| Presión alimentación referencia          | barg                           | 2,7–4,8                                                   | Referencia sistema MC          |
| Calidad producto                         | -                              | Según requerimiento EL-100/vendor                         |                                |
| Rechazo/purgas                           | -                              | TBD                                                       | Por fabricante                 |
| Detalles de construcción Equipo          |                                |                                                           |                                |
| Tecnología                               | -                              | Según proveedor WTP                                       |                                |
| Potencia eléctrica                       | kW                             | TBD                                                       | Vendor                         |
| Configuración                            | -                              | Skid/package automático                                   |                                |
| Capacidad diseño                         | m³/h                           | 6,5                                                       |                                |
| Internos y Accesorios                    |                                |                                                           |                                |
| Instrumentación                          | -                              | Caudal, presión, conductividad/calidad, niveles y alarmas |                                |

| HOJAS DE DATOS       |   |                                     |  |
|----------------------|---|-------------------------------------|--|
| Control              | - | Automático e integrado con PLC/DCS  |  |
| Drenajes/rechazos    | - | Incluidos según vendor              |  |
| Válvulas package     | - | Incluidas según fabricante          |  |
| MATERIALES           |   |                                     |  |
| Piping agua producto | - | Compatible con agua desmineralizada |  |
| Recipientes/skid     | - | Por fabricante                      |  |
| Membranas/resinas    | - | Por fabricante                      |  |

| HOJAS DE DATOS                                     |                                        |                                      |                                 |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| V-101 – Separador O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O |                                        |                                      |                                 |
| General                                            |                                        |                                      |                                 |
| Tag                                                | V-101                                  | Servicio                             | Separación O <sub>2</sub> /agua |
| Producto                                           | O <sub>2</sub> + agua de recirculación | Cantidad                             | 1                               |
| Tipo                                               | Separador gas-líquido vertical         | Localización                         | Exterior/package                |
| Condiciones de operación                           |                                        |                                      |                                 |
| Fase líquida                                       | -                                      | Agua de recirculación                |                                 |
| Fase gaseosa                                       | -                                      | O <sub>2</sub>                       |                                 |
| Producción O <sub>2</sub>                          | kg/h                                   | ≈2.811                               |                                 |
| Caudal hidráulico referencia                       | m <sup>3</sup> /h                      | ≈864                                 |                                 |
| Temperatura operación                              | °C                                     | ≈70                                  |                                 |
| Tiempo de residencia adoptado                      | s                                      | 30                                   |                                 |
| Margen de volumen                                  | %                                      | 50                                   |                                 |
| Presión operación/diseño                           | -                                      | Según circuito EL-100 / TBD mecánico |                                 |
| Detalles de construcción Equipo                    |                                        |                                      |                                 |
| Orientación                                        | -                                      | Vertical                             |                                 |
| Volumen útil                                       | m <sup>3</sup>                         | Según cálculo Cap. 9                 |                                 |
| Diámetro/altura                                    | -                                      | Según cálculo Cap. 9 / fabricante    |                                 |

| HOJAS DE DATOS               |      |                                                                     |                  |
|------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------|------------------|
| Presión de diseño            | barg | TBD                                                                 | Cálculo mecánico |
| <b>Internos y Accesorios</b> |      |                                                                     |                  |
| Separador de gotas/demister  | -    | Incluido; por fabricante                                            |                  |
| Instrumentación              | -    | LT, LAH/LAL, PT, TT                                                 |                  |
| Salida gas                   | -    | O <sub>2</sub> a venteo seguro                                      |                  |
| Salida líquido               | -    | Agua hacia AC-101                                                   |                  |
| PSV/venteo                   | -    | Según cálculo de alivio                                             |                  |
| Soportes/anclajes            | -    | Incluidos                                                           |                  |
| <b>MATERIALES</b>            |      |                                                                     |                  |
| Cuerpo                       | -    | Acero inoxidable compatible con agua desmineralizada/O <sub>2</sub> |                  |
| Internos                     | -    | Acero inoxidable / vendor                                           |                  |
| Tubuladuras                  | -    | Material compatible con servicio                                    |                  |
| Sobreespesor corrosión       | mm   | TBD                                                                 | Según código     |

| HOJAS DE DATOS                           |                           |                |                                         |
|------------------------------------------|---------------------------|----------------|-----------------------------------------|
| AC-101 – Air Cooler del circuito de agua |                           |                |                                         |
| General                                  |                           |                |                                         |
| Tag                                      | AC-101                    | Servicio       | Refrigeración del agua de recirculación |
| Producto                                 | Agua desmineralizada      | Cantidad       | 1 equipo / 4 celdas                     |
| Tipo                                     | Air-cooled heat exchanger | Localización   | Exterior                                |
| Condiciones de operación                 |                           |                |                                         |
| Caudal agua                              | m³/h                      | ≈864           |                                         |
| Temperatura entrada                      | °C                        | ≈70            |                                         |
| Temperatura salida                       | °C                        | ≈65            |                                         |
| Duty normal                              | MWth                      | ≈4,9           |                                         |
| Margen térmico                           | %                         | 10             |                                         |
| Temperatura ambiente diseño              | °C                        | 40             |                                         |
| Potencia ventiladores                    | kW                        | 20x4=80 kWe    |                                         |
| Detalles de construcción Equipo          |                           |                |                                         |
| Número de celdas                         | ud                        | 4              |                                         |
| Coefficiente U preliminar                | W/m²K                     | 50             | Hipótesis de cálculo                    |
| ΔT preliminar                            | K                         | 5              | Hipótesis de cálculo                    |
| Superficie/geom. final                   | -                         | Por fabricante |                                         |
| Internos y Accesorios                    |                           |                |                                         |

| HOJAS DE DATOS       |   |                                                 |  |
|----------------------|---|-------------------------------------------------|--|
| Ventiladores         | - | 4 celdas; potencia por fabricante               |  |
| Control              | - | Regulación según T de salida                    |  |
| Instrumentación      | - | TT/TIC entrada-salida; estado/vibración motores |  |
| Protecciones motores | - | Incluidas                                       |  |
| Pernos/anclajes      | - | Incluidos                                       |  |
| MATERIALES           |   |                                                 |  |
| Tubos                | - | Compatibles con agua desmineralizada            |  |
| Aletas               | - | Aluminio o equivalente; vendor                  |  |
| Estructura           | - | Acero protegido; por fabricante                 |  |

| HOJAS DE DATOS                         |                      |                                          |                                         |
|----------------------------------------|----------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| IX-101 – Sistema de intercambio iónico |                      |                                          |                                         |
| General                                |                      |                                          |                                         |
| Tag                                    | IX-101               | Servicio                                 | Pulido iónico del agua de recirculación |
| Producto                               | Agua desmineralizada | Cantidad                                 | 4 trenes                                |
| Tipo                                   | Intercambio iónico   | Localización                             | Package                                 |
| Condiciones de operación               |                      |                                          |                                         |
| Caudal normal total                    | m³/h                 | 864                                      |                                         |
| Caudal diseño total                    | m³/h                 | ≈950                                     | +10%                                    |
| Caudal diseño por tren                 | m³/h                 | ≈238                                     |                                         |
| Temperatura operación                  | °C                   | ≈65                                      |                                         |
| ΔP admisible                           | bar                  | TBD                                      | Vendor                                  |
| Calidad entrada/salida                 | -                    | Según análisis iónico / requisito EL-100 |                                         |
| Detalles de construcción Equipo        |                      |                                          |                                         |
| Número de trenes                       | ud                   | 4                                        |                                         |
| Volumen de lecho de cada tren          | m³                   | 8                                        |                                         |
| Resina                                 | -                    | TBD                                      | Según análisis iónico                   |
| Cantidad de resina                     | kg                   | TBD                                      | Vendor                                  |
| Configuración de recipientes           | -                    | Por fabricante                           |                                         |
| Internos y Accesorios                  |                      |                                          |                                         |

| HOJAS DE DATOS            |   |                                                  |  |
|---------------------------|---|--------------------------------------------------|--|
| Distribuidores/colectores | - | Incluidos                                        |  |
| Instrumentación           | - | Conductividad entrada/salida, $\Delta P$ , P y T |  |
| Regeneración              | - | Según resina/vendor                              |  |
| Válvulas automáticas      | - | Incluidas según fabricante                       |  |
| MATERIALES                |   |                                                  |  |
| Recipientes               | - | Compatibles con agua desmineralizada             |  |
| Internos                  | - | Por fabricante                                   |  |
| Piping                    | - | Compatible con agua desmineralizada              |  |

| HOJAS DE DATOS                              |                      |                              |                                 |
|---------------------------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------------|
| P-101 A/B – Bombas de recirculación de agua |                      |                              |                                 |
| General                                     |                      |                              |                                 |
| Tag                                         | P-101 A/B            | Servicio                     | Recirculación de agua EL-100    |
| Producto                                    | Agua desmineralizada | Cantidad                     | 2 × 100%                        |
| Tipo                                        | Bomba centrífuga     | Localización                 | Exterior/package                |
| Condiciones de operación                    |                      |                              |                                 |
| Caudal normal por bomba                     | m³/h                 | 864                          | 1 en servicio                   |
| ΔP preliminar                               | bar                  | 10                           | Incluye pérdidas circuito, FEED |
| Temperatura aspiración                      | °C                   | ≈65                          |                                 |
| Rendimiento hidráulico                      | %                    | 82                           |                                 |
| Rendimiento mecánico                        | %                    | 96                           |                                 |
| Potencia normal                             | kW                   | ≈305                         |                                 |
| Potencia seleccionada                       | kW                   | ≈335                         | +10%                            |
| Detalles de construcción Equipo             |                      |                              |                                 |
| Configuración                               | -                    | 1 servicio + 1 reserva       |                                 |
| Accionamiento                               | -                    | Motor eléctrico              |                                 |
| Control                                     | -                    | VFD / control presión-caudal |                                 |
| NPSH requerido                              | m                    | TBD                          | Vendor                          |
| Velocidad                                   | rpm                  | TBD                          | Vendor                          |

| HOJAS DE DATOS         |   |                                                            |  |
|------------------------|---|------------------------------------------------------------|--|
| Internos y Accesorios  |   |                                                            |  |
| Sello                  | - | Mecánico; selección vendor                                 |  |
| Instrumentación        | - | PI/PT aspiración-descarga, FI/FT, vibración y estado motor |  |
| Válvula retención      | - | Incluida en descarga                                       |  |
| Baseplate/acoplamiento | - | Incluidos                                                  |  |
| Pernos de anclaje      | - | Incluidos                                                  |  |
| MATERIALES             |   |                                                            |  |
| Carcasa                | - | Acero inoxidable compatible con agua desmineralizada       |  |
| Impulsor               | - | Acero inoxidable                                           |  |
| Eje                    | - | Por fabricante                                             |  |
| Normativa              | - | API 610 o estándar industrial equivalente                  |  |

| HOJAS DE DATOS                                     |                                |                     |                                          |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------------------|
| V-102 – Separador H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O |                                |                     |                                          |
| General                                            |                                |                     |                                          |
| Tag                                                | V-102                          | Servicio            | Separación primaria H <sub>2</sub> /agua |
| Producto                                           | H <sub>2</sub> húmedo          | Cantidad            | 1                                        |
| Tipo                                               | Separador vertical gas-líquido | Localización        | Package HY-100                           |
| Condiciones de operación                           |                                |                     |                                          |
| Caudal H <sub>2</sub>                              | kg/h                           | 354                 |                                          |
| Temperatura operación                              | °C                             | ≈70                 |                                          |
| Presión operación                                  | barg                           | ≈30                 |                                          |
| Tiempo de residencia adoptado                      | min                            | 5                   |                                          |
| Arrastre líquido entrada                           | ppm                            | >25                 | Depende de vendor EL-100                 |
| Detalles de construcción Equipo                    |                                |                     |                                          |
| Diámetro preliminar                                | m                              | 0,8                 |                                          |
| Altura preliminar                                  | m                              | 2,0                 |                                          |
| Orientación                                        | -                              | Vertical            |                                          |
| Presión de diseño                                  | barg                           | TBD                 | Cálculo mecánico                         |
| Internos y Accesorios                              |                                |                     |                                          |
| Demister/separador de gotas                        | -                              | Incluido            |                                          |
| Instrumentación                                    | -                              | LT, LAH/LAL, PT, TT |                                          |

| HOJAS DE DATOS         |    |                                                      |              |
|------------------------|----|------------------------------------------------------|--------------|
| Drenaje                | -  | Automático hacia circuito de agua                    |              |
| PSV                    | -  | A venteo seguro                                      |              |
| Soporte                | -  | Faldón/patas según fabricante                        |              |
| MATERIALES             |    |                                                      |              |
| Cuerpo                 | -  | Acero inoxidable compatible con H <sub>2</sub> /agua |              |
| Internos               | -  | Acero inoxidable / vendor                            |              |
| Tubuladuras            | -  | Material apto para H <sub>2</sub>                    |              |
| Sobreespesor corrosión | mm | TBD                                                  | Según código |

| HOJAS DE DATOS                                           |                                   |                |                                                           |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------|
| E-102 – Intercambiador de enfriamiento de H <sub>2</sub> |                                   |                |                                                           |
| General                                                  |                                   |                |                                                           |
| Tag                                                      | E-102                             | Servicio       | Enfriamiento y condensación de humedad del H <sub>2</sub> |
| Producto                                                 | H <sub>2</sub> húmedo / agua fría | Cantidad       | 1                                                         |
| Tipo                                                     | Intercambiador gas-agua           | Localización   | Package HY-100                                            |
| Condiciones de operación                                 |                                   |                |                                                           |
| Caudal H <sub>2</sub>                                    | kg/h                              | 354            |                                                           |
| T H <sub>2</sub> entrada                                 | °C                                | ≈70            |                                                           |
| T H <sub>2</sub> salida                                  | °C                                | ≈20            |                                                           |
| Presión H <sub>2</sub>                                   | barg                              | ≈30            |                                                           |
| Margen térmico                                           | %                                 | 25             |                                                           |
| Refrigerante                                             | -                                 | Agua de CH-101 |                                                           |
| T refrigerante entrada/salida                            | °C                                | 5 / 25         |                                                           |
| Caudal refrigerante                                      | m <sup>3</sup> /h                 | ≈4             |                                                           |
| Duty de diseño                                           | kWth                              | ≈87            | CH-101 seleccionado ≈100 kWth                             |
| Detalles de construcción Equipo                          |                                   |                |                                                           |
| Tipología final                                          | -                                 | TBD            | Vendor                                                    |
| Área intercambio                                         | m <sup>2</sup>                    | TBD            | Vendor                                                    |
| ΔP lado H <sub>2</sub>                                   | bar                               | TBD            | Vendor                                                    |

| HOJAS DE DATOS        |     |                                                |        |
|-----------------------|-----|------------------------------------------------|--------|
| ΔP lado agua          | bar | TBD                                            | Vendor |
| Internos y Accesorios |     |                                                |        |
| Instrumentación       | -   | TT entrada/salida, PT y ΔP                     |        |
| Drenaje condensados   | -   | Incluido                                       |        |
| Aislamiento           | -   | Según diseño térmico/vendor                    |        |
| Soportes              | -   | Incluidos                                      |        |
| MATERIALES            |     |                                                |        |
| Lado H <sub>2</sub>   | -   | Acero inoxidable compatible con H <sub>2</sub> |        |
| Lado agua             | -   | Compatible con agua refrigerada                |        |
| Normativa             | -   | TEMA/EN/ASME según tipología                   |        |

| HOJAS DE DATOS                  |                    |                                       |                                    |
|---------------------------------|--------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| CH-101 – Chiller de HY-100      |                    |                                       |                                    |
| General                         |                    |                                       |                                    |
| Tag                             | CH-101             | Servicio                              | Producción de agua fría para E-102 |
| Producto                        | Agua fría          | Cantidad                              | 1 package                          |
| Tipo                            | Chiller industrial | Localización                          | Exterior/package                   |
| Condiciones de operación        |                    |                                       |                                    |
| Capacidad frigorífica           | kWth               | ≈100                                  |                                    |
| Caudal agua                     | m³/h               | 4                                     |                                    |
| Temperatura impulsión           | °C                 | 5                                     |                                    |
| Temperatura retorno             | °C                 | 25                                    |                                    |
| Temperatura ambiente diseño     | °C                 | 40                                    |                                    |
| COP                             | -                  | 3                                     | Asumido                            |
| Potencia eléctrica              | kW                 | 100/3=35 kW <sub>e</sub>              |                                    |
| Detalles de construcción Equipo |                    |                                       |                                    |
| Compresor frigorífico           | -                  | Por fabricante                        |                                    |
| Bomba circulación               | -                  | Integrada en package, preferentemente |                                    |
| Refrigerante                    | -                  | Según fabricante y normativa vigente  |                                    |
| Configuración                   | -                  | Package automático                    |                                    |
| Internos y Accesorios           |                    |                                       |                                    |

| HOJAS DE DATOS                        |   |                                                  |  |
|---------------------------------------|---|--------------------------------------------------|--|
| Control                               | - | Automático por temperatura de impulsión          |  |
| Instrumentación                       | - | T, P, caudal y alarmas de refrigerante/compresor |  |
| Protecciones eléctricas               | - | Incluidas                                        |  |
| Vaso expansión/accesorios hidráulicos | - | Según vendor                                     |  |
| MATERIALES                            |   |                                                  |  |
| Circuito hidráulico                   | - | Compatible con agua refrigerada                  |  |
| Bastidor/envolvente                   | - | Por fabricante                                   |  |
| Datos definitivos                     | - | Vendor Data                                      |  |

| HOJAS DE DATOS                  |                              |                                    |                                                   |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|
| R-101 – Deoxidiser              |                              |                                    |                                                   |
| General                         |                              |                                    |                                                   |
| Tag                             | R-101                        | Servicio                           | Eliminación catalítica de O <sub>2</sub> residual |
| Producto                        | H <sub>2</sub> acondicionado | Cantidad                           | 1                                                 |
| Tipo                            | Reactor catalítico vertical  | Localización                       | Package HY-100                                    |
| Condiciones de operación        |                              |                                    |                                                   |
| Caudal H <sub>2</sub>           | kg/h                         | 354                                |                                                   |
| Presión operación               | barg                         | ≈30                                |                                                   |
| O <sub>2</sub> entrada          | ppm mol                      | ≈25                                |                                                   |
| O <sub>2</sub> salida           | ppm mol                      | ≤5                                 |                                                   |
| O <sub>2</sub> eliminado        | kg/h                         | ≈0,112                             |                                                   |
| H <sub>2</sub> consumido        | kg/h                         | ≈0,014                             |                                                   |
| H <sub>2</sub> O formada        | kg/h                         | ≈0,126                             |                                                   |
| Detalles de construcción Equipo |                              |                                    |                                                   |
| Diámetro preliminar             | m                            | 0,7                                |                                                   |
| Volumen catalítico              | m <sup>3</sup>               | 0,5 m <sup>3</sup>                 |                                                   |
| Altura de lecho                 | m                            | 1,30 m                             |                                                   |
| Altura total                    | m                            | Según distribuidores/soportes: 2 m |                                                   |

| HOJAS DE DATOS                      |   |                                                         |  |
|-------------------------------------|---|---------------------------------------------------------|--|
| Catalizador                         | - | Por fabricante                                          |  |
| Internos y Accesorios               |   |                                                         |  |
| Distribuidores/soportes catalizador | - | Incluidos                                               |  |
| Instrumentación                     | - | TT entrada/salida/lecho, PT y analizador O <sub>2</sub> |  |
| PSV                                 | - | Incluida                                                |  |
| ESD                                 | - | Incluido                                                |  |
| MATERIALES                          |   |                                                         |  |
| Recipiente                          | - | Acero compatible con H <sub>2</sub>                     |  |
| Internos                            | - | Por fabricante                                          |  |
| Catalizador                         | - | Catalizador de deoxidación; vendor                      |  |
| Normativa                           | - | EN 13445 / ASME VIII                                    |  |

| HOJAS DE DATOS                                   |                        |                                      |                                |
|--------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| DR-101 A/B – Sistema de secado de H <sub>2</sub> |                        |                                      |                                |
| General                                          |                        |                                      |                                |
| Tag                                              | DR-101 A/B             | Servicio                             | Secado final de H <sub>2</sub> |
| Producto                                         | H <sub>2</sub> seco    | Cantidad                             | 2 torres                       |
| Tipo                                             | Adsorción regenerativa | Localización                         | Package HY-100                 |
| Condiciones de operación                         |                        |                                      |                                |
| Caudal por torre en servicio                     | kg/h                   | 354                                  | No se divide entre torres      |
| Presión operación                                | barg                   | ≈30                                  |                                |
| Temperatura adsorción                            | °C                     | ≈20                                  |                                |
| Humedad entrada cálculo                          | kg/h                   | ≈2,52                                |                                |
| H <sub>2</sub> O producto                        | ppm                    | ≤5                                   |                                |
| Ciclo adsorción                                  | h                      | 8                                    |                                |
| Temperatura regeneración                         | °C                     | ≈200                                 |                                |
| Heater regeneración                              | kW                     | 20                                   | Intermitente                   |
| Detalles de construcción Equipo                  |                        |                                      |                                |
| Configuración                                    | -                      | 1 adsorción + 1 regeneración/standby |                                |
| Adsorbente                                       | -                      | Tamiz molecular                      |                                |
| Masa adsorbente/torre                            | kg                     | 300                                  |                                |
| Altura del lecho                                 | m                      | 1,30                                 |                                |

| HOJAS DE DATOS               |       |                                               |  |
|------------------------------|-------|-----------------------------------------------|--|
| Volumen de lecho adoptado    | m³    | ≈0,5                                          |  |
| Diámetro                     | m     | 0,70                                          |  |
| Densidad aparente referencia | kg/m³ | ≈650                                          |  |
| Velocidad superficial diseño | m/s   | ≤0,10                                         |  |
| Internos y Accesorios        |       |                                               |  |
| Filtro de partículas         | -     | Integrado en package                          |  |
| Instrumentación              | -     | PT, TT multipunto, ΔP y analizador de humedad |  |
| Automatización               | -     | Secuenciación automática A/B                  |  |
| PSV/ESD                      | -     | Incluidos                                     |  |
| Venteo regeneración          | -     | Controlado a sistema seguro                   |  |
| MATERIALES                   |       |                                               |  |
| Recipientes                  | -     | Acero compatible con H <sub>2</sub>           |  |
| Internos                     | -     | Por fabricante                                |  |
| Adsorbente                   | -     | Tamiz molecular                               |  |
| Normativa                    | -     | EN 13445 / ASME VIII                          |  |

| HOJAS DE DATOS                                            |                                            |               |                                 |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|---------------------------------|
| BUFFER H <sub>2</sub> – Depósito intermedio HY-100/CP-100 |                                            |               |                                 |
| General                                                   |                                            |               |                                 |
| Tag                                                       | A definir                                  | Servicio      | Desacoplamiento HY-100 / CP-100 |
| Producto                                                  | H <sub>2</sub> seco                        | Cantidad      | 1                               |
| Tipo                                                      | Recipiente cilíndrico horizontal a presión | Localización  | Exterior                        |
| Condiciones de operación                                  |                                            |               |                                 |
| Caudal asociado                                           | kg/h                                       | 354           |                                 |
| Tiempo de buffer                                          | min                                        | 15            |                                 |
| Inventario útil requerido                                 | kg                                         | 88,5          |                                 |
| Presión normal                                            | barg                                       | ≈30           |                                 |
| Banda de operación                                        | barg                                       | ≈25–30        |                                 |
| Temperatura de cálculo                                    | °C                                         | 20            |                                 |
| Factor Z adoptado                                         | -                                          | ≈1,01         |                                 |
| Detalles de construcción Equipo                           |                                            |               |                                 |
| Orientación                                               | -                                          | Horizontal    |                                 |
| Diámetro interior preliminar                              | m                                          | ≈2,4          |                                 |
| Longitud                                                  | m                                          | 10            |                                 |
| Presión de diseño                                         | barg                                       | Aprox 36 barg | Cálculo mecánico/vendor         |
| Internos y Accesorios                                     |                                            |               |                                 |

| HOJAS DE DATOS         |    |                                         |                       |
|------------------------|----|-----------------------------------------|-----------------------|
| Soportes               | -  | Sillets                                 |                       |
| Instrumentación        | -  | PT, PI y TT                             |                       |
| PSV                    | -  | Incluida                                |                       |
| ESD                    | -  | Incluido                                |                       |
| Ventoe                 | -  | A colector de ventoe seguro             |                       |
| Pernos de anclaje      | -  | Incluidos                               |                       |
| MATERIALES             |    |                                         |                       |
| Cuerpo                 | -  | Acero apto para servicio H <sub>2</sub> |                       |
| Tubuladuras            | -  | Material apto para H <sub>2</sub>       |                       |
| Sobreespesor corrosión | mm | TBD                                     | Según material/código |
| Normativa              | -  | EN 13445 / ASME VIII                    |                       |

| HOJAS DE DATOS                                   |                                            |              |                                    |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|------------------------------------|
| CP-100 – Sistema de compresión de H <sub>2</sub> |                                            |              |                                    |
| General                                          |                                            |              |                                    |
| Tag                                              | CP-100                                     | Servicio     | Compresión final de H <sub>2</sub> |
| Producto                                         | H <sub>2</sub> seco ≥99,999%               | Cantidad     | 1 package                          |
| Tipo                                             | Compresor multietapa con interenfriamiento | Localización | Exterior/package                   |
| Condiciones de operación                         |                                            |              |                                    |
| Caudal normal                                    | kg/h                                       | 354          |                                    |
| Caudal diseño                                    | kg/h                                       | 389,4        | +10%                               |
| Presión aspiración                               | barg                                       | ≈30          |                                    |
| Presión descarga                                 | barg                                       | 350          |                                    |
| Temperatura aspiración                           | °C                                         | ≈35          |                                    |
| Relación global compresión                       | -                                          | ≈11,32       |                                    |
| Número de etapas                                 | ud                                         | 3            |                                    |
| Relación por etapa                               | -                                          | ≈2,25        |                                    |
| Rendimiento isentrópico adoptado                 | %                                          | 75           |                                    |
| SEC compresión                                   | kWh/kg H <sub>2</sub>                      | ≈1,29        |                                    |
| Potencia normal                                  | kW                                         | ≈457         |                                    |
| Potencia diseño                                  | kW                                         | ≈502         |                                    |

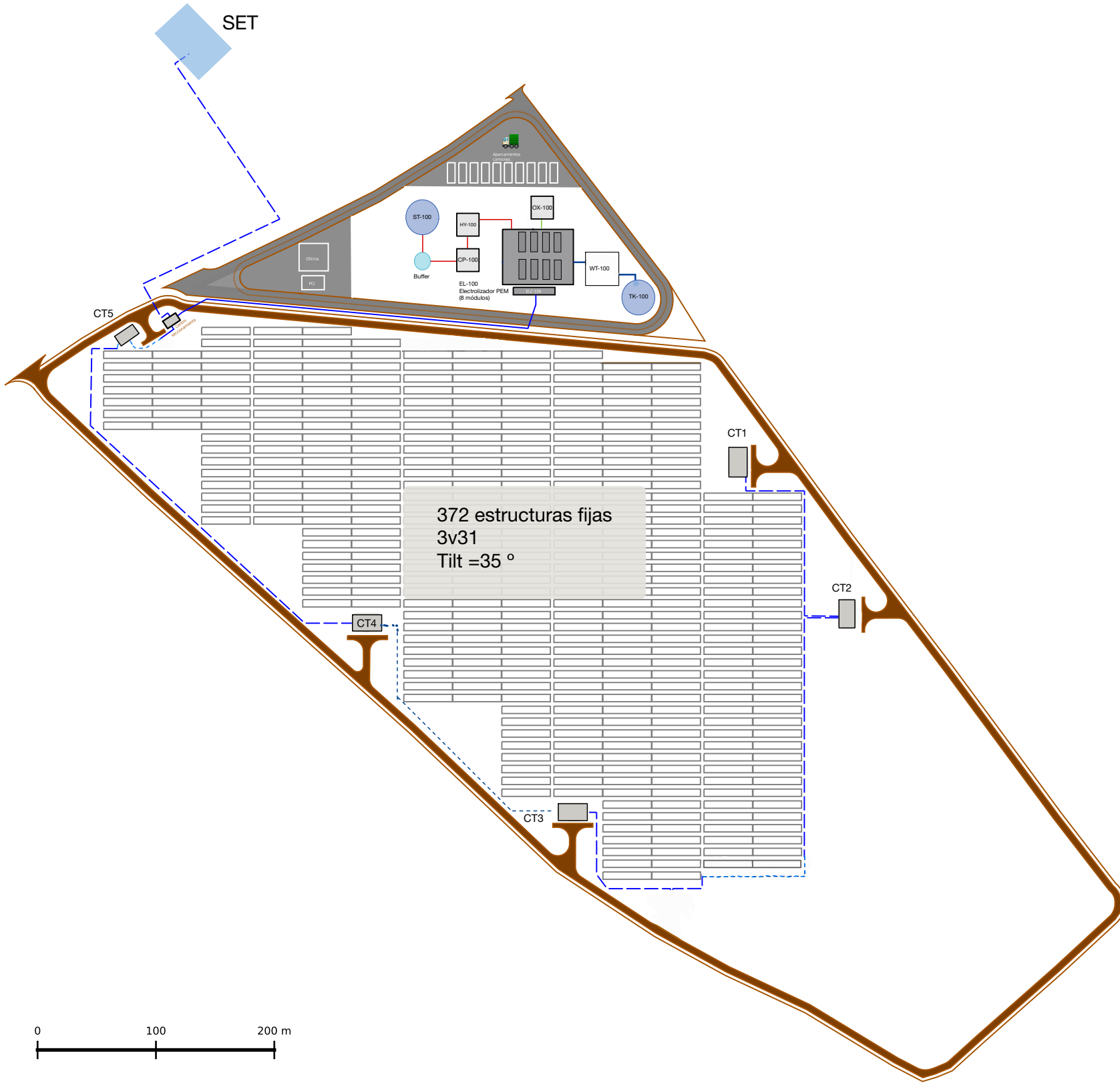
| HOJAS DE DATOS                  |   |                                                   |  |
|---------------------------------|---|---------------------------------------------------|--|
| Detalles de construcción Equipo |   |                                                   |  |
| Configuración package           | - | 2 × 50% si se mantiene filosofía Cap. 9           |  |
| Accionamiento                   | - | Motor eléctrico, aprox 552 kW                     |  |
| Interenfriamiento               | - | Si                                                |  |
| Aftercooler                     | - | Si                                                |  |
| Control de capacidad            | - | Automático según buffer/ST-100                    |  |
| Internos y Accesorios           |   |                                                   |  |
| Instrumentación                 | - | PT/TT por etapa, caudal, vibración y estado motor |  |
| PSV                             | - | Por etapa                                         |  |
| ESD                             | - | Incluido                                          |  |
| Detección H <sub>2</sub>        | - | Incluida                                          |  |
| Separación condensados          | - | Según tecnología/vendor                           |  |
| 5<br>MATERIALES                 |   |                                                   |  |
| Partes en contacto              | - | Material apto para H <sub>2</sub> a alta presión  |  |
| Sellos                          | - | Por fabricante                                    |  |
| Piping package                  | - | Apto para H <sub>2</sub> a alta presión           |  |
| Código                          | - | API/ISO/ASME aplicable según tecnología vendor    |  |

| HOJAS DE DATOS                                             |                                    |              |                                                   |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------|
| ST-100 – Sistema de almacenamiento final de H <sub>2</sub> |                                    |              |                                                   |
| General                                                    |                                    |              |                                                   |
| Tag                                                        | ST-100                             | Servicio     | Almacenamiento final de H <sub>2</sub> comprimido |
| Producto                                                   | H <sub>2</sub> seco ≥99,999%       | Cantidad     | 1                                                 |
| Tipo                                                       | Recipiente esférico a alta presión | Localización | Exterior                                          |
| Condiciones de operación                                   |                                    |              |                                                   |
| Caudal llenado nominal                                     | kg/h                               | 354          |                                                   |
| Autonomía requerida                                        | h                                  | 8            |                                                   |
| Capacidad útil requerida                                   | kg H <sub>2</sub>                  | 2.832        |                                                   |
| Presión máxima operación                                   | barg                               | 350          |                                                   |
| Presión mínima operación                                   | barg                               | 30           |                                                   |
| Temperatura de cálculo                                     | °C                                 | 20           |                                                   |
| Factor Z a 350 barg                                        | -                                  | ≈1,17        |                                                   |
| Margen de capacidad                                        | %                                  | 10           |                                                   |
| Detalles de construcción Equipo                            |                                    |              |                                                   |
| Geometría                                                  | -                                  | Esférica     |                                                   |
| Volumen interno                                            | m <sup>3</sup>                     | ≈140         |                                                   |
| Diámetro interior                                          | m                                  | ≈6,5         |                                                   |

| HOJAS DE DATOS                 |      |                                                           |                                          |
|--------------------------------|------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Espesor                        | mm   | TBD                                                       | Cálculo mecánico                         |
| Presión de diseño              | barg | TBD                                                       | Superior a máxima operación según código |
| <b>Internos y Accesorios</b>   |      |                                                           |                                          |
| Soporte                        | -    | Columnas/patas para recipiente esférico                   |                                          |
| Instrumentación                | -    | PT redundante, TT e inventario calculado                  |                                          |
| PSV                            | -    | Incluida                                                  |                                          |
| ESD/aislamiento                | -    | Incluidos                                                 |                                          |
| Venteo                         | -    | A sistema seguro                                          |                                          |
| Detección H <sub>2</sub> / F&G | -    | Incluida                                                  |                                          |
| Acceso                         | -    | Escalera, plataforma y boca de hombre según diseño        |                                          |
| Ensayos                        | -    | END y prueba de presión según código                      |                                          |
| <b>MATERIALES</b>              |      |                                                           |                                          |
| Cuerpo                         | -    | Acero de alta resistencia apto para H <sub>2</sub>        |                                          |
| Tubuladuras                    | -    | Material apto para H <sub>2</sub> alta presión            |                                          |
| Sobreespesor corrosión         | mm   | TBD                                                       | Según material/código                    |
| Normativa                      | -    | EN 13445 / ASME VIII + normativa H <sub>2</sub> a presión |                                          |

## 13.6 Layout

NOTA: Implantación preliminar FEED. Verificar footprints y distancias de seguridad con vendor/HAZOP.



DATOS PRINCIPALES

|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| PV-100          | 23 MWp                   |
| Modulo FV       | 665 Wp l 2,384 x 1,303 m |
| Estructuras     | 372 ud - 3V31            |
| Nº de módulos   | 34.596                   |
| Inversores      | 67 inv string            |
| Centros transf. | 5 CT                     |
| EL-100          | 20 MW PEM                |
| Produccion H2   | 354 kg/h                 |
| Almacenamiento  | 8 h l 2.832 kg H2        |

EQUIPOS - ISLA H2

|            |                           |  |
|------------|---------------------------|--|
| EL-100     | 8 modulos PEM 2,5 MW      |  |
| TK-101     | Agua alimentacion 160 m3  |  |
| WTP-101    | Tratamiento agua 6,5 m3/h |  |
| IX-101     | Ion exchanger             |  |
| P-101 A/B  | Bombas recirculacion      |  |
| HY-100     | Acondicionamiento H2      |  |
| V-102      | Separador H2/H2O          |  |
| E-102      | Intercambiador            |  |
| CH-101     | Chiller ~100 kWth         |  |
| R-101      | Deoxidiser                |  |
| DR-101 A/B | Secadores H2              |  |
| BUFFER H2  | 88,5 kg l D=2,4 m         |  |
| CP-100     | 3 etapas l 2x50%          |  |
| ST-100     | Esfera ~140 m3 l D=6,44 m |  |
| OX-100     | Gestion de O2             |  |
| ELC-100    | Distribucion y control    |  |

CRITERIOS DE IMPLANTACION

- Flujo de proceso ordenado: agua -> EL -> HY -> CP -> ST.
- Equipos de H2 al exterior y con acceso perimetral.
- Viales interiores para operacion y mantenimiento.
- Separacion funcional entre proceso, electricidad y PCI.
- Trazados de proceso representados de forma esquematica.
- Distancias ATEX y seguridad: a confirmar en HAZOP/detalle.
- Huellas de packages sin dimensiones vendor: preliminares FEED.
- Dimensiones de TK-101, buffer y ST-100 segun TFM.

LEYENDA

|                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| Línea continua    | Obra civil / equipos       |
| Línea discontinua | Limite isla H2             |
| MT                | Canalizacion media tension |
| CT-01...05        | Centros de transformacion  |
| 3V31              | Estructura FV: 31 modulos  |

PROYECTO FIN DE MÁSTER - INGENIERÍA FEED

PLANO GENERAL DE IMPLANTACIÓN - PLANTA FV + ELECTRÓLISIS

Base geométrica: layout\_rev2026.dxf | Estado: BORRADOR FEED

FORMATO

A3 apaisado

PLANO

LAY-001

FECHA

05/09/2026

ESCALA

1:4000 aprox.

REVISIÓN

A

HOJA

1 / 1

## 13.7 Datasheet equipos



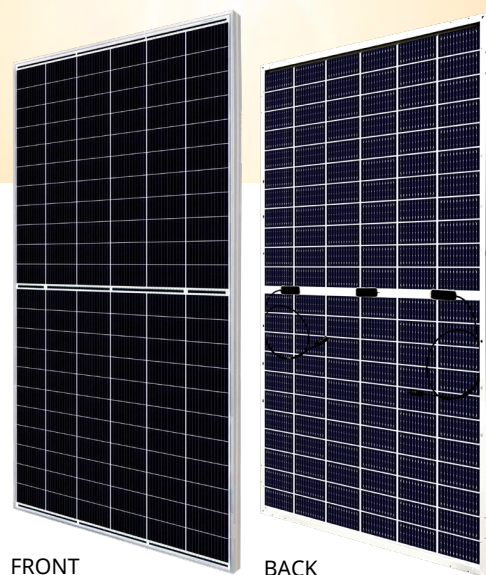
# BiHiKu7

**BIFACIAL MONO PERC**

**640 W ~ 670 W**

**CS7N-640 | 645 | 650 | 655 | 660 | 665 | 670MB-AG (IEC1000 V)**

**CS7N-640 | 645 | 650 | 655 | 660 | 665 | 670MB-AG (IEC1500 V)**



## MORE POWER



Module power up to 670 W  
Module efficiency up to 21.6 %



Up to 8.9 % lower LCOE  
Up to 4.6 % lower system cost



Comprehensive LID / LeTID mitigation technology, up to 50% lower degradation



Compatible with mainstream trackers, cost effective product for utility power plant



Better shading tolerance

## MORE RELIABLE



40 °C lower hot spot temperature, greatly reduce module failure rate



Minimizes micro-crack impacts



Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa\*



**Enhanced Product Warranty on Materials and Workmanship\***



**Linear Power Performance Warranty\***

**1<sup>st</sup> year power degradation no more than 2%  
Subsequent annual power degradation no more than 0.45%**

\*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

## MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES\*

ISO 9001:2015 / Quality management system  
ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system  
ISO 45001: 2018 / International standards for occupational health & safety

## PRODUCT CERTIFICATES\*

IEC 61215 / IEC 61730 / CE / INMETRO / MCS / UKCA  
CEC listed (US California) / FSEC (US Florida)  
UL 61730 / IEC 61701 / IEC 62716 / IEC 60068-2-68  
Take-e-way

Canadian Solar recycles panels at the end of life cycle



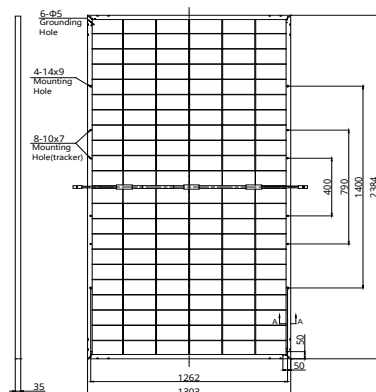
\* The specific certificates applicable to different module types and markets will vary, and therefore not all of the certifications listed herein will simultaneously apply to the products you order or use. Please contact your local Canadian Solar sales representative to confirm the specific certificates available for your Product and applicable in the regions in which the products will be used.

**CSI Solar Co., Ltd.** is committed to providing high quality solar photovoltaic modules, solar energy and battery storage solutions to customers. The company was recognized as the No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in the IHS Module Customer Insight Survey. Over the past 20 years, it has successfully delivered over 70 GW of premium-quality solar modules across the world.

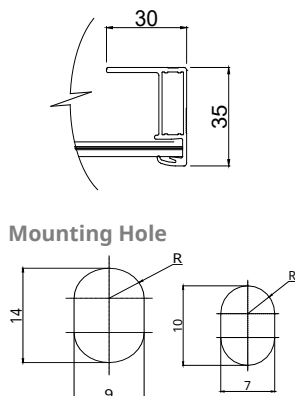
\* For detailed information, please refer to the Installation Manual.

## ENGINEERING DRAWING (mm)

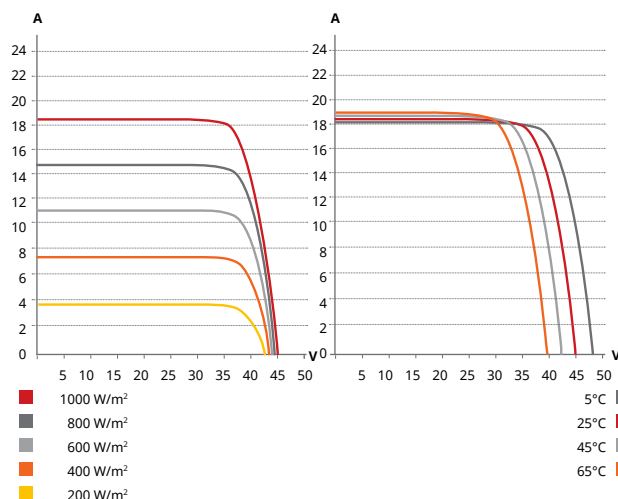
Rear View



Frame Cross Section A-A



## CS7N-650MB-AG / I-V CURVES



## ELECTRICAL DATA | STC\*

|                    |     | Nominal<br>Max.<br>Power<br>(Pmax) | Opt.<br>Operating<br>Voltage<br>(Vmp) | Opt.<br>Operating<br>Current<br>(Imp) | Open<br>Circuit<br>Voltage<br>(Voc) | Short<br>Circuit<br>Current<br>(Isc) | Module<br>Efficiency |
|--------------------|-----|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| CS7N-640MB-AG      |     | 640 W                              | 37.5 V                                | 17.07 A                               | 44.6 V                              | 18.31 A                              | 20.6%                |
| Bifacial<br>Gain** | 5%  | 672 W                              | 37.5 V                                | 17.92 A                               | 44.6 V                              | 19.23 A                              | 21.6%                |
|                    | 10% | 704 W                              | 37.5 V                                | 18.78 A                               | 44.6 V                              | 20.14 A                              | 22.7%                |
|                    | 20% | 768 W                              | 37.5 V                                | 20.48 A                               | 44.6 V                              | 21.97 A                              | 24.7%                |
| CS7N-645MB-AG      |     | 645 W                              | 37.7 V                                | 17.11 A                               | 44.8 V                              | 18.35 A                              | 20.8%                |
| Bifacial<br>Gain** | 5%  | 677 W                              | 37.7 V                                | 17.97 A                               | 44.8 V                              | 19.27 A                              | 21.8%                |
|                    | 10% | 710 W                              | 37.7 V                                | 18.84 A                               | 44.8 V                              | 20.19 A                              | 22.9%                |
|                    | 20% | 774 W                              | 37.7 V                                | 20.53 A                               | 44.8 V                              | 22.02 A                              | 24.9%                |
| CS7N-650MB-AG      |     | 650 W                              | 37.9 V                                | 17.16 A                               | 45.0 V                              | 18.39 A                              | 20.9%                |
| Bifacial<br>Gain** | 5%  | 683 W                              | 37.9 V                                | 18.03 A                               | 45.0 V                              | 19.31 A                              | 22.0%                |
|                    | 10% | 715 W                              | 37.9 V                                | 18.88 A                               | 45.0 V                              | 20.23 A                              | 23.0%                |
|                    | 20% | 780 W                              | 37.9 V                                | 20.59 A                               | 45.0 V                              | 22.07 A                              | 25.1%                |
| CS7N-655MB-AG      |     | 655 W                              | 38.1 V                                | 17.20 A                               | 45.2 V                              | 18.43 A                              | 21.1%                |
| Bifacial<br>Gain** | 5%  | 688 W                              | 38.1 V                                | 18.06 A                               | 45.2 V                              | 19.35 A                              | 22.1%                |
|                    | 10% | 721 W                              | 38.1 V                                | 18.93 A                               | 45.2 V                              | 20.27 A                              | 23.2%                |
|                    | 20% | 786 W                              | 38.1 V                                | 20.64 A                               | 45.2 V                              | 22.12 A                              | 25.3%                |
| CS7N-660MB-AG      |     | 660 W                              | 38.3 V                                | 17.24 A                               | 45.4 V                              | 18.47 A                              | 21.2%                |
| Bifacial<br>Gain** | 5%  | 693 W                              | 38.3 V                                | 18.10 A                               | 45.4 V                              | 19.39 A                              | 22.3%                |
|                    | 10% | 726 W                              | 38.3 V                                | 18.96 A                               | 45.4 V                              | 20.32 A                              | 23.4%                |
|                    | 20% | 792 W                              | 38.3 V                                | 20.69 A                               | 45.4 V                              | 22.16 A                              | 25.5%                |
| CS7N-665MB-AG      |     | 665 W                              | 38.5 V                                | 17.28 A                               | 45.6 V                              | 18.51 A                              | 21.4%                |
| Bifacial<br>Gain** | 5%  | 698 W                              | 38.5 V                                | 18.14 A                               | 45.6 V                              | 19.44 A                              | 22.5%                |
|                    | 10% | 732 W                              | 38.5 V                                | 19.02 A                               | 45.6 V                              | 20.36 A                              | 23.6%                |
|                    | 20% | 798 W                              | 38.5 V                                | 20.74 A                               | 45.6 V                              | 22.21 A                              | 25.7%                |
| CS7N-670MB-AG      |     | 670 W                              | 38.7 V                                | 17.32 A                               | 45.8 V                              | 18.55 A                              | 21.6%                |
| Bifacial<br>Gain** | 5%  | 704 W                              | 38.7 V                                | 18.20 A                               | 45.8 V                              | 19.48 A                              | 22.7%                |
|                    | 10% | 737 W                              | 38.7 V                                | 19.05 A                               | 45.8 V                              | 20.41 A                              | 23.7%                |
|                    | 20% | 804 W                              | 38.7 V                                | 20.78 A                               | 45.8 V                              | 22.26 A                              | 25.9%                |

\* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

\*\* Bifacial Gain: The additional gain from the back side compared to the power of the front side at the standard test condition. It depends on mounting (structure, height, tilt angle etc.) and albedo of the ground. Measurement uncertainty: ±3 % (Pmax).

## ELECTRICAL DATA

|                            |                                          |
|----------------------------|------------------------------------------|
| Operating Temperature      | -40°C ~ +85°C                            |
| Max. System Voltage        | 1500 V (IEC/UL) or 1000 V (IEC/UL)       |
| Module Fire Performance    | TYPE 29 (UL 61730) or CLASS C (IEC61730) |
| Max. Series Fuse Rating    | 35 A                                     |
| Application Classification | Class A                                  |
| Power Tolerance            | 0 ~ + 5 W                                |
| Power Bifaciality*         | 70 %                                     |

\* Power Bifaciality =  $\frac{P_{max, rear}}{P_{max, front}}$  /  $\frac{P_{max, front}}{P_{max, rear}}$ , both  $P_{max, rear}$  and  $P_{max, front}$  are tested under STC, Bifaciality Tolerance: ± 5 %

\* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. CSI Solar Co., Ltd. reserves the right to make necessary adjustment to the information described herein at any time without further notice.

Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

## ELECTRICAL DATA | NMOT\*

|               | Nominal Max. Power (Pmax) | Opt. Operating Voltage (Vmp) | Opt. Operating Current (Imp) | Open Circuit Voltage (Voc) | Short Circuit Current (Isc) |
|---------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| CS7N-640MB-AG | 480 W                     | 35.2 V                       | 13.64 A                      | 42.2 V                     | 14.77 A                     |
| CS7N-645MB-AG | 484 W                     | 35.3 V                       | 13.72 A                      | 42.3 V                     | 14.80 A                     |
| CS7N-650MB-AG | 487 W                     | 35.5 V                       | 13.74 A                      | 42.5 V                     | 14.83 A                     |
| CS7N-655MB-AG | 491 W                     | 35.7 V                       | 13.76 A                      | 42.7 V                     | 14.86 A                     |
| CS7N-660MB-AG | 495 W                     | 35.9 V                       | 13.79 A                      | 42.9 V                     | 14.89 A                     |
| CS7N-665MB-AG | 499 W                     | 36.1 V                       | 13.83 A                      | 43.1 V                     | 14.93 A                     |
| CS7N-670MB-AG | 502 W                     | 36.3 V                       | 13.85 A                      | 43.3 V                     | 14.96 A                     |

\* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m² spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

## MECHANICAL DATA

| Specification                      | Data                                                              |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Cell Type                          | Mono-crystalline                                                  |
| Cell Arrangement                   | 132 [2 x (11 x 6)]                                                |
| Dimensions                         | 2384 × 1303 × 35 mm (93.9 × 51.3 × 1.38 in)                       |
| Weight                             | 37.9 kg (83.6 lbs)                                                |
| Front Glass                        | 2.0 mm heat strengthened glass with anti-reflective coating       |
| Back Glass                         | 2.0 mm heat strengthened glass                                    |
| Frame                              | Anodized aluminium alloy                                          |
| J-Box                              | IP68, 3 bypass diodes                                             |
| Cable                              | 4.0 mm² (IEC), 10 AWG (UL)                                        |
| Cable Length (Including Connector) | 460 mm (18.1 in) (+) / 340 mm (13.4 in) (-) or customized length* |
| Connector                          | T6 or T4 or PV-KST4-EVO2/XY, PV-KBT4-EVO2/XY (IEC 1500 V)         |
| Per Pallet                         | 31 pieces                                                         |

Per Container (40' HQ) 527 pieces

\* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

## TEMPERATURE CHARACTERISTICS

| Specification                        | Data         |
|--------------------------------------|--------------|
| Temperature Coefficient (Pmax)       | -0.34 % / °C |
| Temperature Coefficient (Voc)        | -0.26 % / °C |
| Temperature Coefficient (Isc)        | 0.05 % / °C  |
| Nominal Module Operating Temperature | 41 ± 3°C     |

## PARTNER SECTION

Canadian Solar MSS (Australia) Pty Ltd.

44 Stephenson St, Cremorne VIC 3121, Australia, sales.au@csisolar.com, www.csisolar.com/au

June 2022. All rights reserved, PV Module Product Datasheet V2.4\_AU

\* Manufactured and assembled in China, Thailand and Vietnam.

# SG350HX

Inversor String Multi MPPT para sistemas de 1500 Vdc

NEW



## ALTO RENDIMIENTO

- Hasta 16 MPPTs con una eficiencia máxima del 99%
- 20 A por string, compatible con módulos +500Wp
- Intercambio de datos con el tracker para mejorar el rendimiento



## BAJO COSTE

- Función Q a la noche, ahorra en inversión
- Comunicación PLC
- Escaneo y diagnóstico de curva IV, O&M activo



## SEGURIDAD COMPROBADA

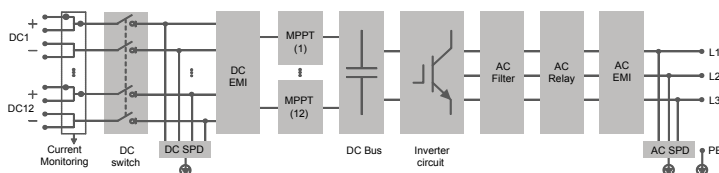
- 2 strings por MPPT, sin riesgo de conexión inversa
- Monitorización AC y DC en tiempo real
- Interruptor DC integrado, corta automáticamente el fallo



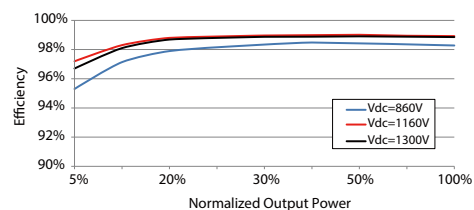
## SOPORTE DE RED

- $SCR \geq 1.16$  funcionamiento estable en redes extremadamente débiles
- Tiempo de respuesta de la potencia reactiva  $< 30ms$
- Cumple con la seguridad global y el código de red

## DIAGRAMA DEL CIRCUITO



## CURVA DE EFICIENCIA



| Denominación                                           | SG350HX                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Entrada (DC)</b>                                    |                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Tensión máxima de entrada FV                           | 1500 V                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Tensión mínima / Tensión de arranque                   | 500 V / 550 V                                                                                                                                                                                                                                              |
| Tensión de entrada nominal                             | 1080 V                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Rango de tensión MPP                                   | 500 V – 1500 V                                                                                                                                                                                                                                             |
| No. de entradas MPP independientes                     | 12 (opcional: 14/16)                                                                                                                                                                                                                                       |
| No. máximo de conectores de entrada por MPPT           | 2                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Corriente máxima de entrada FV                         | 12 * 40 A (Opcional: 14 * 30 A / 16 * 30 A)                                                                                                                                                                                                                |
| Corriente máxima de cortocircuito de DC por MPPT       | 60 A                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Salida (AC)</b>                                     |                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Potencia de salida de AC                               | 352 kVA @ 30°C / 320 kVA @40 °C / 295 kVA @50°C                                                                                                                                                                                                            |
| Corriente máxima de salida de AC                       | 254 A                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Tensión nominal de AC                                  | 3 / PE, 800 V                                                                                                                                                                                                                                              |
| Rango de tensión de AC                                 | 640 – 920V                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Frecuencia nominal de red / Rango de frecuencia de red | 50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz                                                                                                                                                                                                                     |
| THD                                                    | < 3 % (potencia nominal)                                                                                                                                                                                                                                   |
| Inyección de corriente DC                              | < 0.5 % In                                                                                                                                                                                                                                                 |
| FP a potencia nominal / FP ajustable                   | > 0.99 / 0.8 inductivo – 0.8 capacitativo                                                                                                                                                                                                                  |
| Fases de inyección / Fases de conexión                 | 3 / 3                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Eficiencia</b>                                      |                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Eficiencia máx / Eficiencia Europea / Eficiencia CEC   | 99.02 % / 98.8 % / 98.5%                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Protección</b>                                      |                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Protección de conexión DC inversa                      | Sí                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Protección de cortocircuito de AC                      | Sí                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Protección contra corriente de fuga                    | Sí                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Monitorización de red                                  | Sí                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Monitorización de fallo a tierra                       | Sí                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Interruptor DC/AC                                      | Sí / No                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Monitorización de corrientes string FV                 | Sí                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Función Q en noche                                     | Sí                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Anti-PID y Función de recuperación PID                 | Opcional                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Protección contra sobretensión                         | DC Tipo II / AC Tipo II                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Datos Generales</b>                                 |                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Dimensiones (W*H*D)                                    | 1136 * 870 * 361 mm (44.7" * 34.3" * 14.2")                                                                                                                                                                                                                |
| Peso                                                   | ≤116 kg(≤255.7 lbs)                                                                                                                                                                                                                                        |
| Método de aislamiento                                  | Sin transformador                                                                                                                                                                                                                                          |
| Grado de protección de entrada                         | IP66 (NEMA 4X)                                                                                                                                                                                                                                             |
| Consumo nocturno                                       | < 6 W                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Rango de temperatura ambiente de funcionamiento        | -30 to 60°C(-22 to 140 °F)                                                                                                                                                                                                                                 |
| Humedad relativa aceptable (sin condensación)          | 0 – 100 %                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Método de refrigeración                                | Refrigeración forzada inteligente                                                                                                                                                                                                                          |
| Altitud máxima de funcionamiento                       | 4000 m (> 3000 m derating) / 13123 ft (> 9843 ft derating)                                                                                                                                                                                                 |
| Display                                                | LED, Bluetooth+APP                                                                                                                                                                                                                                         |
| Comunicación                                           | RS485 / PLC                                                                                                                                                                                                                                                |
| Tipo de conexión DC                                    | MC4-Evo2 (Max. 6 mm <sup>2</sup> , optional 10mm <sup>2</sup> / Max. 10AWG, optional 8AWG )                                                                                                                                                                |
| Tipo de conexión AC                                    | Support OT/DT terminal (Max. 400 mm <sup>2</sup> / 789 Kcmil)                                                                                                                                                                                              |
| Certificación                                          | IEC 62109, IEC 61727, IEC 62116, IEC 60068, IEC 61683, VDE-AR-N 4110:2018, VDE-AR-N 4120:2018, EN 50549-1/2, UNE 206007-1:2013, P.O.12.3, UTE C15-712-1:2013, UL1741, UL1741SA, IEEE1547, IEEE1547.1, CSA C22.2 107.1-01-2001, California Rule 21, UL1699B |
| Soporte de red                                         | Función Q en noche, LVRT, HVRT, control de potencia activa y reactiva, control de rampa de potencia, control Q-U y control, P-f                                                                                                                            |



## MC Series Modular Plants

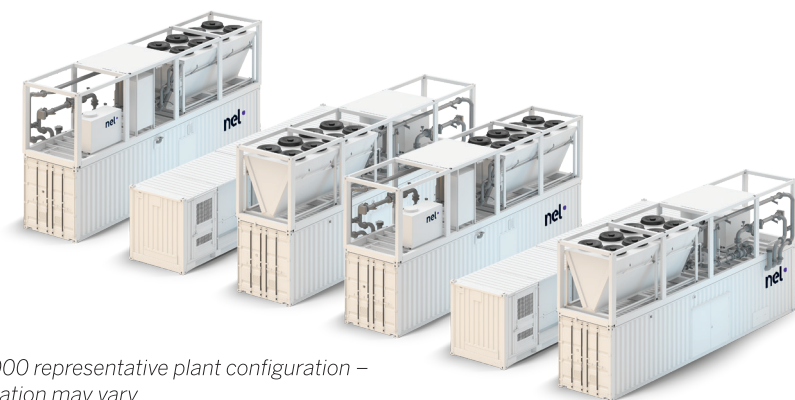
### Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyser Systems



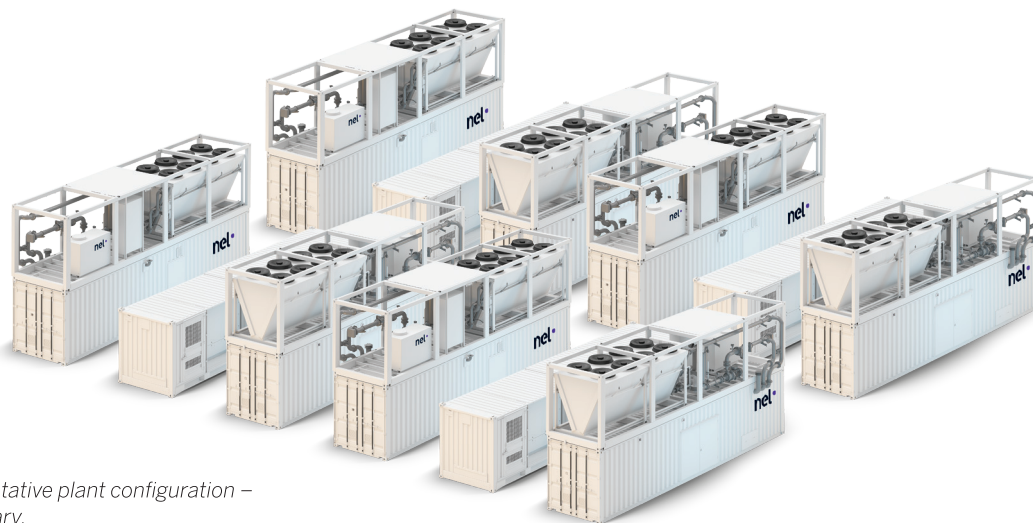
MC1000 representative plant configuration – installation may vary.

| MODEL                                                                                                | MC1000                                                                                                                                                                                                              | MC2000                       | MC4000                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Class                                                                                                | 5 MW                                                                                                                                                                                                                | 10 MW                        | 20 MW                        |
| Description                                                                                          | Fully-automated MW-class on-site hydrogen generator utilizing a modular containerized design for ease of installation and integration                                                                               |                              |                              |
| Technology                                                                                           | Proton Exchange Membrane (PEM)                                                                                                                                                                                      |                              |                              |
| HYDROGEN PRODUCTION                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                     |                              |                              |
| Nominal Production Rate<br>Nm³/h (m³/h @ 0°C, 1 bar)<br>kg/24 h                                      | 984 Nm³/h<br>2,124 kg/24 h                                                                                                                                                                                          | 1,968 Nm³/h<br>4,248 kg/24 h | 3,936 Nm³/h<br>8,496 kg/24 h |
| Delivery Pressure – Nominal                                                                          | 30 barg (435 psig); full differential pressure H <sub>2</sub> over O <sub>2</sub>                                                                                                                                   |                              |                              |
| Power Consumption at Stack per Unit<br>of H <sub>2</sub> Gas Produced at 100% Capacity <sup>1</sup>  | 4.7 kWh/Nm³<br>53.2 kWh/kg                                                                                                                                                                                          |                              |                              |
| Power Consumption by System per Unit<br>of H <sub>2</sub> Gas Produced at 100% Capacity <sup>1</sup> | 5.04 kWh/Nm³<br>56.77 kWh/kg                                                                                                                                                                                        |                              |                              |
| Purity (concentration of impurities)                                                                 | 99.95% [H <sub>2</sub> O < 500 ppm, N <sub>2</sub> < 2 ppm, O <sub>2</sub> < 1 ppm, all others undetectable]                                                                                                        |                              |                              |
| Purity (concentration of impurities<br>with optional high purity dryer)                              | ISO 14687:2019(E) Type I, Type II Grade D and SAE J-2719 Type I Grade L<br>99.999+% [H <sub>2</sub> O < 5 ppm, -65°C (-85°F) Dew Point, N <sub>2</sub> < 2 ppm, O <sub>2</sub> < 1 ppm,<br>all others undetectable] |                              |                              |
| Start-up Time (from standby)                                                                         | < 8 min                                                                                                                                                                                                             |                              |                              |
| Ramp-up Time (minimum to full load)                                                                  | < 15 sec                                                                                                                                                                                                            |                              |                              |
| Ramp Rate (% of full-range)                                                                          | ≤ 7.4% per sec                                                                                                                                                                                                      |                              |                              |
| Turndown Range                                                                                       | 20 to 100% (automatic) <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                 |                              |                              |
| POTABLE WATER REQUIREMENTS                                                                           |                                                                                                                                                                                                                     |                              |                              |
| Consumption <sup>3</sup>                                                                             | 1.5 l/Nm³ of H <sub>2</sub> (0.4 gal/Nm³ of H <sub>2</sub> )<br>15.9 l/kg of H <sub>2</sub> (4.2 gal/kg of H <sub>2</sub> )                                                                                         |                              |                              |
| Temperature                                                                                          | 5 to 35°C (41 to 95°F)                                                                                                                                                                                              |                              |                              |
| Pressure                                                                                             | 2.7 to 4.8 barg                                                                                                                                                                                                     |                              |                              |
| Input Water Quality <sup>3</sup>                                                                     | Potable, subject to site water quality analysis                                                                                                                                                                     |                              |                              |
| Water Purification System (included)                                                                 | Reverse Osmosis/Electrodeionization (RO/EDI)                                                                                                                                                                        |                              |                              |

| MODEL                                        | MC1000                                                                                                                                                                                                                         | MC2000                                         | MC4000                                            |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| ELECTRICAL SPECIFICATIONS                    |                                                                                                                                                                                                                                |                                                |                                                   |
| Electrical Requirements                      | Medium voltage: 4.16 to 35 kV, three phase 50/60 Hz<br>Low voltage, three phase required for balance of plant and ancillary equipment<br>Backup, low voltage, three phase required for emergency heating for freeze protection |                                                |                                                   |
| Power Quality (medium voltage)               | Total harmonic distortion: < 5%, power factor: > 0.9                                                                                                                                                                           |                                                |                                                   |
| PHYSICAL CHARACTERISTICS                     |                                                                                                                                                                                                                                |                                                |                                                   |
| Footprint <sup>4</sup>                       | 315 m <sup>2</sup><br>(3,400 ft <sup>2</sup> )                                                                                                                                                                                 | 561 m <sup>2</sup><br>(6,050 ft <sup>2</sup> ) | 1,053 m <sup>2</sup><br>(11,400 ft <sup>2</sup> ) |
| ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS – DO NOT FREEZE |                                                                                                                                                                                                                                |                                                |                                                   |
| Standard Siting Location                     | Outdoor, pad mounted<br>Flatness/levelness 35/25 per AC 117-10<br>Bottom access for AC and DC electrical connections, water and drains                                                                                         |                                                |                                                   |
| Storage/Transport Temperature                | 5 to 60°C (41 to 140°F)                                                                                                                                                                                                        |                                                |                                                   |
| Ambient Temperature                          | -30 to 40°C (-22 to 104°F) <sup>5</sup>                                                                                                                                                                                        |                                                |                                                   |
| Altitude Range                               | Sea level to 2,000 m (6,562 ft)                                                                                                                                                                                                |                                                |                                                   |



MC2000 representative plant configuration – installation may vary.



MC4000 representative plant configuration – installation may vary.

**nel**•

Specifications are subject to change. Please contact Nel Hydrogen for solutions to best fit your needs.

- <sup>1</sup> Beginning of life and dependent on configuration and operating conditions.
- <sup>2</sup> If lower than 20% plant turndown is required, consult Nel Engineering.
- <sup>3</sup> Potable water quality can affect usage, see SFM1087.
- <sup>4</sup> Site conditions may cause the design to vary. <sup>5</sup> High ambient temperature package available.

[www.nelhydrogen.com](http://www.nelhydrogen.com) | +1.203.949.8697 | [info@nelhydrogen.com](mailto:info@nelhydrogen.com)

© 2025 Nel – all rights reserved. Nel and the Nel logo are trademarks of Nel ASA.



PD-0600-0145 Rev A

## 13.8 Simulación PVGIS

# Rendimiento de un sistema FV conectado a red

PVGIS-5 valores estimados de la producción eléctrica solar:

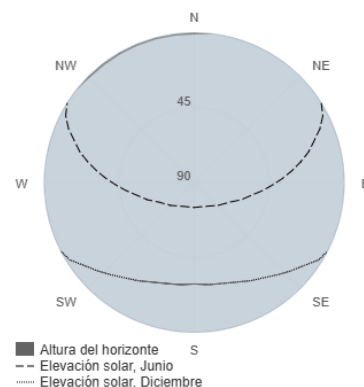
## Datos proporcionados:

Latitud/Longitud: 37.538,-5.866  
Horizonte: Calculado  
Base de datos: PVGIS-SARAH3  
Tecnología FV: Cryst Sil Original  
FV instalado: 23000 kWp  
Pérdidas sistema: 14 %

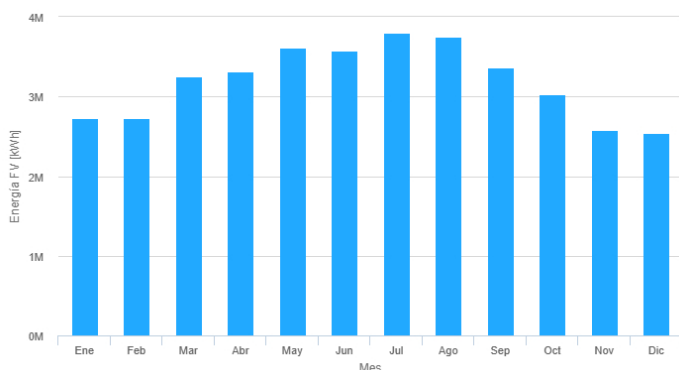
## Resultados de la simulación

Ángulo de inclinación: 35 (opt) °  
Ángulo de azimut: 0 °  
Producción anual FV: 38263720.88 kWh  
Irradiación anual: 2190.79 kWh/m²  
Variación interanual: 994452.70 kWh  
Cambios en la producción debido a:  
Ángulo de incidencia: -2.59 %  
Efectos espectrales: 0.52 %  
Temperatura y baja irradiancia: -9.82 %  
Pérdidas totales: -24.06 %

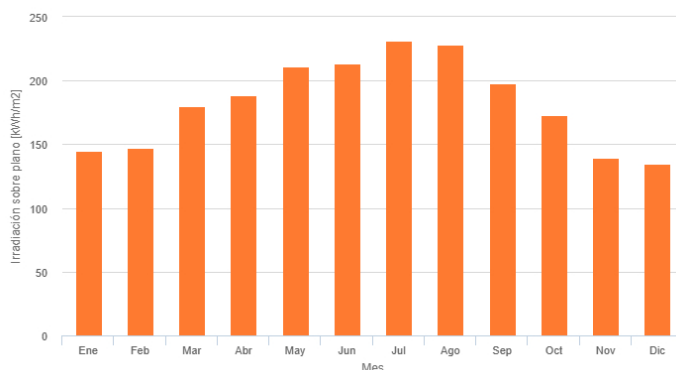
## Perfil del horizonte en la localización seleccionada



## Producción de energía mensual del sistema FV fijo:



## Irradiación mensual sobre plano fijo:



## Energía FV y radiación solar mensual

| Mes        | E_m       | H(i)_m | SD_m     |
|------------|-----------|--------|----------|
| Enero      | 2726654.7 | 4421.7 | 432190.3 |
| Febrero    | 2728052.7 | 4421.7 | 442121.8 |
| Marzo      | 3250336.7 | 4399.6 | 386849.2 |
| Abril      | 3315364.8 | 4088.6 | 240374.4 |
| Mayo       | 3613089.1 | 3111.1 | 239036.0 |
| Junio      | 3571173.3 | 283.6  | 131858.1 |
| Julio      | 3794826.3 | 311.7  | 67076.9  |
| Agosto     | 3751803.3 | 238.6  | 102934.5 |
| Septiembre | 3363009.1 | 188.0  | 159776.8 |
| Octubre    | 3028538.0 | 102.7  | 290893.6 |
| Noviembre  | 2574988.0 | 89.8   | 316869.1 |
| Diciembre  | 2545885.1 | 85.1   | 285089.7 |

E\_m: Producción eléctrica media mensual del sistema definido [kWh].

H(i)\_m: Suma media mensual de la irradiación global recibida por metro cuadrado por los módulos del sistema dado [kWh/m²].

SD\_m: Desviación estándar de la producción eléctrica mensual debida a la variación interanual [kWh].

# 14 BIBLIOGRAFÍA

---

AACE International. (2020). Cost Estimate Classification System—As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries (Recommended Practice 18R-97, revisión de 7 de agosto de 2020).

Andalucía. (2007). Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental.

Andalucía. (2021). Ley 7/2021, de 1 de diciembre, de impulso para la sostenibilidad del territorio de Andalucía.

Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). “Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440–2454.

Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). “A comprehensive review on PEM water electrolysis”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901–4934.

Consortio de Aguas del Huesna. (2024). Tarifas de abastecimiento de agua potable para los años 2024 y 2025. Sevilla, España: Consorcio de Aguas del Huesna.

CSI Solar. (s. f.). BiHiKu7: CS7N-640–665MB-AG [Ficha técnica, v2.1 EN].

Comunidad Autónoma de Andalucía. (2026). Ley 2/2026, de 12 de marzo, para la Gestión Ambiental de Andalucía. Boletín Oficial del Estado, 82, de 3 de abril de 2026

Electric Power Research Institute (2024). Water Electrolyzer Stack Degradation [Technology Brief]. Palo Alto, CA, Estados Unidos: EPRI.

European Commission. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. COM(2020) 301 final. Brussels, Belgium: European Commission.

European Commission. (2023a). Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1184 concerning the production of renewable fuels of non-biological origin. Brussels, Belgium: European Commission.

European Commission. (2023b). Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1185 concerning greenhouse-gas emission savings from renewable fuels of non-biological origin and recycled carbon fuels. Brussels, Belgium: European Commission.

Enapter. (s. f.). AEM technology by Enapter.

European Commission, Joint Research Centre. (s. f.). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Ispra, Italy: European Commission.

España. (2000). Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.

España. (2002). Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias. Madrid, España: Boletín Oficial del Estado.

España. (2013). Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.

España. (2013). Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.

España. (2014). Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus ITC-RAT 01 a 23. Madrid, España: Boletín Oficial del Estado.

España. (2016). Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación.

España. (2017). Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus ITC MIE APQ 0 a 10. Madrid, España: Boletín Oficial del Estado.

España. (2020). Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. Madrid, España: Boletín Oficial del Estado.

España. (2021). Real Decreto 809/2021, de 21 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias. Madrid, España: Boletín Oficial del Estado.

España. (2025). Real Decreto 164/2025, de 4 de marzo, Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.

European Commission, Joint Research Centre. (s. f.). \*Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): Using PVGIS 5.

Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU), 2017. Study on Early Business Cases for H<sub>2</sub> in Energy Storage and More Broadly Power to H<sub>2</sub> Applications. Brussels, Belgium: Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking.

Gardiner, M. (2009). Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs (DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 9013).

International Energy Agency. (2019). The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. Paris, France: IEA.

International Energy Agency. (2025). Global Hydrogen Review 2025. Paris, France: IEA.

International Energy Agency. (s. f.). Electrolysers.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 10628-1:2014. Diagrams for the chemical and petrochemical industry—Part 1: Specification of diagrams

International Organization for Standardization. (2015). ISO/TR 15916:2015. Basic considerations for the safety of hydrogen systems. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2019a). ISO 14687:2019. Hydrogen fuel quality — Product specification. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2019b). ISO 22734:2019. Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applications. Geneva, Switzerland: ISO.

International Renewable Energy Agency. (2020). Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IRENA.

International Renewable Energy Agency. (2025). Renewable Power Generation Costs in 2024.

International Society of Automation. (2024). ANSI/ISA-5.1-2024. Instrumentation and Control Symbols and Identification.

Junta de Andalucía. (2012). Decreto 5/2012, de 17 de enero, por el que se regula la autorización ambiental integrada y se modifica el Decreto 356/2010, de 3 de agosto, por el que se regula la autorización ambiental unificada.

Junta de Andalucía. (2025). Decreto 50/2025, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento para la preservación de la calidad acústica en Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, 42, de 4 de marzo de 2025

Lienhard, J. H. IV, & Lienhard, J. H. V. (2024). A Heat Transfer Textbook (6th ed.). Cambridge, MA, Estados Unidos: Phlogiston Press.

National Institute of Standards and Technology. (s. f.). Hydrogen. En NIST Chemistry WebBook, SRD 69.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable. Madrid, España: Gobierno de España.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023–2030. Madrid, España: Gobierno de España.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2025).

National Renewable Energy Laboratory. (s. f.). H2A: Hydrogen Analysis Production Models. Golden, CO, Estados Unidos: U.S. Department of Energy.

Nel Hydrogen. (s. f.). MC Series Modular Plants[Ficha técnica, PD-0600-0145, rev. A]

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., y West, R. E. (2003). Plant design and economics for chemical engineers (5th ed.). New York, NY, Estados Unidos: McGraw-Hill.

Royal Society of Chemistry. (s. f.). Hydrogen.

Santos, D. M. F., Sequeira, C. A. C., y Figueiredo, J. L. (2013). Hydrogen production by alkaline water electrolysis.

Shiva Kumar, S., y Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. Materials Science for Energy Technologies, 2(3), 442–454.

Towler, G., y Sinnott, R. (2022). Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant

and process design (3rd ed.). Oxford, United Kingdom: Elsevier.

U.S. Department of Energy. (2019, 3 de diciembre). PV Cells 101: A Primer on the Solar Photovoltaic Cell.

U.S. Department of Energy. (s. f.-b). H2A Analysis.

U.S. Department of Energy. (s. f.-c). Solar Photovoltaic Cell Basics

Wang, J. (2020, 20 de octubre). AEM Water Electrolysis: How it Works. Enapte

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: An Engineering Approach (8th ed.). McGraw-Hill Education.