



Manual del Usuario: Herramienta para evaluar proyectos de producción de hidrógeno verde



Edición:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Descarbonización del Sector Energía en Chile

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:

Rodrigo Vásquez

En coordinación:

Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II
Santiago de Chile
T +56 22 367 3000
I www.energia.gob.cl

Primera edición digital: septiembre 2022

Cita:

Título: Manual del usuario: Herramienta para evaluar proyectos de hidrógeno verde

Autor: GIZ, E2BIZ.

Edición: José Fuster Justiniano.

Santiago de Chile, 2022.

59 páginas

Energía Renovable – Hidrógeno verde - Financiamiento

**Aclaración:**

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Descarbonización del Sector Energía en Chile" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa internacional sobre el clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania - BMU. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Santiago de Chile, 29 de septiembre de 2022

CONTENIDO

Contenido.....	4
Tablas	6
Figuras.....	7
1 Introducción	9
2 Descripción general de la herramienta.....	10
2.1 Estructura de la herramienta	10
2.2 Cómo usar la herramienta	15
2.3 Etapas de cálculo	18
2.4 Alcances de la herramienta	20
3 Cadena de valor del hidrógeno.....	21
3.1 Demanda de Hidrógeno Verde	21
3.1.1 Producción de hidrógeno para flota de buses de larga autonomía	21
3.1.2 Sistema aislado de producción de electricidad mediante celdas de combustible	22
3.1.3 Producción de hidrógeno verde general (no asociado a una aplicación específica)	22
3.2 Generación eléctrica (solar FV o eólica)	23
3.2.1 Planta solar fotovoltaica	24
3.2.1.1 Generación fotovoltaica monofacial	25
3.2.1.2 Generación fotovoltaica bifacial	26
3.2.2 Planta eólica.....	27
3.2.3 Perfiles de radiación solar y velocidad del viento	28
3.2.4 CAPEX planta fotovoltaica/eólica.....	30
3.3 Dimensionamiento de la planta de electrólisis	31
3.3.1 Selección del electrolizador.....	31
3.3.2 Tamaño y costos del compresor	34
3.3.2.1 Dimensionamiento del compresor	34
3.3.2.2 Estimación de costos del compresor	35
3.3.3 Almacenamiento y transporte.....	36
3.3.3.1 Almacenamiento.....	37
3.3.3.2 Transporte	39

4	Evaluación financiera - económica.....	40
4.1	Flujos de producción y consumo	40
4.1.1	Generación ERNC.....	40
4.1.2	Consumo de energía eléctrica.....	40
4.1.3	Inyección/retiros de energía	41
4.1.4	Producción de hidrógeno	42
4.1.5	Consumo de agua	42
4.2	Ingresos operacionales	43
4.3	Costos fijos y operacionales	44
4.3.1	Costos variables	44
4.3.2	Costos fijos	46
4.4	CAPEX recambio de <i>stacks</i>	47
4.5	Depreciación	48
4.6	Costos financieros	49
5	Resultados	52
6	Análisis de sensibilidad	54
7	Bibliografía	56

TABLAS

Tabla 1: Tipos de hojas de cálculo de la herramienta.....	10
Tabla 2: Hojas de cálculo de la herramienta y contenido	11
Tabla 3: Formato según tipo de celda.....	16
Tabla 4: Ejemplo uso de "valores por defecto" (sección A, hoja "Datos usuario avanzado").....	16
Tabla 5: Supuestos modelo generación solar.	25
Tabla 6: Supuestos modelo generación eólico.....	28
Tabla 7: Parámetros costos operacionales.	45
Tabla 8: Parámetros evaluación financiera.....	49
Tabla 9: Cálculo de indicadores de resultado.	53

FIGURAS

Figura 1: Selección de tipo de proyecto.....	15
Figura 2: Nivel de completitud de datos.....	16
Figura 3: Revisión de parámetros incompletos.	17
Figura 4: Análisis de sensibilidad.....	18
Figura 5: Esquema con etapas de cálculo, proyecto de generación eléctrica mediante celdas de combustible.....	19
Figura 6: Campos para estimación de demanda de hidrógeno para proyecto de buses de larga autonomía.....	21
Figura 7: Campos para estimación de demanda de hidrógeno para proyecto de generación de electricidad mediante celdas de combustibe.....	22
Figura 8: Campo para estimación de demanda de hidrógeno para proyecto de producción de H2 general.....	22
Figura 9: Selección de parámetros básicos para la definición de la central de generación ERNC.	23
Figura 10: Selección avanzada de parámetros para la generación solar fotovoltaica.	24
Figura 11: Generación eléctrica horaria para una planta tipo de 1 MW de potencia instalada.....	27
Figura 12: Ejemplo de perfil de generación eléctrica horaria para un aerogenerador Vestas / V117-3.45 / Capacidad 3450 kW.....	28
Figura 13: Perfiles del recurso solar y eólico por defecto.....	29
Figura 14: Selección de perfiles de radiación personalizados.....	29
Figura 15: Perfiles de recursos solar y eólico personalizados.....	30
Figura 16: Selección de costos de inversión para planta fotovoltaica/eólica.....	30
Figura 17: Costo de inversión según tamaño.....	31
Figura 18: Factores de escala según capacidad de planta.....	31
Figura 19: Costos de inversión por defecto para planta fotovoltaica/eólica.....	31
Figura 20: Selección automática del electrolizador.....	32
Figura 21: Listado de electrolizadores disponibles en catalogo.....	33
Figura 22: Ejemplo de selección de electrolizador personalizado por el usuario.....	33
Figura 23: Estimación de potencia y número de etapas de compresión.....	35
Figura 24: Resumen datos del compresor.....	36
Figura 25: Parámetros básicos para el transporte y almacenamiento.....	36
Figura 26: Determinación del factor de compresibilidad (Z) del hidrógeno.....	37
Figura 27: Parámetros avanzados de almacenamiento.....	38

Figura 28: Estimación de costos de almacenamiento de hidrógeno.....	38
Figura 29: Selección de parámetros avanzados de transporte.	39
Figura 30: costos unitarios de transporte como función de la distancia para largas distancias.....	39
Figura 31: Parámetro de inflación, hojas de Evaluación.....	43
Figura 32: Parámetro de inflación, hojas de Evaluación.....	43
Figura 33: Parámetros ajustados por inflación, hoja "Datos usuario avanzado".....	44
Figura 34: Precios de compra de energía y agua, hojas de Evaluación.	46
Figura 35: Parámetros ajustados por inflación, hoja "Datos usuario avanzado".....	46
Figura 36: Costos de inversión planta de electrólisis, hoja "Inversiones".	47
Figura 37: Proyección de precios de stacks, hoja "Proyección de precios".....	47
Figura 38: Tipo de depreciación, hojas datos de entrada ("Evaluación – Buses", "Evaluación – Celdas" o "Evaluación – General" según corresponda).....	48
Figura 39: Parámetros financieros usuario avanzado, hoja "Datos usuario avanzado".....	49
Figura 40: Parámetros financieros, hojas de evaluación	49
Figura 41: Flujo de caja libre, hoja "Flujo de caja".....	50
Figura 42: Salida de resultados.	52
Figura 43: Salidas de análisis de sensibilidad para VAN.....	54

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde al manual de uso de la herramienta de evaluación de proyectos de hidrógeno verde desarrollada en el marco de la consultoría "Elaboración de una herramienta para evaluar aspectos técnicos y financieros de proyectos de hidrógeno verde" para la *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*.

La herramienta mencionada fue desarrollada en Microsoft Excel y permite a los usuarios dimensionar y evaluar tres tipos de proyectos: 1) producción de hidrógeno verde para buses de larga autonomía, 2) producción de hidrógeno verde para producción de electricidad mediante celdas de combustible o 3) producción de hidrógeno verde para un proyecto general no asociado a un uso final específico del hidrógeno.

La herramienta tiene por objetivo principal apoyar al sector financiero con la evaluación preliminar de este tipo de proyectos, permitiendo la identificación de los principales ítems y costos, así como los márgenes de proyectos de hidrógeno.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA HERRAMIENTA

La herramienta diseñada corresponde a un modelo de evaluación económica de proyectos de producción de hidrógeno verde (HV) que permite dimensionar y evaluar tres tipos de proyectos:

- Uso del hidrógeno verde para buses de larga autonomía.
- Producción de electricidad mediante celdas de combustible.
- Producción de hidrógeno verde (no asociado a una aplicación final específica).

En términos generales, la herramienta solicita una serie de parámetros técnicos, económicos y financieros; a partir de los cuales entrega distintos resultados en forma gráfica o en tablas¹. La herramienta contiene 29 hojas de cálculo que son presentadas con colores de acuerdo con el tipo de información que presenta o solicita:

Tabla 1: Tipos de hojas de cálculo de la herramienta.

Hoja	Descripción
Hojas de color amarillo	Corresponden a hojas informativas que sirven para describir la herramienta o la evaluación de los proyectos.
Hojas de color verde	Corresponden a hojas en las que se solicita que el usuario ingrese información.
Hojas de color azul	Corresponden a hojas en las que se realizan cálculos intermedios para la evaluación.
Hojas de color rojo	Corresponden a hojas auxiliares que son utilizadas por las distintas macros contenidas en la herramienta. Se recomienda no modificar estas hojas.

Puesto que la herramienta utiliza macros para realizar los distintos cálculos, las hojas se encuentran protegidas y solo es posible realizar cambios en las celdas donde se solicita ingresar datos al usuario. En la hoja "*Auxiliar_ID*" se ha agregado un botón para desproteger las hojas de la herramienta en el caso de que usuarios más avanzados deseen explorar o modificar la herramienta. Es importante señalar que al desproteger la herramienta y realizar cambios en la estructura, es posible que la herramienta no pueda funcionar en forma correcta².

2.1 Estructura de la herramienta

Las hojas de cálculo de la herramienta y el contenido de las mismas se detallan a continuación:

¹ En la sección 5 se detallan los resultados que se entregan.

² Esto debido a que las macros hacen referencia a celdas específicas de distintas hojas. Al reubicar una celda o agregar filas o columnas, estas macros harán referencia a valores que no corresponden a los correctos.

Tabla 2: Hojas de cálculo de la herramienta y contenido

Hoja de cálculo	Descripción	Editabilidad
Portada	Portada de la herramienta donde se presentan los tres tipos de proyectos posibles de evaluar. Como primer paso el usuario debe seleccionar el tipo de proyecto que va a evaluar. Al seleccionar el tipo de proyecto se muestran las hojas de Esquema y Evaluación asociadas.	Editable: El usuario puede seleccionar el tipo de proyecto a evaluar.
Descripción herramienta	Se describe en forma general la herramienta, las hojas de cálculo que la componen, el modo de uso según el tipo de usuario, y las salidas de resultados.	No editable
Esquema - Buses	Presenta una descripción del tipo de proyecto y los alcances de la evaluación. Se incluye además un esquema de las etapas que incluye el tipo de proyecto y los respectivos parámetros utilizados. En cada parámetro se ha incluido una nota con la descripción de este. Esta hoja es visible solo en el caso de que se haya seleccionado la opción "Transporte: Buses de larga autonomía".	No editable
Esquema - Celdas	Presenta una descripción del tipo de proyecto y los alcances de la evaluación. Se incluye además un esquema de las etapas que incluye el tipo de proyecto y los respectivos parámetros utilizados. En cada parámetro se ha incluido una nota con la descripción de este. La hoja es visible solo en el caso de que se haya seleccionado la opción "Aplicación estacionaria: producción de electricidad mediante celdas de combustible".	No editable
Esquema - General	Presenta una descripción del tipo de proyecto y los alcances de la evaluación. Se incluye además un esquema de las etapas que incluye el tipo de proyecto y los respectivos parámetros utilizados. En cada parámetro se ha incluido una nota con la descripción de este. La hoja es visible solo en el caso de que se haya seleccionado la opción "Producción de hidrógeno verde (no asociado a una aplicación específica)".	No editable
Evaluación - Buses	Se ingresan las principales variables para la evaluación de un proyecto de este tipo. Se ingresan variables que definen la demanda de hidrógeno, los parámetros de generación eléctrica ERNC y las variables económicas y financieras. Se presentan los principales resultados en formato numérico y gráfico, además de los análisis de sensibilidad para determinadas variables. Hoja visible solo en caso de seleccionar la opción "Transporte: Buses de larga autonomía" en la hoja "Portada".	Editable: El usuario debe ingresar una serie de parámetros técnicos, económicos y financieros.
Evaluación - Celdas	Se ingresan las principales variables para la evaluación de un proyecto de este tipo. Se ingresan variables que definen la demanda, los parámetros de generación eléctrica ERNC y las variables económicas y financieras. Se presentan los principales resultados en formato numérico y gráfico, además de los análisis de sensibilidad para determinadas variables. Hoja visible solo en caso de seleccionar la opción "Aplicación estacionaria: producción de electricidad mediante celdas de combustible" en la hoja "Portada".	Editable: El usuario debe ingresar una serie de parámetros técnicos, económicos y financieros.

Hoja de cálculo	Descripción	Editabilidad
Evaluación General	Se ingresan las principales variables para la evaluación de un proyecto de este tipo. Se ingresan variables que definen la demanda, los parámetros de generación eléctrica ERNC y las variables económicas y financieras. Se presentan los principales resultados en formato numérico y gráfico, además de los análisis de sensibilidad para determinadas variables. Hoja visible solo en caso de seleccionar la opción "Producción de hidrógeno verde (no asociado a una aplicación específica)" en la hoja "Portada".	Editable: El usuario debe ingresar una serie de parámetros técnicos, económicos y financieros.
Datos usuario avanzado	Se presentan los parámetros que requieren de un mayor grado de conocimiento por parte del usuario a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno o de la evaluación económica. En las distintas etapas se incluye la opción de "Valor por defecto", lo que permite utilizar valores por defecto ofrecidas por la herramienta. Se incluyen algunos cálculos intermedios obtenidos a partir de los parámetros y otros supuestos contenidos en la herramienta.	Editable: El usuario debe ingresar una serie de parámetros técnicos y financieros o, alternatively, elegir valores por defecto sugeridos por la herramienta.
Flujo de caja	Se desarrollan los flujos de caja del tipo de proyecto con resolución temporal anual.	No editable
Cálculos mensuales	Se calculan flujos de producción y consumo a nivel mensual. A partir de estos valores y de las proyecciones de precio de la hoja "Proyección de precios", se calculan los costos e ingresos.	No editable
Proyección de precios	Se proyectan los precios hasta el año 2050 para los stacks de distintos tipos de electrolizador.	No editable
Inversiones	Se estiman los costos de inversión de las unidades principales del proyecto. Se extraen los costos de inversión calculados a partir del dimensionamiento de equipos y/o los costos definidos por el usuario. Se estiman los costos de inversión de las unidades de generación ERNC a partir de los costos unitarios de inversión y su tamaño.	No editable
Depreciación	Se calculan los montos anuales de depreciación de los activos.	No editable
Costos transporte & almacenamiento	Se estiman los costos de transporte en base a los parámetros de transporte seleccionados por el usuario avanzado. Se definen costos de transporte de corta y larga distancia. Si el usuario escoge que el consumo del hidrógeno es in-situ, entonces los costos de transporte son iguales a cero. Se estiman los costos de almacenamiento en función de la cantidad, los días de autonomía y la presión de almacenamiento. Este se limita solo al almacenamiento en estado gaseoso.	No editable
Costo compresor	Se estiman los costos de inversión de un compresor reciprocante multietapas a partir de su potencia estimada. Para esto se utilizan los parámetros de operación del sistema.	No editable
Factor de compresibilidad	A partir de los parámetros de almacenamiento (presión y temperatura) se estima un factor de compresibilidad que permite estimar volúmenes reales de los estanques para el almacenamiento de hidrógeno.	No editable

Hoja de cálculo	Descripción	Editabilidad
Matrices horarias	A partir de la selección de parámetros técnicos del proyecto se calcula la producción horaria de hidrógeno y el consumo eléctrico e hídrico asociado para un día tipo de cada mes. En función de la ubicación del proyecto, la tecnología y la capacidad, se estima la generación horaria de energía eléctrica para un día tipo de cada mes. A partir de lo anterior, se calculan los excedentes y retiros de energía.	No editable
Generación eólica	Se estima la generación eléctrica horaria para un día tipo de cada mes en función del perfil del recurso eólico (ingresado por defecto a partir de la locación seleccionada, o ingresada por el usuario), los parámetros del aerogenerador seleccionado y el número de unidades seleccionadas.	No editable
Generación solar	Se estima la generación eléctrica horaria para un día tipo de cada mes en función del perfil del recurso solar o radiación (por defecto a partir de la locación seleccionada, o ingresada manualmente por el usuario), y la capacidad nominal de la planta de generación solar fotovoltaica.	Editable: Usuario puede elegir tipo de suelo para el cálculo del recurso solar con paneles bifaciales.
Perfiles usuario S&E	En esta pestaña el usuario puede ingresar manualmente un perfil de radiación horaria o un perfil de velocidad de viento horaria para un día tipo de cada mes, de una locación distinta a las ofrecidas por defecto para cada recurso. Estas, por ejemplo, pueden ser extraídas del Explorador Solar (https://solar.minenergia.cl/inicio) y del Explorador Eólico (https://eolico.minenergia.cl/inicio), ambos del Ministerio de Energía de Chile.	Editable: Usuario puede ingresar un perfil de radiación horaria o un perfil de velocidad de viento horaria para la localidad donde se emplazará el proyecto.
Perfiles S&E por defecto	En esta pestaña se encuentra la base de datos de los perfiles horarios de recurso solar y eólico para cada una de las locaciones disponibles en función de la tecnología seleccionada (eólica o solar fotovoltaica). Se ha escogido el perfil de una comuna por región a partir del Explorador Solar (https://solar.minenergia.cl/inicio) y del Explorador Eólico (https://eolico.minenergia.cl/inicio), ambos del Ministerio de Energía de Chile.	No editable
Datos aerogeneradores	Se enlista un set de aerogeneradores comúnmente utilizados en el mercado y sus curvas de potencia en función de la velocidad del viento. En esta hoja es posible ingresar la curva de un aerogenerador definido por el usuario.	Editable: El usuario puede ingresar la curva de potencia de un generador en particular que desee evaluar.
Datos electrolizadores	Cuenta con un set de modelos de electrolizadores cotizados por GIZ en 2021 con sus principales características técnicas y económicas. En base a la demanda de hidrógeno de los proyectos evaluados, la herramienta recomienda uno de los electrolizadores en el caso de que se opte por la opción de "Valor por defecto".	No editable
Parámetros técnicos	Contiene los valores de los parámetros técnicos utilizados en la herramienta en las distintas etapas de la evaluación.	No editable
Auxiliar_chequeo	Hoja auxiliar que permite identificar si se han completado todos los parámetros necesarios para realizar la evaluación. Los parámetros que no hayan sido completados se destacarán con color rojo. Se ha incluido un enlace a cada parámetro de manera de facilitar el llenado de estos.	No editable

Hoja de cálculo	Descripción	Editabilidad
Auxiliar_gráficos	Hoja auxiliar que permite compilar los resultados que son graficados. Los gráficos construidos a partir de los datos de esta pestaña son presentados en las hojas "Evaluación - Buses", "Evaluación - Celdas" o "Evaluación - General", según sea el caso evaluado.	No editable
Auxiliar_off_grid	Hoja auxiliar destinada únicamente al desarrollo de una macro para determinar un electrolizador y la capacidad de la planta ERNC que optimizan el costo de inversión y satisfacer la demanda diaria de hidrógeno. Fundamental para la evaluación de proyectos off grid.	No editable
Auxiliar_ID	Hoja auxiliar que contiene matrices útiles exclusivamente para el desarrollador. A esta pestaña están unidos todos los botones y opciones de elección que los usuarios realicen en otras pestañas.	No editable

2.2 Cómo usar la herramienta

La herramienta está diseñada para ser utilizada por usuarios que posean distintos niveles de conocimientos a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno. Algunos de los parámetros solicitados se consideran básicos para realizar las evaluaciones, mientras que otros son de carácter técnico y pueden requerir de mayores conocimientos por parte de los usuarios. A continuación, se detallan los pasos para completar los parámetros solicitados y realizar la evaluación:

1. Como primer paso se debe seleccionar el tipo de proyecto que se va a evaluar desde la hoja "Portada".



Figura 1: Selección de tipo de proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

2. Una vez seleccionado el tipo de proyecto, aparecerán las hojas "Evaluación - Buses", "Evaluación - Celdas" o "Evaluación - General", en función de la selección realizada. Los parámetros básicos que deben ser completados por el usuario se encuentran en estas hojas y se distinguen por su color verde claro. Es importante mencionar que, dependiendo de la selección que haga el usuario de ciertos parámetros, algunas celdas aparecerán tachadas y no deben ser modificadas.

Tabla 3: Formato según tipo de celda.

Color de celda	Tipo de celda
	Celdas de color verde claro corresponden a celdas modificables por el usuario.
	Celdas de color verde oscuro corresponden a celdas con cálculos propios de la herramienta.
	Celdas tachadas corresponden a celdas que se han bloqueado y que no necesitan ser modificadas por el usuario.

- Posteriormente, en caso de que el usuario lo desee, se deben completar los datos solicitados en la hoja "*Datos usuario avanzado*". En esta etapa el usuario puede agregar sus propios valores en las celdas de color verde claro o alternatively puede presionar los botones de "Valor por defecto" cuando no tenga mayor información. Al igual que en el caso anterior, las celdas que deben ser completadas por el usuario aparecen con color verde claro.

Tabla 4: Ejemplo uso de "valores por defecto" (sección A, hoja "*Datos usuario avanzado*").

Cadena de Valor del Hidrógeno			
A. Características del proyecto			
Parámetros de operación	Valor por defecto	Valor usuario	Unidad
Factor de Planta (on grid)	85%		%
Presión de descarga	200		bar

- Para verificar que hayan sido completados todos los datos, se ha incluido una celda que indica el nivel de completitud de los datos. Para esto, debe dirigirse a la celda M3 de la hoja "*Evaluación - Buses*", "*Evaluación - Celdas*" o "*Evaluación - General*", según corresponda, y verificar que el valor mostrado sea 100%. En caso de que exista algún parámetro que aún no haya sido completado, puede pinchar el link junto a la celda. Este link lo llevará a la hoja "*Auxiliar_chequeo*", donde se destacarán en color rojo las celdas que no hayan sido completadas. Junto a cada celda se ha incluido un link que lo posicionará directamente en el parámetro para ser completado.

	A	B	C	K	L	M
1	Índice			Resultados		
3		Portada			Completitud de parámetros	100%
4		Descripción herramienta			Para revisar los parámetros que no han sido completados hacer click aquí.	

Figura 2: Nivel de completitud de datos.

	A	B	C	D	E	H	I
1		Índice			Chequeo completitud de datos		
3		<i>Portada</i>			Hoja Datos de Entrada		
4		<i>Descripción herramienta</i>			Parámetros técnicos	Caso	Celdas Link
5		<i>Esquema - Buses</i>			Tamaño de la flota de buses	-	-
6		<i>Esquema - Celdas</i>			Nivel de actividad promedio de buses	-	-
7		<i>Esquema - General</i>			Consumo de H2 de buses	-	-
8		<i>Evaluación - Buses</i>			Potencia Eléctrica Nominal	Completo	<i>Potencia Eléctrica Nominal</i>
9		<i>Evaluación - Celdas</i>			Tiempo diario de operación	Completo	<i>Tiempo diario de operación</i>
10		<i>Evaluación - General</i>			Demanda diaria	-	-
11		<i>Datos usuario avanzado</i>			Presión de Abastecimiento	-	-
12		<i>Flujo de caja</i>			Recurso utilizado	Completo	<i>Recurso utilizado</i>
13		<i>Cálculos mensuales</i>			Conexión a la red	Completo	<i>Conexión a la red</i>
14		<i>Proyección de precios</i>			Ciudad analizada	Incompleto	<i>Ciudad analizada</i>
15		<i>Inversiones</i>			Capacidad nominal de la planta	Completo	<i>Capacidad nominal de la planta</i>
16		<i>Depreciación</i>			Selección del aerogenerador	Completo	<i>Selección del aerogenerador</i>
17		<i>Costos transporte & alm</i>			Cantidad de aerogeneradores	Completo	<i>Cantidad de aerogeneradores</i>
18		<i>Costos compresor</i>			¿El consumo de H2 es in situ?	Completo	<i>Consumo in situ</i>
19		<i>Factor de compresibilidad</i>			Días de autonomía de almacenamiento	Completo	<i>Días de autonomía</i>
20		<i>Matrices horarias</i>					
21		<i>Generación eólica</i>			Parámetros financieros	Caso	Celdas Link
22		<i>Generación solar</i>			Año de inicio de la evaluación	Completo	<i>Año de inicio</i>
23		<i>Perfiles S&E usuario</i>			Mes de inicio	Completo	<i>Mes de inicio</i>
24		<i>Perfiles S&E por defecto</i>			Periodo de evaluación	Completo	<i>Periodo de evaluación</i>
25		<i>Datos aerogeneradores</i>			Apalancamiento	Completo	<i>Apalancamiento</i>
26		<i>Datos electrolizador</i>			Tasa de interés anual	Completo	<i>Tasa de interés anual</i>
27		<i>Parámetros técnicos</i>			Periodo préstamo	Completo	<i>Periodo préstamo</i>
28		<i>Auxiliar_chequeo</i>			Periodo de gracia	Completo	<i>Periodo de gracia</i>
29		<i>Auxiliar_gráficos</i>			Precio venta de energía	Completo	<i>Precio venta de energía</i>
30		<i>Auxiliar_off_grid</i>			Precio compra de energía	Completo	<i>Precio compra de energía</i>
31		<i>Auxiliar_ID</i>			Auxiliar	Completo	<i>Auxiliar</i>
		Perfiles S&E por defecto	Datos aerogeneradores	Datos electrolizador	Parámetros técnicos	Auxiliar_chequeo	Auxiliar

Figura 3: Revisión de parámetros incompletos.

- Una vez completados todos los datos, se debe presionar el botón "*Calcular resultados*" en la hoja "*Evaluación - Buses*", "*Evaluación - Celdas*" o "*Evaluación - General*", según corresponda. Este botón activa distintas macros que permiten realizar los cálculos. El tiempo de ejecución de esta macro dependerá de la configuración seleccionada para los distintos parámetros de la evaluación y puede tardar unos minutos.
- Si desea realizar un análisis de sensibilidad, debe dirigirse a la columna "X" en la hoja "*Evaluación - Buses*", "*Evaluación - Celdas*" o "*Evaluación - General*", según corresponda, y seleccionar los parámetros sobre los cuales se hará la sensibilización (celdas AB9, Y12, AB22, Y25), luego seleccionar las variaciones que se realizarán para cada variable (celdas Z9, Z10, Z22, Z23), y finalmente presionar el botón "*Sensibilización*". Al igual que en el caso anterior, este botón activa una macro que realiza todas las combinaciones, lo cual puede tardar algunos minutos.

	A	B	C	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
1	Índice			Sensibilización									
3	Portada			Sensibilización			La sensibilización se realiza mediante la activación de una macro escogidas (variables técnicas y financieras) y presenta los resultados						
4	Descripción herramienta												
5	Esquema - Buses												
6	Esquema - Celdas												
7	Esquema - General												
8	Evaluación - Buses												
9	Evaluación - Celdas												
10	Evaluación - General												
11	Datos usuario avanzado												
12	Flujo de caja												
13	Cálculos mensuales												
14	Proyección de precios												
15	Inversiones												
16	Depreciación												
17	Costos transporte & alm												
18	Costos compresor												
19	Factor de compresibilidad												
20	Matrices horarias												
21	Generación eólica												
22	Generación solar												
23	Perfiles S&E usuario												
24	Perfiles S&E por defecto												
25	Datos aerogeneradores												
26	Datos electrolizador												
27	Parámetros técnicos												
28	Auxiliar_chequeo												
29	Auxiliar_gráficos												
30	Auxiliar_off_grid												
31	Auxiliar_ID												
32													
33													
	Esquema - Buses			Esquema - Celdas			Esquema - General			Evaluación - Celdas			Datos usuario avanzado

Figura 4: Análisis de sensibilidad.

2.3 Etapas de cálculo

El esquema general de los cálculos de cada tipo de proyecto se presenta en las hojas "Esquema – Buses", "Esquema – Celdas" y "Esquema – General". En estas hojas se presentan gráficamente las etapas y parámetros de la cadena de valor. Además, se describen los distintos parámetros solicitados al posicionarse sobre cada celda.

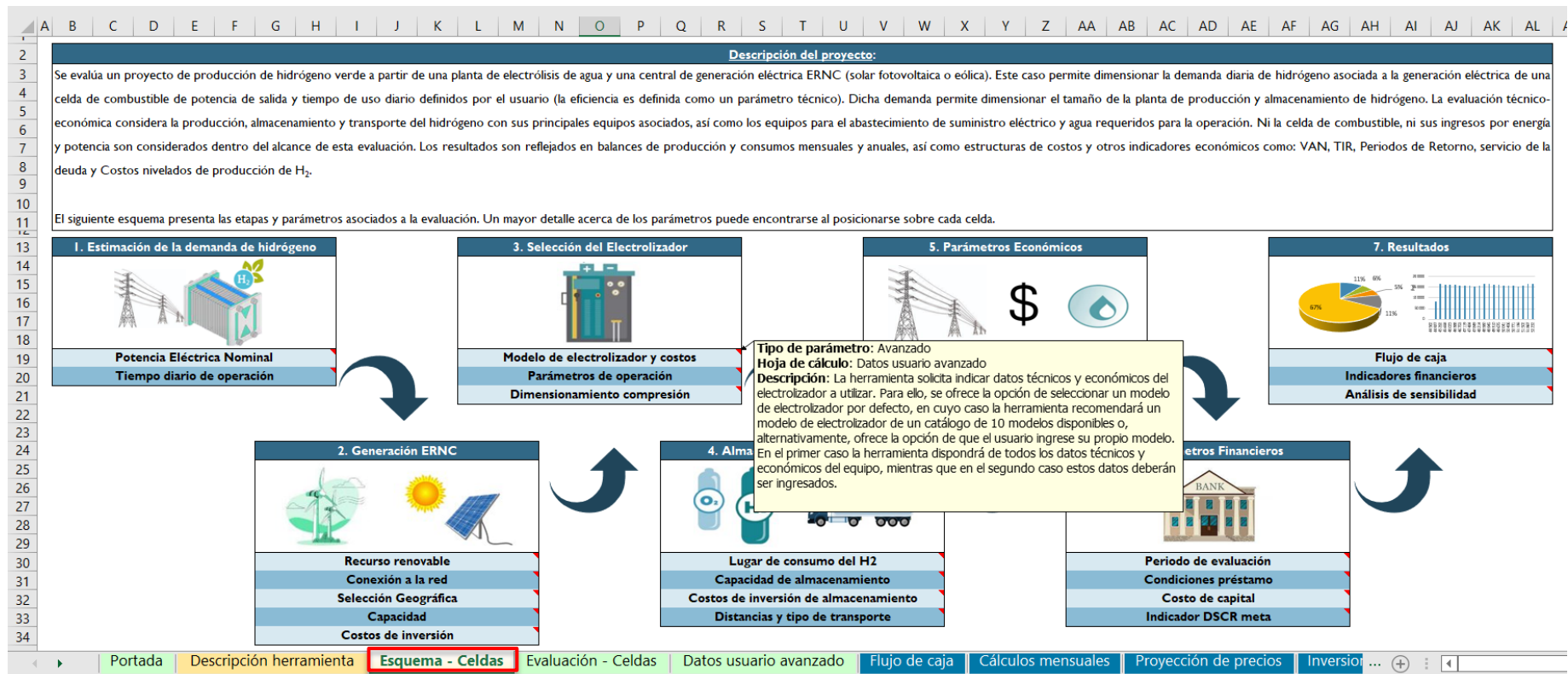


Figura 5: Esquema con etapas de cálculo, proyecto de generación eléctrica mediante celdas de combustible.

2.4 Alcances de la herramienta

- La evaluación económica se realiza en dólares americanos y por tanto todos los costos solicitados deben ser ingresados en esa moneda.
- Se incluyen costos asociados a las inversiones de equipos de electrólisis y planta de generación ERNC. No se incluyen costos de inversión asociados específicamente al tipo de proyecto evaluado, como por ejemplo costos de buses, hidrogeneras o celdas de combustible.
- La herramienta permite evaluar proyectos *ongrid* y *offgrid*.

3 CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO

3.1 Demanda de Hidrógeno Verde

Independientemente del tipo de proyecto que se desee evaluar, como primer paso se debe definir la demanda diaria de hidrógeno a partir de la cual se dimensionarán los equipos asociados. El ingreso de esta demanda se solicita de manera diferenciada según tipo de proyecto.

3.1.1 Producción de hidrógeno para flota de buses de larga autonomía

La demanda diaria de H_2 está determinada por:

$$\dot{m}_{H_2 \text{ BUSES}} = N_{buses} * D * CE_{H_2} * 100$$

Donde:

- $\dot{m}_{H_2 \text{ BUSES}}$ corresponde a la demanda diaria de H_2 asociada a la flota de buses de larga autonomía con celdas de combustible [kg/día].
- N_{buses} corresponde al tamaño de la flota de buses con celdas de combustible.
- D corresponde al recorrido diario medio por bus [km/día].
- CE_{H_2} corresponde al consumo de hidrógeno por vehículo [kg H_2 /100 km]. La herramienta ofrece un valor por defecto de 14,5 [kg H_2 /100 km], y alternativamente ofrece la posibilidad de que el usuario ingrese su propio valor.

Todos estos valores se solicitan en la hoja "Evaluación - Buses" como se muestra en la figura a continuación:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Índice			Datos de entrada					
3	Portada			Esta hoja solicita parámetros básicos del proyecto.					
4	Descripción herramienta			Para ingresar parámetros más detallados dirijase a la hoja "Datos usuario avanzado".					
5	Esquema - Buses								
6	Esquema - Celdas								
7	Esquema - General								
8	Evaluación - Buses								
9	Evaluación - Celdas								
10	Evaluación - General								
11	Datos usuario avanzado								
12	Flujo de caja								
13	Cálculos mensuales								
14	Proyección de precios								
15	Inversiones								

Parámetros técnicos		
Características generales de la flota	Valor	Unidad
Tamaño de la flota de buses	10	bus
Nivel de actividad promedio de buses	250	km / día - bus
Consumo de H ₂ de buses	-	-
☐ Valor por defecto ⁽¹⁾	14.5	kg H ₂ / 100 km
☒ Valor usuario	6.5	kg H ₂ / 100 km
Demanda diaria	162.50	kg H ₂ / día
Demanda horaria promedio	6.77	kg H ₂ / hora

Figura 6: Campos para estimación de demanda de hidrógeno para proyecto de buses de larga autonomía.

3.1.2 Sistema aislado de producción de electricidad mediante celdas de combustible

En el caso del proyecto de producción de electricidad mediante celdas de combustible, la ecuación que correlaciona el consumo de hidrógeno en una celda para la producción de electricidad se muestra en la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{H_2 \text{ celdas}} = P_{\text{eléctrica salida}} * t * 3600 / (PCI_{H_2} * \eta_{\text{Celda de Combustible}})$$

Donde:

- $\dot{m}_{H_2 \text{ celdas}}$ corresponde al consumo de H_2 en la celda de combustible [kg/día].
- $P_{\text{eléctrica salida}}$ corresponde a la potencia eléctrica nominal de la celda [MW].
- t corresponde al tiempo diario de operación de la celda [horas/día].
- PCI_{H_2} corresponde al poder calorífico inferior del hidrógeno [kJ/kg].
- $\eta_{\text{Celda de Combustible}}$ corresponde a la eficiencia de la celda de combustible [%].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I															
1	Índice			Celdas de combustible																				
3	Portada			Esta hoja solicita parámetros básicos del proyecto.																				
4	Descripción herramienta			Para ingresar parámetros más detallados diríjase a la hoja "Datos usuario avanzado".																				
5	Esquema - Buses			<table><tr><th colspan="3">Parámetros técnicos</th></tr><tr><th>Parámetro</th><th>Valor</th><th>Unidad</th></tr><tr><td>Potencia Eléctrica Nominal</td><td>1.00</td><td>MW</td></tr><tr><td>Tiempo diario de operación</td><td>6</td><td>horas / día</td></tr><tr><td>Demanda diaria</td><td>360.00</td><td>kg H₂ / día</td></tr></table>						Parámetros técnicos			Parámetro	Valor	Unidad	Potencia Eléctrica Nominal	1.00	MW	Tiempo diario de operación	6	horas / día	Demanda diaria	360.00	kg H ₂ / día
Parámetros técnicos																								
Parámetro	Valor	Unidad																						
Potencia Eléctrica Nominal	1.00	MW																						
Tiempo diario de operación	6	horas / día																						
Demanda diaria	360.00	kg H ₂ / día																						
6	Esquema - Celdas																							
7	Esquema - General																							
8	Evaluación - Buses																							
9	Evaluación - Celdas																							
10	Evaluación - General																							
11	Datos usuario avanzado																							

Figura 7: Campos para estimación de demanda de hidrógeno para proyecto de generación de electricidad mediante celdas de combustible.

3.1.3 Producción de hidrógeno verde general (no asociado a una aplicación específica)

En el caso de este tipo de proyecto la demanda de H_2 se ingresa directamente en la herramienta según se muestra en la figura a continuación:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J															
1	Índice			Producción de hidrógeno para proyecto no especificado																					
3		Portada		Esta hoja solicita parámetros básicos del proyecto.																					
4		Descripción herramienta		Para ingresar parámetros más detallados diríjase a la hoja "Datos usuario avanzado".																					
5		Esquema - Buses		<table><tr><th colspan="3">Parámetros técnicos</th></tr><tr><th>Parámetro</th><th>Valor</th><th>Unidad</th></tr><tr><td>Demanda diaria</td><td>162.50</td><td>kg H₂ / día</td></tr><tr><td>Presión de Abastecimiento</td><td>200</td><td>bar</td></tr><tr><td>Demanda diaria</td><td>162.50</td><td>kg H₂ / día</td></tr></table>							Parámetros técnicos			Parámetro	Valor	Unidad	Demanda diaria	162.50	kg H ₂ / día	Presión de Abastecimiento	200	bar	Demanda diaria	162.50	kg H ₂ / día
Parámetros técnicos																									
Parámetro	Valor	Unidad																							
Demanda diaria	162.50	kg H ₂ / día																							
Presión de Abastecimiento	200	bar																							
Demanda diaria	162.50	kg H ₂ / día																							
6		Esquema - Celdas																							
7		Esquema - General																							
8		Evaluación - Buses																							
9		Evaluación - Celdas																							
10		Evaluación - General																							
11		Datos usuario avanzado																							

Figura 8: Campo para estimación de demanda de hidrógeno para proyecto de producción de H_2 general.

3.2 Generación eléctrica (solar FV o eólica)

Dentro de los parámetros básicos que el usuario debe completar se encuentran los asociados a la generación eléctrica. La herramienta permite escoger entre un proyecto ERNC solar fotovoltaico o eólico. En esta esta sección el usuario deberá escoger la tecnología de generación, el tipo de conexión a la red (*ongrid u offgrid*), la localización del proyecto y la capacidad nominal de la central de generación eléctrica.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Índice			Datos de entrada						
3	Portada			Esta hoja solicita parámetros básicos del proyecto.						
4	Descripción herramienta			Para ingresar parámetros más detallados diríjase a la hoja "Datos usuario avanzado".						
5	Esquema - Buses									
6	Esquema - Celdas									
7	Esquema - General									
8	Evaluación - Buses									
9	Evaluación - Celdas									
10	Evaluación - General									
11	Datos usuario avanzado									
12	Flujo de caja									
13	Cálculos mensuales									
14	Proyección de precios									
15	Inversiones									
16	Depreciación									
17	Costos transporte & alm									
18	Costos compresor									
19	Factor de compresibilidad									
20	Matrices horarias									
21	Generación eólica									
22	Generación solar									
23	Perfiles S&E usuario									
24	Perfiles S&E por defecto									
25	Datos aerogeneradores									
26	Datos electrolizador									
27	Parámetros técnicos									
28	Auxiliar_chequeo									
29	Auxiliar_gráficos									
30	Auxiliar_off_grid									
31	Auxiliar_ID									
32										

Parámetros técnicos		
Características generales de la flota	Valor	Unidad
Tamaño de la flota de buses	10	bus
Nivel de actividad promedio de buses	250	km / día - bus
Consumo de H₂ de buses	-	-
☐ Valor por defecto ⁽¹⁾	6.5	kg H ₂ / 100 km
☒ Valor usuario	6.5	kg H ₂ / 100 km
Demanda diaria	162.50	kg H ₂ / día
Demanda horaria promedio	6.77	kg H ₂ / hora
Características de la planta de generación ⁽²⁾	-	-
Recurso renovable	☒ Solar ☐ Eólico	-
Conectado a la red	Si	-
Ciudad ⁽³⁾	María Elena	-
Planta Fotovoltaica	-	-
Capacidad nominal de la planta	0	kW
Planta Eólica	-	-
Selección del aerogenerador ⁽⁴⁾	3430	kW/unidad
Capacidad nominal de aerogenerador	3430	kW/unidad
Cantidad de aerogeneradores	1	unidades
Características de la planta de hidrógeno	-	-
¿El consumo de H ₂ es in situ?	Si	-
Días de autonomía de almacenamiento	2	días

(1) Valor calculado para recorrido de bus que sube a faena minera.

(2) Completar capacidades nominales y cantidad de aerogeneradores en función de selección del recurso.

(3) Para revisar las ciudades disponibles por recurso hacer click aquí.

(4) Para ver modelos disponibles o agregar las curvas de potencia para la opción de "Modelo Usuario" hacer click

Figura 9: Selección de parámetros básicos para la definición de la central de generación ERNC.

La selección de si el proyecto está o no conectado a la red eléctrica, determinará la posibilidad de hacer retiros o inyecciones de energía en la red eléctrica, en función de los déficits o excedentes de energía generados a partir del balance de demanda interna (energía requerida para producir la cantidad de hidrógeno necesaria) y la disponibilidad horaria obtenida a partir de la planta ERNC dimensionada. En caso de seleccionar la opción "No", para la celda asociada al parámetro "Conectado a la red", el tamaño del electrolizador y los equipos serán sobredimensionados para garantizar el abastecimiento de hidrógeno definido por la demanda diaria.

La herramienta ofrece la posibilidad de seleccionar entre 16 comunas de referencia (una por cada región³), para las cuales se dispone de perfiles horarios del recurso solar y eólico (datos extraídos de los exploradores solares y eólicos del Ministerio de Energía de Chile respectivamente). Adicionalmente, la herramienta ofrece la posibilidad de que el usuario ingrese los perfiles horarios del recurso en forma manual.

El usuario debe completar los campos que definan la potencia nominal de la central dependiendo la tecnología seleccionada. En el caso que este seleccione el recurso solar, deberá ingresar la potencia nominal de la planta solar fotovoltaica (en [kW]). En el caso que el usuario seleccione el recurso eólico, este deberá seleccionar entre un listado de modelos de aerogeneradores actualmente disponibles en el mercado (cada uno con su curva de potencia como función de la velocidad del viento)⁴ y seleccionar la cantidad de aerogeneradores considerados para el proyecto.

3.2.1 Planta solar fotovoltaica

El usuario avanzado podrá seleccionar si es que la generación solar fotovoltaica será mono o bifacial (ver figura siguiente). De igual modo, podrá seleccionar si desea realizar la evaluación con valores por defecto (opción de “Valores por defecto (según ciudad elegida)”) o con valores propios (“Valores usuario (otras localidades)”).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Índice			Cadena de Valor del Hidrógeno				
109								
110								
111								
112								
113								
114								
115								
116								
117								
118								
119								
120								
121								
122								
123								
124								
125								
126								

I. Generación de Energía *

Recurso evaluado	I
Recurso evaluado	Solar
Planta solar	
Radiación	
☒ Valores por defecto (según ciudad elegida) ☐ Valores usuario (otras localidades)	Revisar datos Agregar datos
Modelo de generación (solar)	
☒ Monofacial modelo básico ☐ Bifacial	Revisar datos Revisar datos
Planta eólica	
Velocidad del viento	
☒ Valores por defecto ☐ Valores usuario	Revisar datos Agregar datos

* Completar en función del recurso solar o eólico a evaluar.

◀ ▶ ...
Descripción herramienta
Esquema - Buses
Evaluación - Buses
Datos usuario avanzado

Listo
🔍
🔊
Accesibilidad: es necesario investigar

Figura 10: Selección avanzada de parámetros para la generación solar fotovoltaica.

³ Debajo del bloque de parámetros técnicos (Figura 9) se dispone de un link que permite revisar las ciudades disponibles según recurso.

⁴ El usuario puede incluir un modelo personalizado de aerogenerador.

3.2.1.1 Generación fotovoltaica monofacial

A modo de simplificación, para la simulación del rendimiento horario de la planta solar se consideran paneles con un ángulo de inclinación igual a 24° y orientado hacia el norte. La generación horaria estará dada por el modelo básico del Explorador Solar del Ministerio de Energía de Chile, el cual utiliza el modelo de operación PVWatts. Las ecuaciones asociadas se presentan a continuación.

$$P_{PV_t} = P_{PV \text{ instalada}} * \frac{1}{FA_{PV}} * \frac{R_{incidente_t}}{1000} * \eta_{PV} * \eta_{inv} * (1 - f_{PV})$$

Donde:

- P_{PV_t} corresponde a la generación eléctrica en cada hora t (en [kWh]).
- $P_{PV \text{ instalada}}$ corresponde a la capacidad fotovoltaica instalada [kW].
- FA_{PV} corresponde al factor de área del arreglo fotovoltaico [kW/m²].
- η_{inv} corresponde a la eficiencia del inversor [%].
- f_{PV} corresponde al factor de reducción de potencia representativo de las pérdidas secundarias [%].
- $R_{incidente_t}$ corresponde a la radiación solar incidente en la superficie en cada hora t [W/m²].
- η_{PV} corresponde a la eficiencia de conversión del módulo fotovoltaico [%], y determinado por:

$$\eta_{PV} = \eta_{PV-estandar} * [1 + \gamma * (T_{celda} - 25^{\circ}C)]$$

Donde:

- $\eta_{PV-estandar}$ corresponde a la eficiencia de conversión del módulo fotovoltaico en condiciones estándar [%].
- γ corresponde al Coeficiente de Temperatura del panel (igual a -0.45 %/°C).
- T_{celda} a la temperatura de la celda [°C].

Los valores de los parámetros a utilizar son descritos en la siguiente tabla:

Tabla 5: Supuestos modelo generación solar.

Parámetro	Sigla	Valor
Eficiencia Inversor	η_{inv}	97%

Factor de reducción de potencia	f_{PV}	14%
Eficiencia de conversión del módulo fotovoltaico en condiciones estándar	$\eta_{PV-estándar}$	21,1%
Coefficiente de Temperatura del panel	γ	-0.45 %/°C

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.2 Generación fotovoltaica bifacial

Entendiendo cómo se comportan las radiaciones en ambas caras del panel fotovoltaico bifacial, se puede calcular la potencia bifacial, con el siguiente método:

$$P_{Bt} = P_{PVt} * (1 + G_{bifacialt})$$

Donde:

- P_{Bt} corresponde a la generación solar bifacial [kWh] en cada hora t .
- P_{PVt} corresponde a la generación eléctrica en cada hora t , en [kWh].
- $G_{bifacialt}$ corresponde a ganancia bifacial [-], que se expresa por:

$$G_{bifacialt} = R_{bifacialt} * Bifacialidad$$

Donde:

- $Bifacialidad$ corresponde a la relación entre las eficiencias de las caras delanteras y traseras (-). Esta es una característica técnica del panel fotovoltaico, el cual depende de los parámetros entregados por el fabricante, típicamente valorado en 0.7.
- $R_{bifacialt}$ corresponde a la razón entre la radiación trasera y la delantera en cada hora t [-]. Esta se calcula mediante:

$$R_{bifacialt} = \frac{R_{traserat}}{R_{frontalt}} = \frac{R_{difusat} + R_{albedo_t}}{R_{globalt} + R_{incidentet}}$$

Donde:

- $R_{difusat}$ corresponde a la radiación difusa en cada hora t [W/m²].
- $R_{globalt}$ corresponde a la radiación global en cada hora t [W/m²].

- R_{albedo_t} corresponde a la radiación de albedo en cada hora t [W/m^2].
- $R_{incidente_t}$ corresponde a la radiación incidente en cada hora t [W/m^2].

Además, la radiación de albedo es calculada mediante:

$$R_{albedo_t} = R_{global_t} * A * \frac{(1 - \cos\beta)}{2}$$

Donde:

- R_{global_t} corresponde a la radiación global en cada hora t [W/m^2].
- A corresponde albedo [-]. Valor característico del tipo de suelo y posible de modificar en la herramienta.
- β corresponde al ángulo de inclinación del panel fotovoltaico [$^\circ$].

Desentendiendo de las variables seleccionadas, la herramienta calculará la generación ERNC solar fotovoltaica para cada hora de cada día tipo de cada mes, obteniendo una tabla como la que se presenta en la siguiente figura:

Índice		Generación Eléctrica ERNC - Solar															
		E.Perfil de Generación Horaria															
Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre				
días / mes		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31				
0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	5				
7		49	31	25	7	0	0	0	1	54	108	123	86				
8		230	207	221	200	187	148	146	168	267	320	334	276				
9		436	420	448	455	421	375	377	396	487	528	545	470				
10		618	617	648	640	603	554	571	615	683	701	717	638				
11		752	753	792	773	722	667	702	748	815	817	833	762				
12		829	845	880	849	786	731	769	828	884	877	886	818				
13		839	865	890	837	794	735	782	831	877	871	876	819				
14		794	815	842	789	737	684	728	778	814	797	801	768				
15		676	693	717	677	621	578	627	666	687	669	677	652				
16		534	539	553	521	452	422	473	511	511	489	497	491				
17		350	363	350	304	249	237	278	305	299	278	288	305				
18		154	162	132	70	8	0	32	72	79	73	84	112				
19		19	12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12				
20		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
21		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
22		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
23		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Generación diaria (kWh / día)		6,279	6,321	6,499	6,122	5,582	5,132	5,485	5,922	6,458	6,529	6,668	6,217				
Generación Mensual (kWh / Mes)		194,661	176,981	201,482	183,655	173,039	153,947	170,030	183,569	193,743	202,390	200,033	192,724				

Figura 11: Generación eléctrica horaria para una planta tipo de 1 MW de potencia instalada.

La generación mensual corresponderá a la generación diaria multiplicada por la cantidad de días del mes.

3.2.2 Planta eólica

La generación de energía con resolución horaria en el caso de los proyectos eólicos está determinada por la siguiente ecuación:

$$P_{wind,t} = N_{turbina} * P_{turbina}(velocidad\ del\ viento_t) * (1 - k)$$

Donde:

- P_{wind} corresponde a la energía generada en cada hora t por el sistema de generación eólica [kWh].
- $N_{turbina}$ corresponde a la cantidad de turbinas generadoras instaladas [-].
- $P_{turbina}$ corresponde a la energía generada por cada turbina individual en cada hora t , calculada a partir de la curva de potencia de los aerogeneradores como función de la velocidad del viento [m/s].
- k corresponde a las pérdidas del sistema [-]. Este último valor quedará parametrizado asignando un valor por defecto.

Tabla 6: Supuestos modelo generación eólico.

Parámetro	Valor
Modelo	Modelo básico/avanzado
Factor de pérdidas	17%
Altura	100 metros
Modelo del viento	RECON 1980-2017

La generación eléctrica con resolución horaria se estima a partir de la ecuación antes presentada, y la potencia del aerogenerador seleccionado. Los resultados obtenidos en la herramienta se muestran como en la figura a continuación:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Índice		Generación Eléctrica ERNC - Eólica																	
		E.Perfil de Generación Horaria																	
		Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre				
		días / mes	31	28	31	30	31	30	31	31	31	30	31	30	31				
0			15	4	0	0	2	0	0	12	91	101	105	22					
1			4	0	0	0	0	0	0	9	27	42	46	9					
2			0	0	0	0	0	0	0	6	12	15	16	0					
3			0	0	0	0	0	0	0	4	7	11	12	0					
4			0	0	0	0	0	0	0	3	7	10	11	0					
5			0	0	0	0	0	0	0	3	9	13	14	0					
6			0	0	0	0	0	0	0	39	0	8	9	0					
7			0	0	0	0	0	0	0	6	3	14	14	0					
8			13	0	0	0	0	0	0	10	56	114	120	75					
9			361	237	94	14	18	0	0	106	387	525	550	605					
10			1,627	1,287	765	439	474	146	121	597	1,459	1,765	1,818	2,179					
11			2,859	2,831	2,631	2,095	2,164	1,072	1,002	2,190	2,844	2,859	2,860	2,864					
12			2,863	2,859	2,804	2,559	2,579	2,365	2,355	2,791	2,864	2,864	2,864	2,864					
13			2,864	2,863	2,856	2,753	2,760	2,746	2,743	2,859	2,864	2,864	2,864	2,864					
14			2,864	2,863	2,857	2,772	2,779	2,806	2,801	2,863	2,864	2,864	2,864	2,864					
15			2,861	2,858	2,855	2,749	2,756	2,782	2,778	2,861	2,864	2,864	2,864	2,864					
16			2,845	2,804	2,781	2,526	2,549	2,591	2,581	2,853	2,864	2,864	2,864	2,857					
17			2,647	2,509	2,454	2,008	2,045	1,977	1,968	2,629	2,851	2,856	2,854	2,758					
18			1,881	1,838	1,571	848	1,061	333	261	800	2,246	2,458	2,514	2,183					
19			626	606	432	137	223	39	17	252	723	883	947	781					
20			150	142	74	0	10	0	0	51	166	233	257	218					
21			18	17	14	0	0	0	0	15	55	102	116	58					
22			8	8	15	0	0	0	0	16	50	99	109	18					
23			14	15	92	3	15	0	0	73	148	222	230	44					
Generación diaria (kWh / día)			24,519	23,741	22,296	18,902	19,435	16,857	16,627	21,048	25,458	26,648	26,920	26,124					
Generación Mensual (kWh / Mes)			760,101	664,742	691,189	567,062	602,499	505,708	515,439	652,503	763,755	826,082	807,610	809,840					
Proyección de precios		Inversiones		Depreciación		Costos transporte & alm			Costos compresor			Factor de compresibilidad			Matrices Horarias		Generación eólica		

Figura 12: Ejemplo de perfil de generación eléctrica horaria para un aerogenerador Vestas / V117-3.45 / Capacidad 3450 kW.

3.2.3 Perfiles de radiación solar y velocidad del viento

Los perfiles horarios para el recurso solar y eólico de cada ciudad se encuentran en la hoja "Perfiles S&E por defecto".

Figura 13: Perfiles del recurso solar y eólico por defecto.

Adicionalmente, la herramienta ofrece la posibilidad de que el usuario ingrese los perfiles horarios del recurso en forma manual. Para ello el usuario debe ir a la sección I de la hoja "Datos usuario avanzado", "Generación de Energía", y seleccionar la opción de "Valores usuario (otras localidades)". Los links del lado derecho ("Agregar datos") lo conducirá a la hoja "Perfiles S&E usuario", donde deberá agregar los distintos parámetros solicitados (radiación incidente, radiación difusa y radiación global, en el caso del recurso solar, y velocidad del viento en el caso del recurso eólico).

I. Generación de Energía *	
Recurso evaluado	I
Recurso evaluado	Solar
Planta solar	
Radiación	
☒ Valores por defecto (según ciudad elegida)	Revisar datos
☐ Valores usuario (otras localidades)	Agregar datos
Modelo de generación (solar)	
☒ Monofacial modelo básico	Revisar datos
☐ Bifacial	Revisar datos
Planta eólica	
Velocidad del viento	
☒ Valores por defecto	Revisar datos
☐ Valores usuario	Agregar datos

* Completar en función del recurso solar o eólico a evaluar.

Figura 14: Selección de perfiles de radiación personalizados.

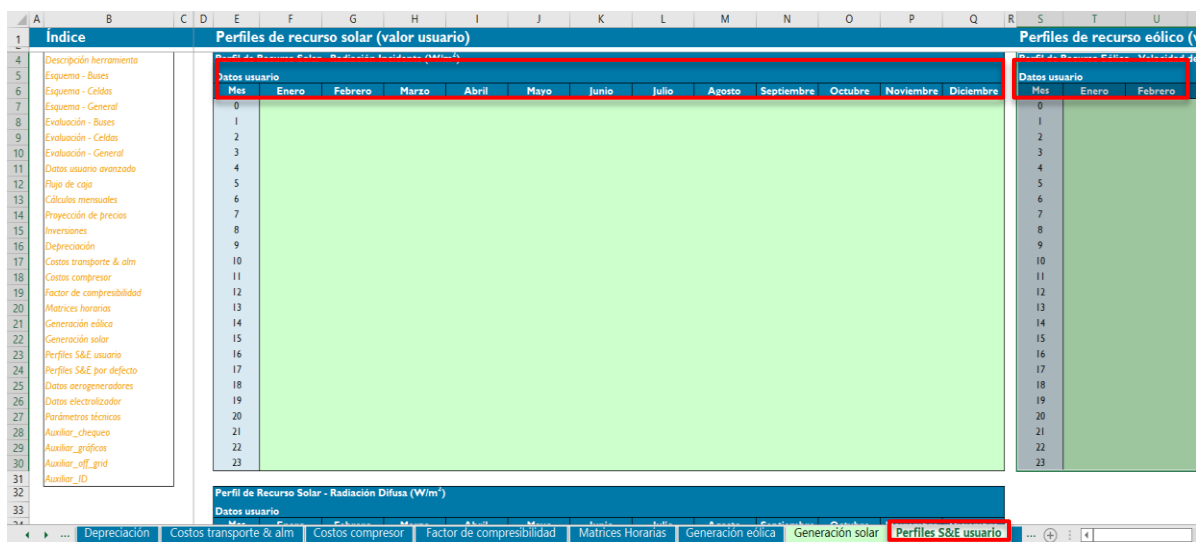


Figura 15: Perfiles de recursos solar y eólico personalizados.

3.2.4 CAPEX planta fotovoltaica/eólica

Los costos de inversión de la planta fotovoltaica/eólica pueden ser estimados a partir de la herramienta, la cual permite utilizar un valor por defecto, o pueden ser agregados manualmente por el usuario. Estas opciones pueden ser seleccionadas en la hoja "Datos usuario avanzado" en la sección J, "Costos de inversión planta ERNC".

J. Costos de inversión planta ERNC		
Parámetro	Valor	Unidad
Costos de Inversión Planta PV		
☒ Valor por defecto (basado en inversión unitaria)	Promedio	escenario de costo
☐ Valor usuario (inversión total ERNC)		USD
Costos de Inversión Planta Eólica		
☒ Valor por defecto	Promedio	escenario de costo
☐ Valor usuario		USD

* [Link para revisar costos de inversión por defecto.](#)

Figura 16: Selección de costos de inversión para planta fotovoltaica/eólica.

En el caso de los valores por defecto, el usuario deberá elegir entre tres escenarios de costo (bajo, promedio y alto), mientras que en el caso del valor usuario se debe ingresar un valor absoluto para los costos de inversión.

Las estimaciones de costos de inversión realizadas por la herramienta se presentan en la hoja "Inversiones". En esta se presentan costos de inversión por tamaño de planta para los tres escenarios (bajo, promedio y alto), y factores de escala (asociados a economías de escala) para plantas menores a los 10 [MW]. Los factores de escala se consideran solo para las plantas solares. En el caso de plantas eólicas y plantas mayores a 10 [MW], el factor de escala es 1.

Tecnología	Periodo de Construcción	Costo de inversión (USD / kW)			
		Bajo	Promedio	Alto	Seleccionado
Eólica	24	870	1,248	1,518	1,248
Solar	12	659	818	1,041	818

Item / Capacidad kW		100	200	500	1,000	2,000	5,000	10,000
Módulo		0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
Inversor	(USD /W _{DC})	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05
Soporte para módulos	(USD /W _{DC})	0.17	0.14	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10
Equipamiento eléctrico	(USD /W _{DC})	0.41	0.32	0.23	0.18	0.16	0.13	0.11
Obras civiles y montaje	(USD /W _{DC})	0.21	0.17	0.15	0.14	0.14	0.12	0.12
Overhead EPC	(USD /W _{DC})	0.17	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07
PII	(USD /W _{DC})	0.10	0.07	0.04	0.04	0.03	0.00	0.00
Impuestos	(USD /W _{DC})	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
Overhead del desarrollador	(USD /W _{DC})	0.48	0.41	0.36	0.33	0.32	0.11	0.07
Contingencias	(USD /W _{DC})	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
EPC developer net profit	(USD /W _{DC})	0.17	0.15	0.13	0.12	0.11	0.09	0.08
Total	(USD /W _{DC})	2.32	1.98	1.72	1.59	1.53	1.16	1.08
Costo inversión total	(USD /kW _{DC})	2,320	1,980	1,720	1,590	1,530	1,160	1,080
Diferencia	kW	1,900	1,800	1,500	1,000	0	3,000	8,000
Factor de Escala	-	2.15	1.83	1.59	1.47	1.42	1.07	1.00

En base a estos datos, y considerando el tamaño de planta indicado por el usuario, se calcula un costo de inversión.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Índice			Inversiones planta de hidrógeno			
16		<i>Depreciación</i>						
17		<i>Costos transporte & alm</i>						
18		<i>Costos compresor</i>						
19		<i>Factor de compresibilidad</i>						
20		<i>Matrices horarias</i>						
21		<i>Generación eólica</i>						
22		<i>Generación solar</i>						
23		<i>Perfiles S&E usuario</i>						
24		<i>Perfiles S&E por defecto</i>						
25		<i>Datos aerogeneradores</i>						
26		<i>Datos electrolizador</i>						
27		<i>Parámetros técnicos</i>						
28		<i>Auxiliar_chequeo</i>						
29		<i>Auxiliar_gráficos</i>						
30		<i>Auxiliar_off_grid</i>						
31		<i>Auxiliar_ID</i>						
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								
46								

3.3 Dimensionamiento de la planta de electrólisis

3.3.1 Selección del electrolizador

En función de la demanda de hidrógeno diaria y las condiciones de abastecimiento eléctrico (conexión a la red eléctrica) definidas por el usuario, la herramienta permite (mediante la ejecución de una macro) la selección de un electrolizador que cumpla las restricciones de demanda diaria y abastecimiento eléctrico establecidas por el usuario. Para garantizar que esto ocurra, el usuario deberá presionar el botón “Calcular resultados” en la hoja “Evaluación – Buses”, “Evaluación – Celdas” o “Evaluación – General”, presentado en la siguiente figura:

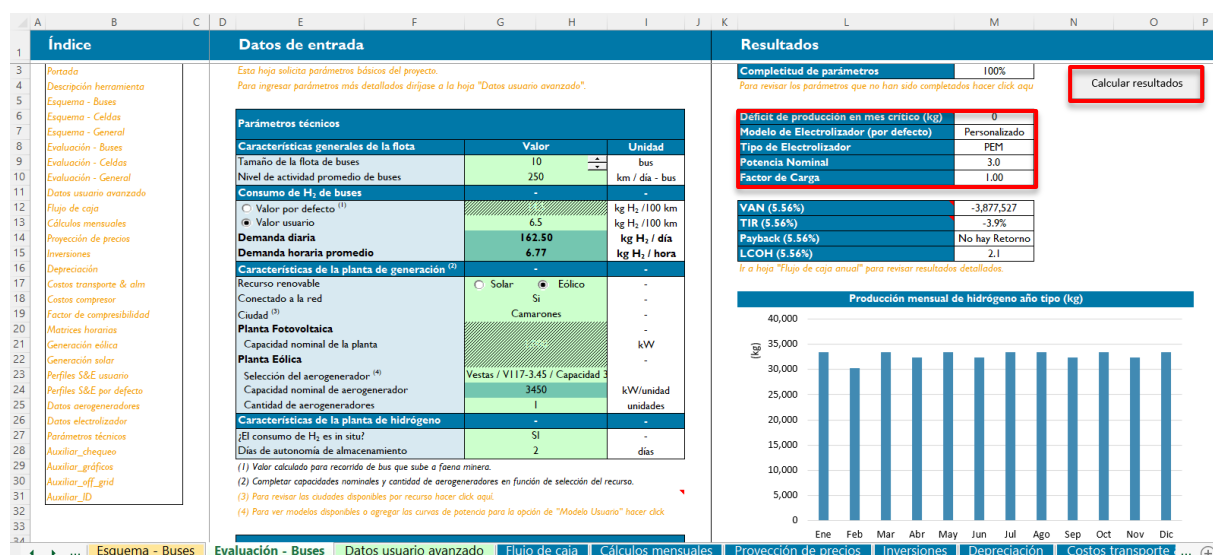


Figura 20: Selección automática del electrolizador.

En la misma hoja, en la sección “Resultados”, la herramienta mostrará el tipo de electrolizador seleccionado y su potencia nominal. El usuario deberá corroborar que el déficit de producción del mes crítico (celda M6 en la hoja “Evaluación – Buses”, “Evaluación – Celdas” o “Evaluación – General”) sea igual a cero, de lo contrario significa que las condiciones definidas no permiten abastecer la demanda de hidrógeno calculada por la herramienta. La selección del electrolizador se realizará a partir del siguiente listado de electrolizadores, cada uno con su propios parámetros técnicos y económicos⁵.

⁵ La adición de un nuevo modelo de electrolizador es posible, pero debe realizarse con cuidado. Esto debido a que la macro y la hoja de cálculo que permiten recomendar un electrolizador en base al catálogo está diseñada para los 10 modelos originales de la herramienta. Si bien es posible añadir un nuevo modelo, debe tenerse especial precaución con la hoja “Auxiliar_off_grid” y con las macros “Selección_electrolizador” y “Off_grid”.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Índice	Modelos de electrolizadores disponibles													
2	Portales	Los modelos de electrolizadores presentados corresponden a una recalibración realizada por GIZ de algunos de los modelos disponibles en el mercado en el año 2021. Los costos baseados pueden no reflejar los actuales costos.													
3	Descripción herramienta	Modelos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
4	Esquema - Buses	Potencia nominal (MW)							1.5						2.3
5	Esquema - Celdas	Producción nominal de hidrógeno (kg/h)							27						44.8
6	Esquema - General	Equipo	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador	Electrolizador
7	Evaluación - Buses	Fuente							Proveedor 1 - GIZ						Proveedor 1 - GIZ
8	Evaluación - Celdas	Modelo	PEM	ALC	PEM	PEM	ALC	PEM	ALC	PEM	ALC	PEM	PEM	PEM	PEM
9	Evaluación - General	Potencia nominal (MW)	0.538	0.6	1	1.055	1.12	1.25	1.25	2.111	2.392	2.5	2.5	2.5	2.5
10	Datos auxiliares generados	Producción nominal de hidrógeno (kg/h)	9.45	10.7	18.2	18.58	20	22.1	22.3	37.22	42.83	44.3	44.3	44.3	44.3
11	Plajo de capt	Precio estimado de planta (USD)	1,732,586	400,000	2,075,000	2,091,948	550,000	2,075,000	550,000	3,246,350	4,064,842	2,960,000	2,960,000	2,960,000	2,960,000
12	Cálculos manuales	Costo de reemplazo de stack (2021)	414,947	180,000	540,000	719,655	250,000	540,000	250,000	1,693,306	1,762,976	1,080,000	1,080,000	1,080,000	1,080,000
13	Proyección de precios	Costo de reemplazo de stack (2030)			320,000			320,000				780,000	780,000	780,000	780,000
14	Inversiones	Eficiencia del Stack (kWh/Nm³)	5.1	4.6	4.5	5.24	4.6	4.5	4.6	5.1	5.24	4.5	4.5	4.5	4.5
15	Degradación	Pureza del hidrógeno (después de purificación si está incluida)	99.9990%	99.999%	99.9995%	99.9990%	99.9990%	99.9995%	99.9990%	99.9990%	99.9990%	99.9995%	99.9995%	99.9995%	99.9995%
16	Costo transporte & alim	Presión del hidrógeno (salida del electrolizador) (bar)	29 bar	18 bar	30 bar	29 bar	18 bar	30 bar	18 bar	29 bar	29 bar	30 bar	30 bar	30 bar	30 bar
17	Costo compresor	Vida útil de stack (horas)	80,000	80,000	87,000	80,000	80,000	87,000	80,000	80,000	80,000	87,000	87,000	87,000	87,000
18	Factor de compresibilidad	Vida útil de planta (años)	20	25	20	20	25	20	25	20	20	20	20	20	20
19	Matrices horarias	Inclusión de sistema de control	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
20	Generación eólica	Precio de sistema de control (USD)	61,127	40,000	N/A	68,320	50,000	N/A	40,000	85,000	113,237	N/A	N/A	N/A	N/A
21	Generación solar	Inclusión de sistema de purificación de agua	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
22	Perfiles S&E usuarios	Precio de sistema de purificación de agua (USD)	60,390	12,000	N/A	80,520	15,000	N/A	15,000	126,000	94,729	N/A	N/A	N/A	N/A
23	Perfiles S&E por defecto	Inclusión de sistema de purificación de hidrógeno	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
24	Datos aerogeneradores	Sistema de purificación de hidrógeno (USD)	89,370	100,000	105,000	119,160	160,000	105,000	160,000	231,247	231,247	120,000	120,000	120,000	120,000
25	Datos electrolizador	Análisis modelo seleccionado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
26	Parámetros técnicos	Prin Elect (disaño) - MW	0.40	0.36	0.35	0.41	0.36	0.35	0.36	0.40	0.41	0.35	0.35	0.35	0.35
27	Auxiliar_chequeo	Diferencia (PMW)	0.14	0.24	0.65	0.65	0.76	0.90	0.89	1.71	1.98	2.15	2.15	2.15	2.15
28	Auxiliar_graficos	Filtro: Elimina casos en que la potencia no alcanza	0.14	0.24	0.65	0.65	0.76	0.90	0.89	1.71	1.98	2.15	2.15	2.15	2.15
29	Auxiliar_off_grid	Modelo seleccionado	1												
30	Auxiliar_ID														
31															
32															
... Matrices Horarias Generación eólica Generación solar Perfiles S&E usuario Perfiles S&E por defecto Datos aerogeneradores Datos electrolizador Parámetros técnicos ...															
Lista Calcular Accesibilidad es necesario investigar Configuración de visualización															

Figura 21: Listado de electrolizadores disponibles en catalogo.

El usuario avanzado podrá personalizar el electrolizador que desee evaluar. Para ello deberá ir a la pestaña "Datos usuario avanzado" y seleccionar en la sección "B. Electrolizador" la opción "Equipo usuario". Luego, deberá rellenar los campos en verde mostrados en la siguiente figura:

Índice	Cadena de Valor del Hidrógeno									
1	A.Características del proyecto									
2	Parámetros de operación									
3	Factor de Planta (on grid)									
4	Presión de descarga									
5	B. Electrolizador									
6	Parámetros técnicos									
7	Equipo por defecto									
8	Equipo usuario									
9	Unidad									
10	Modelo									
11	Tipo									
12	Potencia Nominal									
13	Eficiencia del Stack									
14	Potencia Mínima de Operación									
15	Producción Nominal									
16	Presión de Operación									
17	Temperatura de Operación									
18	Degradación									
19	Vida útil del Stack									
20	Vida Útil de la Planta									
21	Parámetros económicos									
22	Costos por defecto									
23	Costos usuario									
24	Unidad									
25	Costo de electrolizador									
26	Inclusión de sistema de control									
27	Precio de sistema de control									
28	Inclusión de sistema de purificación de agua									
29	Precio de sistema de purificación de agua									
30	Inclusión de sistema de purificación de H ₂									
31	Precio de sistema de purificación de H ₂									
32	Costo de reemplazo de stack									

Figura 22: Ejemplo de selección de electrolizador personalizado por el usuario.

3.3.2 Tamaño y costos del compresor

3.3.2.1 Dimensionamiento del compresor

El dimensionamiento del sistema de compresión se aproxima mediante el supuesto de una compresión isentrópica multietapas con enfriamiento intermedio. La potencia final de compresión será igual a la suma de las potencias de cada una de las etapas. La potencia isentrópica de cada etapa está dada por:

$$P_{real} = \frac{\dot{W} * \frac{k}{(k-1)} * R * t * \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} - 1 \right]}{\eta_{isentrópica}}$$

Donde:

- P_{real} . Corresponde a la potencia real entregada por el motor [kW].
- $\dot{W}$ corresponde al flujo másico de hidrógeno a comprimir [kg/s].
- k corresponde a la razón de calores específicos del hidrógeno [-].
- R corresponde a la constante de los gases ideales [kJ/kg*K].
- t corresponde a la temperatura de entrada de la etapa de compresión [K].
- P_1 corresponde a la presión de entrada de la etapa de compresión [bar].
- P_2 corresponde a la presión de salida de la etapa de compresión [bar].
- $\eta_{isentrópica}$ corresponde a la eficiencia isentrópica [%].

Luego la potencia del motor eléctrico está dada por:

$$P_{comp} = \frac{P_{real}}{\eta_{motor}}$$

Donde:

- P_{comp} corresponde a potencia del motor eléctrico [kW].
- η_{motor} corresponde a la eficiencia mecánica y eléctrica del motor [%].

Los cálculos de potencia y la cantidad de etapas requeridas para alcanzar la presión de almacenamiento son realizados en la pestaña "Costo compresor", como se muestra en la siguiente figura:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Índice											
3	Portada	Costo según flujo volumétrico										
4	Descripción herramienta											
5	Esquema - Buses											
6	Esquema - Celdas											
7	Esquema - General											
8	Evaluación - Buses											
9	Evaluación - Celdas											
10	Evaluación - General											
11	Datos usuario avanzado											
12	Flujo de caja											
13	Cálculos mensuales											
14	Proyección de precios											
15	Inversiones											
16	Depreciación											
17	Costos transporte & alm											
18	Costos compresor											
19	Factor de compresibilidad											
20	Matrices horarias											
21	Generación eólica											
22	Generación solar											
23	Perfiles S&E usuario											
24	Perfiles S&E por defecto											
25	Datos aerogeneradores											
26	Datos electrolizador											
27	Parámetros técnicos											
28	Auxiliar_chequeo											
29	Auxiliar_gráficos											
30	Auxiliar_off_grid											
31	Auxiliar_ID											
32												

Figura 23: Estimación de potencia y número de etapas de compresión.

El consumo específico de energía del compresor está dado por la ecuación que se presenta a continuación:

$$CE_{compresor} = P_{comp} / (Prod_Nom_{electro} * 3600)$$

Donde:

- $CE_{compresor}$ corresponde al consumo específico de energía del compresor [kWh/ kg H₂].
- $Prod_Nom_{electro}$ corresponde a la producción nominal del electrolizador [kg H₂ / seg].

3.3.2.2 Estimación de costos del compresor

En la misma pestaña se estima, a partir de la potencia final calculada, el costo unitario de inversión del compresor, obtenido del sitio web <https://hyjack.tech/components/compressor>, donde se estiman dichos costos para un compresor reciprocante de diafragma mediante la ecuación:

$$CI_{compresor} = 75700 * P_{comp}^{-0.62}$$

Donde:

- $CI_{compresor}$ corresponde al costo unitario de inversión del compresor (en [euros/kW]).
- P_{comp} corresponde a potencia del motor eléctrico [kW].

A partir de lo anterior es posible calcular el costo de inversión por defecto del sistema de compresión. De esta pestaña se obtiene, la potencia del sistema de compresión, el consumo energético específico, y los costos estimados por defecto, valores que son presentados como resumen en la pestaña "Datos usuario avanzado", donde es posible modificar el costo en caso de que usuario cuente con otra estimación o información más detallada (ver siguiente figura).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
1	Índice			Cadena de Valor del Hidrógeno							
46				D.Compresor							
47											
48				Parámetros técnicos			Valor		Unidad		
49				Temperatura de entrada			343.15		K		
50				Presión de succión			35.0		bar		
51				Presión de descarga			200.0		bar		
52				Consumo específico			1.2		kWh / kg H ₂		
53				Potencia Compresor (diseño)			52.7		kW		
54				Parámetros económicos			Valor		Unidad		
55				Costo compresor			-		-		
56	☐ Valor por defecto			-		USD					
57	☒ Valor usuario			200,000		USD					
58											
◀ ▶ ... Evaluación - Buses				Datos usuario avanzado		Flujo de caja		Cálculos mensuales		Proyección de precios	
Listo				Accesibilidad: es necesario investigar							

Figura 24: Resumen datos del compresor.

3.3.3 Almacenamiento y transporte

Dos parámetros básicos se requieren para definir las condiciones de almacenamiento y transporte del hidrógeno producido. El usuario podrá seleccionar si es que el consumo es "in situ"⁶ o no, lo que definirá si existen costos de transporte asociados. Por otra parte, el usuario deberá ingresar los días de autonomía de almacenamiento. Lo anterior definirá la capacidad de almacenamiento de hidrógeno necesaria, multiplicando el consumo diario por la cantidad de días de autonomía que se definan.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

Índice

Pantada

Descripción herramienta

Esquema - Buses

Esquema - Celdas

Esquema - General

Evaluación - Buses

Evaluación - Celdas

Evaluación - General

Datos usuario avanzado

Flujo de caja

Cálculos mensuales

Proyección de precios

Inversiones

Depreciación

Costos transporte & alm

Costos compresor

Factor de compresibilidad

Matrices horarias

Generación eólica

Generación solar

Perfiles S&E usuario

Perfiles S&E por defecto

Datos aerogeneradores

Datos electrolizador

Parámetros técnicos

Auxiliar_chequeo

Auxiliar_gridflow

Auxiliar_eff_grid

Auxiliar_ID

Datos de entrada

Esta hoja solicita parámetros básicos del proyecto.
Para ingresar parámetros más detallados diríjase a la hoja "Datos usuario avanzado".

Parámetros técnicos

Características generales de la flota		Valor	Unidad
Tamaño de la flota de buses		10	bus
Nivel de actividad promedio de buses		250	km / día - bus
Consumo de H ₂ de buses		-	-
☐ Valor por defecto ⁽¹⁾		1.5	kg H ₂ / 100 km
☒ Valor usuario		6.5	kg H ₂ / 100 km
Demanda diaria		162.50	kg H ₂ / día
Demanda horaria promedio		6.77	kg H ₂ / hora
Características de la planta de generación ⁽²⁾		-	-
Recurso renovable		☐ Solar ☒ Eólico	-
Conectado a la red		Si	-
Ciudad ⁽³⁾		Camarones	-
Planta Fotovoltaica		-	-
Capacidad nominal de la planta		1200	kW
Planta Eólica		-	-
Selección del aerogenerador ⁽⁴⁾		Vestas / V117-3.45 / Capacidad 3	-
Capacidad nominal de aerogenerador		3450	kW/unidad
Cantidad de aerogeneradores		1	unidades
Características de la planta de hidrógeno		-	-
¿El consumo de H ₂ es in situ?		Si	-
Días de autonomía de almacenamiento		2	días

(1) Valor calculado para recarado de bus que sube a plena carga.

(2) Completar capacidades nominales y cantidad de aerogeneradores en función de selección del recurso.

(3) Para revisar las ciudades disponibles por recurso hacer click aquí.

(4) Para ver modelos disponibles o agregar las curvas de potencia para la opción de "Modelo Usuario" hacer click

Resultados

Complejidad de parámetros100%

Para revisar los parámetros que no han sido completados hacer click aquí

Calcular resultados

Deficit de producción en mes crítico (kg)	0
Modelo de Electrolizador (por defecto)	Personalizado
Tipo de Electrolizador	PEM
Potencia Nominal	3.0
Factor de Carga	1.00
VAN (5.56%)	-3,877,527
TIR (5.56%)	-3.9%
Payback (5.56%)	No hay Retorno
LCOH (5.56%)	2.1

Ir a hoja "Flujo de caja anual" para revisar resultados detallados.

Producción mensual de hidrógeno año tipo (kg)

Mes	Producción (kg)
Ene	35000
Feb	30000
Mar	35000
Abr	35000
May	35000
Jun	35000
Jul	35000
Ag	35000
Sep	35000
Oct	35000
Nov	35000
Dic	35000

Esquema - Buses

Evaluación - Buses

Datos usuario avanzado

Flujo de caja

Cálculos mensuales

Proyección de precios

Inversiones

Depreciación

Costos transporte

Figura 25: Parámetros básicos para el transporte y almacenamiento.

⁶ Corresponde al caso en que el hidrogeno es consumido en el mismo lugar donde se produjo, sin necesidad de transportarlo.

3.3.3.1 Almacenamiento

Las condiciones de almacenamiento del hidrógeno son definidas por el usuario. La autonomía y la demanda definen la masa de hidrógeno a almacenar. En tanto, la presión de almacenamiento es por defecto 200 [bar]. Sin embargo, este valor puede ser modificado en la pestaña “Datos usuario avanzado”.

La herramienta solo cuenta con la posibilidad de incluir almacenamiento gaseoso. En particular, permite estimar el volumen de almacenamiento real de los estanques que contendrán hidrógeno gaseoso. El factor de compresibilidad a las condiciones de almacenamiento es calculado en la pestaña “Factor de compresibilidad”, tal como se muestra en la siguiente figura.

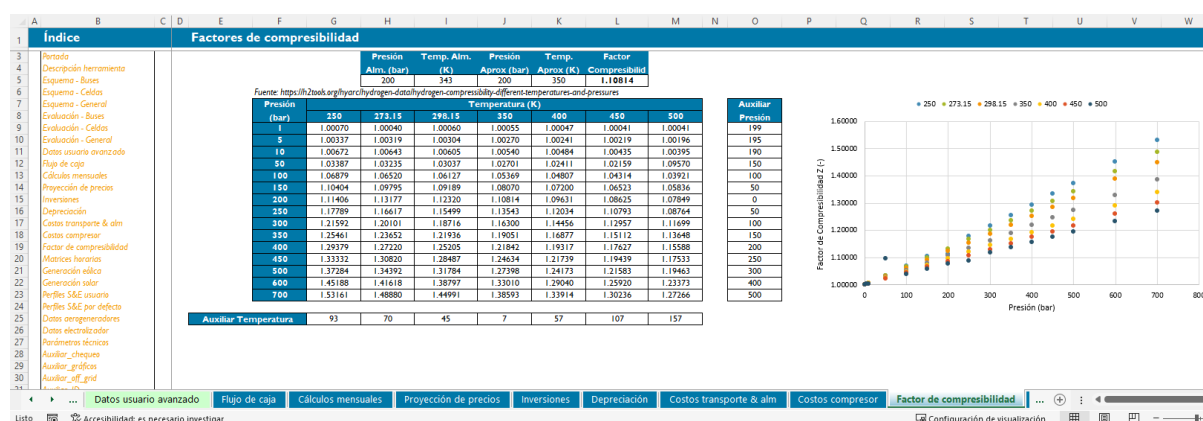


Figura 26: Determinación del factor de compresibilidad (Z) del hidrógeno.

El volumen de almacenamiento es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$V_{\text{almacenamiento}} = \left(\frac{M_{\text{almacenamiento}}}{PM_{H_2}} \right) * \frac{T_{\text{almacenamiento}} * Z(P, T)}{P_{\text{almacenamiento}} * R}$$

Donde:

- $V_{\text{almacenamiento}}$ corresponde al volumen real de almacenamiento [m³].
- $M_{\text{almacenamiento}}$ corresponde a la masa de hidrógeno a almacenar [kg].
- PM_{H_2} corresponde al peso molecular del H₂ [kg/kmol].
- $T_{\text{almacenamiento}}$ corresponde a la temperatura de almacenamiento [K].
- $P_{\text{almacenamiento}}$ corresponde a la presión de almacenamiento [bar].
- $Z(P, T)$ corresponde al factor de compresibilidad [-].
- R corresponde a la constante de gas ideal igual a 0,08314466 [m³-bar/ K-kmol].

El usuario solo puede, además de los parámetros antes mencionados, fijar costos de inversión para el sistema de almacenamiento (ver siguiente figura).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J																																										
1	Índice			Cadena de Valor del Hidrógeno																																															
81	<table><tr><th colspan="3">G.Almacenamiento</th></tr><tr><th>Parámetros técnicos</th><th>Valor</th><th>Unidad</th></tr><tr><td>Autonomía de almacenamiento</td><td>2</td><td>días</td></tr><tr><td>Almacenamiento requerido</td><td>325</td><td>kg H₂</td></tr><tr><td>Almacenamiento requerido</td><td>161</td><td>kmol H₂</td></tr><tr><td>Presión de almacenamiento</td><td>200</td><td>bar</td></tr><tr><td>Temperatura de almacenamiento</td><td>343</td><td>K</td></tr><tr><td>Volumen de almacenamiento</td><td>1,264</td><td>m³</td></tr><tr><td>Tipo de almacenamiento</td><td>Gaseoso</td><td>-</td></tr><tr><td>Almacenamiento gaseoso por defecto</td><td>Tipo I</td><td>-</td></tr><tr><th>Parámetros económicos</th><th>Valor</th><th>Unidad</th></tr><tr><td>Costo de inversión</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>☒ Valor por defecto</td><td>277,943</td><td>USD</td></tr><tr><td>☐ Valor usuario</td><td></td><td>USD</td></tr></table>									G.Almacenamiento			Parámetros técnicos	Valor	Unidad	Autonomía de almacenamiento	2	días	Almacenamiento requerido	325	kg H ₂	Almacenamiento requerido	161	kmol H ₂	Presión de almacenamiento	200	bar	Temperatura de almacenamiento	343	K	Volumen de almacenamiento	1,264	m ³	Tipo de almacenamiento	Gaseoso	-	Almacenamiento gaseoso por defecto	Tipo I	-	Parámetros económicos	Valor	Unidad	Costo de inversión	-	-	☒ Valor por defecto	277,943	USD	☐ Valor usuario		USD
G.Almacenamiento																																																			
Parámetros técnicos										Valor	Unidad																																								
Autonomía de almacenamiento										2	días																																								
Almacenamiento requerido										325	kg H ₂																																								
Almacenamiento requerido										161	kmol H ₂																																								
Presión de almacenamiento										200	bar																																								
Temperatura de almacenamiento										343	K																																								
Volumen de almacenamiento										1,264	m ³																																								
Tipo de almacenamiento										Gaseoso	-																																								
Almacenamiento gaseoso por defecto										Tipo I	-																																								
Parámetros económicos										Valor	Unidad																																								
Costo de inversión										-	-																																								
☒ Valor por defecto										277,943	USD																																								
☐ Valor usuario		USD																																																	
82																																																			
83																																																			
84																																																			
85																																																			
86																																																			
87																																																			
88																																																			
89																																																			
90																																																			
91																																																			
92																																																			
93																																																			
94																																																			
95																																																			
96																																																			
97																																																			
98																																																			

...

Evaluación - Buses

Evaluación - Celdas

Evaluación - General

Datos usuario avanzado

Flujo de caja

Listo

Calcular



Accesibilidad: es necesario investigar

Figura 27: Parámetros avanzados de almacenamiento.

En caso de dejar los costos de inversión por defecto, la herramienta estima los costos unitarios de almacenamiento en función de la presión de almacenamiento establecida en <https://hyjack.tech/components/storage>, de acuerdo con:

$$CI_{\text{almacenamiento}} = 0.0015 * P_{\text{almacenamiento}}^2 + 0.2521 * P_{\text{almacenamiento}} + 448.54$$

Donde:

- $CI_{\text{almacenamiento}}$ corresponde al costo unitario de inversión de almacenamiento gaseoso [euros/kg].
- $P_{\text{almacenamiento}}$ corresponde a la presión de almacenamiento definida en 200 [bar] a no ser que el usuario establezca un valor diferente.

Figura 28: Estimación de costos de almacenamiento de hidrógeno.

3.3.3.2 Transporte

Si el usuario escoge que el consumo del hidrógeno no ocurra en forma “in situ”, entonces se activan los costos de transporte. Estos pueden ser personalizados en la pestaña “Datos usuario avanzado” como muestra la siguiente figura:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J																															
1	Índice				Cadena de Valor del Hidrógeno																																				
97					<table><tr><th colspan="3">H. Transporte</th></tr><tr><th>Parámetro</th><th>Valor</th><th>Unidad</th></tr><tr><td>Consumo Insitu</td><td>NO</td><td>-</td></tr><tr><td>Rango de distancia *</td><td>2000</td><td> ▼ km</td></tr><tr><td>Tipo de transporte corta distancia</td><td>Pipelines Nuevas</td><td>-</td></tr><tr><td>Costo unitario de transporte corta distancia</td><td>1.90</td><td>USD / kg</td></tr><tr><td>Tipo de transporte larga distancia</td><td>Barco Líquido</td><td>-</td></tr><tr><td>Costo unitario de transporte larga distancia</td><td>0.73</td><td>USD / kg</td></tr><tr><td>Costo unitario de transporte total</td><td>2.63</td><td>USD / kg</td></tr><tr><td colspan="3">* Distancias menores a los 1.000 km se consideran como corta distancia.</td></tr></table>							H. Transporte			Parámetro	Valor	Unidad	Consumo Insitu	NO	-	Rango de distancia *	2000	▼ km	Tipo de transporte corta distancia	Pipelines Nuevas	-	Costo unitario de transporte corta distancia	1.90	USD / kg	Tipo de transporte larga distancia	Barco Líquido	-	Costo unitario de transporte larga distancia	0.73	USD / kg	Costo unitario de transporte total	2.63	USD / kg	* Distancias menores a los 1.000 km se consideran como corta distancia.		
H. Transporte																																									
Parámetro					Valor	Unidad																																			
Consumo Insitu					NO	-																																			
Rango de distancia *					2000	▼ km																																			
Tipo de transporte corta distancia					Pipelines Nuevas	-																																			
Costo unitario de transporte corta distancia					1.90	USD / kg																																			
Tipo de transporte larga distancia					Barco Líquido	-																																			
Costo unitario de transporte larga distancia					0.73	USD / kg																																			
Costo unitario de transporte total					2.63	USD / kg																																			
* Distancias menores a los 1.000 km se consideran como corta distancia.																																									
98																																									
99																																									
100																																									
101																																									
102																																									
103																																									
104																																									
105																																									
106																																									
107																																									
108																																									
109																																									
110																																									
◀ ▶ ... Esquema - General Evaluación - Buses Evaluación - Celdas Evaluación - General Datos usuario avanzado ⌂ Accesibilidad: es necesario investigar																																									

Figura 29: Selección de parámetros avanzados de transporte.

El usuario puede escoger distancias de transporte en rangos de 1000 [km]. La opción “<1000 km” se considera corta distancia, en tanto la distancia por sobre los 1000 [km] son considerados larga distancia. El usuario puede escoger, en el rango de corta distancia, un transporte en camión gasificado, licuado o pipelines nuevas, cada una con su costo asociado. Los costos de larga distancia varían en función de la distancia de acuerdo con la siguiente gráfica:

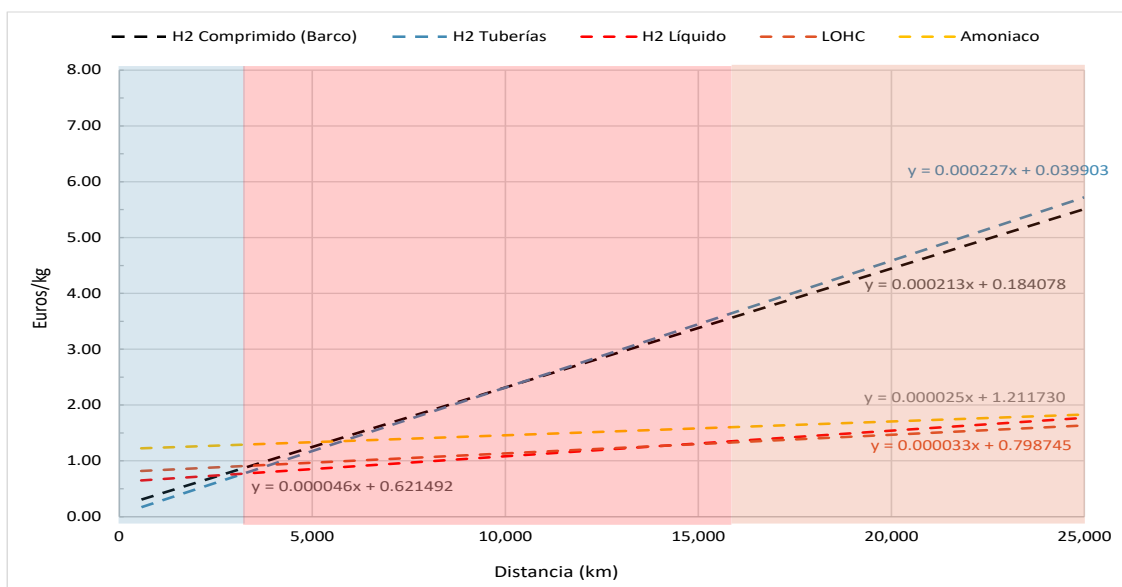


Figura 30: costos unitarios de transporte como función de la distancia para largas distancias

Fuente: Elaboración propia. Datos (European Commission , 2021).

Los costos totales de transporte corresponden a la suma de los costos de corta y larga distancia.

4 EVALUACIÓN FINANCIERA - ECONÓMICA

A partir de los parámetros técnicos y económicos, la herramienta calcula en forma mensual los siguientes flujos: producción, consumo e inyección de energía; producción de hidrógeno y oxígeno; consumo de agua. Estos permiten calcular los ingresos operacionales (venta de excedentes de energía y ventas de hidrógeno⁷) y los costos variables de producción, los cuales permiten finalmente construir los flujos de caja del proyecto seleccionado. A continuación, se detallan los cálculos que realiza la herramienta.

4.1 Flujos de producción y consumo

4.1.1 Generación ERNC

Para el caso solar, la generación anual está dada por la generación anual de un año tipo (descrita en la sección 3.2) multiplicada por un factor de degradación anual del panel fotovoltaico, según se muestra en la ecuación a continuación:

$$G_{i,degrad} = G_i * (1 - Degrad_{pv})^t$$

Donde:

- $G_{i,degrad}$ corresponde a la generación de un mes tipo i incluyendo el efecto de degradación del panel.
- G_i corresponde a la generación de un mes tipo teórico i .
- $Degrad_{pv}$ corresponde a un porcentaje de degradación anual del panel fotovoltaico.
- t corresponde al año de la evaluación, con $t=0$ para el primer año de operación (para el primer año se asume que no hay degradación).

En el caso del recurso eólico no se considera factor de degradación.

4.1.2 Consumo de energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica está dado por la producción de hidrógeno y un consumo específico que incluye: el consumo específico de energía para agua de procesos; el consumo específico de energía del compresor; y el consumo específico de energía del electrolizador. La ecuación a continuación determina el consumo de energía del proyecto:

$$Consumo_{energía,i} = Hidrógeno_i * (CE_{agua} + CE_{compresor} + CE_{electrolizador})$$

⁷ También se podría considerar el campo de ingresos por venta de oxígeno, pero no se ha calculado en esta versión de la herramienta.

Donde:

- $Consumo_{energía,i}$ corresponde a la demanda de energía para la producción de H₂ en el mes i en [kWh].
- $Hidrógeno_i$ corresponde a la producción de hidrógeno en el mes i en [kg] de H₂ (ver sección 4.1.4).
- CE_{agua} corresponde al consumo específico de energía para agua de procesos en [kWh / kg H₂].
- $CE_{compresor}$ corresponde al consumo específico de energía del compresor en [kWh / kg H₂] (ver sección 3.3.2.1).
- $CE_{electrolizador}$ corresponde al consumo específico de energía del electrolizador en [kWh / kg H₂].

La demanda de energía para el tratamiento de agua estará dada por la ecuación a continuación:

$$CE_{agua} = CA_{agua_{procesos}} * CE_{agua_{m3}}$$

Donde:

- $CA_{agua_{procesos}}$ corresponde al consumo de agua de procesos [m³ / kg H₂] (ver sección 4.1.5).
- $CE_{agua_{m3}}$ corresponde al consumo específico de energía para agua de procesos [kWh / m³].

Por último, el consumo específico de energía del electrolizador estará dado por la ecuación a continuación:

$$CE_{electrolizador} = \frac{\eta_{electrolizador}}{PE_{H_2}}$$

Donde:

- $\eta_{electrolizador}$ corresponde a la eficiencia del stack del electrolizador en [kWh / Nm³].
- PE_{H_2} corresponde al peso específico del H₂ [kg / m³].

4.1.3 Inyección/retiros de energía

Solo para el caso *ongrid* y en caso de que la generación de energía a partir de ERNC sea mayor que la necesaria para producir la demanda de hidrógeno definida es posible inyectar excedentes a la red. Esta estará dada por la diferencia entre la generación y el consumo de energía para producir hidrógeno:

$$Inyección_{electr,i} = \max(0, G_{i,degrad} - Consumo_{energía,i})$$

En el caso de los retiros de energía desde la red para proyectos *ongrid*, cuando el consumo sea mayor que la generación de energía, estos están dados por la siguiente ecuación:

$$Retiro_{electr,i} = \max (0, Consumo_{energía,i} - G_{i,degrad})$$

4.1.4 Producción de hidrógeno

Al igual que en el caso de la generación de energía, la producción de hidrógeno se estima a partir de una producción teórica mensual de hidrógeno y una degradación anual del stack del electrolizador. La ecuación de cálculo utilizada se presenta a continuación:

$$Hidrógeno_{i,degrad} = Hidrógeno_i * (1 - Degrad_{electr})^t$$

Donde:

- $Hidrógeno_{i,degrad}$ corresponde a la generación de un mes tipo i incluyendo el efecto de degradación del stack.
- $Hidrógeno_i$ corresponde a la generación de hidrógeno en un mes tipo teórico i .
- $Degrad_{electr}$ corresponde a un porcentaje de degradación anual del stack del electrolizador.
- t corresponde al año de la evaluación, con $t=0$ para el primer año de operación (para el primer año se asume que no hay degradación).

4.1.5 Consumo de agua

El consumo de agua puede estar asociado o no al tratamiento de osmosis inversa en función de lo que haya decidido el usuario en la celda G62 de la pestaña "Datos usuario avanzado". En el caso de que el proyecto no incluya osmosis inversa, el consumo de agua estará dado por la ecuación a continuación:

$$CAgua_{procesos} = \frac{PM_{H2O}}{PM_{H2} * Densidad_{H2O}}$$

Donde:

- PM_{H2O} corresponde al peso molecular del agua [kg / kmol].
- PM_{H2} corresponde al peso molecular del H_2 [kg / kmol].
- $Densidad_{H2O}$ corresponde a la densidad del agua [kg / m³].

En el caso de que el proyecto incluya osmosis inversa, el consumo específico de agua estará dado por la siguiente ecuación:

$$CAgua_{procesos} = \frac{PM_{H2O}}{PM_{H2} * Densidad_{H2O}} * \left(\frac{1}{1 + razón_agua} \right)$$

Donde:

- $razón_agua$ corresponde a la razón de agua rechazo/agua filtrada en el proceso de osmosis.

4.2 Ingresos operacionales

La producción de hidrógeno y electricidad (este último en caso de que existan excedentes) son valorizadas de acuerdo con precios de mercado ingresados por el usuario. De esta manera, para cada producto se estiman los ingresos de acuerdo con la fórmula a continuación:

$$\text{Ingresos} = \text{Precio}_{H_2} * \text{Hidrógeno}_{degrad} + \text{PrecioVenta}_{electr} * \text{Inyección}_{electr}$$

Donde:

- *Ingresos* corresponde a los ingresos operacionales del proyecto percibidos por ventas.
- *Precio_{H2}* corresponde al precio de venta del hidrógeno que define el usuario.
- *Hidrógeno_{degrad}* corresponde a la cantidad de hidrógeno producido.
- *PrecioVenta_{electr}* corresponde al precio de venta de la energía definido por el usuario.
- *Inyección_{electr}* corresponde a la cantidad de energía inyectada a la red.

Los precios de venta deben ser ingresados por el usuario en la hoja de datos de entrada ("Evaluación – Buses", "Evaluación – Celdas" o "Evaluación – General" según corresponda).

Parámetros económicos		
Parámetro	Valor	Unidad
Precio venta de energía	0.01	USD / kWh
Precio compra de energía	0.04	USD / kWh
Agua	1.0	USD / m ³
Precio de venta de hidrógeno	8.0	USD / kg
Inflación ⁽⁵⁾	0%	%
Depreciación	Lineal	-

(5) Para revisar qué elementos son reajustados hacer click aquí.

Figura 31: Parámetro de inflación, hojas de Evaluación.

Los precios pueden mantenerse fijos a lo largo del periodo o ser proyectados considerando la aplicación de un valor de inflación ingresado por el usuario. Para esto el usuario debe indicar el valor de la inflación en la hoja de datos de entrada ("Evaluación – Buses", "Evaluación – Celdas" o "Evaluación – General" según corresponda) y adicionalmente debe indicar en forma individual para cada parámetro si será proyectado (hoja "Datos usuario avanzado").

Parámetros económicos		
Parámetro	Valor	Unidad
Precio venta de energía	0.01	USD / kWh
Precio compra de energía	0.04	USD / kWh
Agua	1.0	USD / m ³
Precio de venta de hidrógeno	8.0	USD / kg
Inflación ⁽⁵⁾	0%	%
Depreciación	Lineal	-

(5) Para revisar qué elementos son reajustados hacer click aquí.

Figura 32: Parámetro de inflación, hojas de Evaluación.

M. Proyección de precios		
Parámetro	Valor	Unidad
Precio compra de energía	SI	-
Precio compra agua	SI	-
Precio de venta de hidrógeno	SI	-
Costos O&M	SI	-
Costos Fijos	SI	-
Precio venta de excedentes eléctricos	SI	-

Figura 33: Parámetros ajustados por inflación, hoja "Datos usuario avanzado".

En base a lo señalado, se calcula un factor de proyección anual para cada precio, el cual es aplicado sobre este al momento de calcular los ingresos operacionales. Los factores utilizados para los cálculos que realiza la herramienta se presentan en la hoja "Proyección de precios", a partir de la fila 28.

4.3 Costos fijos y operacionales

4.3.1 Costos variables

Los costos variables de operación incluyen los costos de: O&M para la etapa de electrólisis; O&M para la etapa de compresión; agua de procesos; compra de energía; y transporte. Las fórmulas de cálculo se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 7: Parámetros costos operacionales.

Ítem costo operacional	Parámetros	Fórmulas
Costo O&M electrólisis	• $\%_{OPEX_electro}$: Porcentaje sobre el CAPEX del electrolizador. • $CAPEX_{electr}$: Costo de electrolizador⁸. • Inf_t: Índice de inflación del año t.	$O\&M_{electro} = \%_{OPEX_electro} * CAPEX_{electr} * Inf_t$
Costo O&M compresión	• $\%_{OPEX_compres}$: Porcentaje sobre el CAPEX del compresor. • $CAPEX_{compres}$: Costo de compresor y almacenamiento⁹. • Inf_t: Índice de inflación del año t.	$O\&M_{compres} = \%_{OPEX_compres} * CAPEX_{compres} * Inf_t$
Costo compra de agua	• $Precio_{agua}$: Precio por [m³] de agua. • $CAgua_{procesos}$: Consumo de agua¹⁰. • Inf_t: Índice de inflación del año t.	$Costo_{agua} = Precio_{agua} * CAgua_{procesos} * Inf_t$
Costo compra de energía	• $PrecioCompra_{electr}$: precio de venta de la energía. • $Retiro_{electr}$: retiros de electricidad desde la red¹¹. • Inf_t: Índice de inflación del año t.	$Costo_{elec} = PrecioCompra_{electr} * Retiro_{electr} * Inf_t$
Transporte	• $Hidrogeno_{i,degrad}$: cantidad de hidrógeno producido¹². • $CU_{transporte}$: costo unitario de transporte¹³.	$Costo_{transporte} = Hidrogeno_{i,degrad} * CU_{transporte}$

Fuente: Elaboración propia.

⁸ Detallado en sección 3.3.1.

⁹ Detallado en sección 3.3.2.2.

¹⁰ Detallado en sección 4.1.5.

¹¹ Detallado en sección 4.1.3.

¹² Detallado en sección 4.1.4.

¹³ Detallado en sección 3.3.3.2.

Los precios de compra de agua y energía deben ser ingresados por el usuario en los datos de entrada ("Evaluación – Buses", "Evaluación – Celdas" o "Evaluación – General" según corresponda) en el bloque de "Parámetros económicos" y, al igual que en el caso de los precios de venta mencionados anteriormente, estos son proyectados de acuerdo a lo indicado por el usuario.

Parámetros económicos		
Parámetro	Valor	Unidad
Precio venta de energía	0.01	USD / kWh
Precio compra de energía	0.04	USD / kWh
Agua	1.0	USD / m ³
Precio de venta de hidrógeno	8.0	USD / kg
Inflación ⁽⁵⁾	0%	%
Depreciación	Lineal	-

(5) Para revisar qué elementos son reajustados hacer click aquí.

Figura 34: Precios de compra de energía y agua, hojas de Evaluación.

M. Proyección de precios		
Parámetro	Valor	Unidad
Precio compra de energía	SI	-
Precio compra agua	SI	-
Precio de venta de hidrógeno	SI	-
Costos O&M	SI	-
Costos Fijos	SI	-
Precio venta de excedentes eléctricos	SI	-

Figura 35: Parámetros ajustados por inflación, hoja "Datos usuario avanzado".

Los valores de parámetros porcentuales de costos de operación y mantenimiento ($\%_{OPEX_electro}$ y $\%_{OPEX_compres}$) se encuentran en la hoja "Parámetros técnicos".

4.3.2 Costos fijos

Los costos fijos de operación del proyecto incluyen los costos de la planta renovable y los costos asociados a seguros. Las fórmulas de cálculo se presentan a continuación:

$$Costo_{plantaERNC} = \%_{OPEX_planta} * CAPEX_{planta}$$

Donde:

- $Costo_{plantaERNC}$: Costos fijos de asociados a planta ERNC [USD].
- $CAPEX_{planta}$: Costo de planta fotovoltaica/eólica¹⁴ [USD].
- $\%_{OPEX_planta}$: Porcentaje sobre costo de planta [%].

$$Seguros = \%_{Seguros_CAPEX} * CAPEX_{total}$$

¹⁴ Ver sección 3.2.4.

Donde:

- $\%_{seguros_CAPEX}$ corresponde a un porcentaje sobre CAPEX total.
- $CAPEX_{total}$ corresponde al costo total de inversiones, el cual considera el costo de la planta ERNC (sección 3.2.4) y los costos de la planta de electrólisis (ver figura a continuación).

Componente	CAPEX electrólisis (USD)
Electrolizador	1,732,586
Sistema de control	-
Sistema de purificación de agua	-
Sistema de purificación de hidrógeno	-
Compresor	201,359
Almacenamiento	615,750
Ingeniería y obras civiles (I&OC)	1,732,586
TOTAL	4,282,281

Figura 36: Costos de inversión planta de electrólisis, hoja "Inversiones".

4.4 CAPEX recambio de stacks

Además de los costos de inversión de la planta ERNC y de la planta de electrólisis se incluyen las inversiones asociadas al recambio del *stack* del electrolizador. Para ello se considera la vida útil de los *stacks* según datos del electrolizador utilizado¹⁵ y un contador mensual de horas de uso, lo cual determina el mes y el año en el que se deberá realizar el recambio. Paralelamente se estiman costos de inversión proyectados de *stacks* según tipo (PEM o alcalino), los cuales se presentan en la hoja "Proyección de precios".

Índice	Proyección de Precios
1	
3	Modelo Electrolizador Seleccionado
4	Modelo Electrolizador
5	Tipo
6	Potencia Nominal
7	Costo Stack 2021
8	Costo Stack 2030
9	Costo Stack 2021
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	

Figura 37: Proyeccion de precios de stacks, hoja "Proyección de precios".

¹⁵ Dato proveniente de catálogo de electrolizadores en hoja "Datos electrolizadores" o valor ingresado por el usuario según sea el caso.

El costo de inversión anual se estima según indica la siguiente ecuación:

$$Costo_stacks = Precio_{stack,t}$$

Donde:

- $Costo_stacks$ corresponde al costo de inversión asociado al recambio de *stacks*.
- $Precio_{stack,t}$ corresponde al precio de *stack* de electrolizador para el año t .

4.5 Depreciación

El cálculo de depreciación se realiza mediante método lineal o acelerado, según indique el usuario en la hoja de datos de entrada ("Evaluación – Buses", "Evaluación – Celdas" o "Evaluación – General" según corresponda).

Parámetros económicos		
Parámetro	Valor	Unidad
Precio venta de energía	0.01	USD / kWh
Precio compra de energía	0.04	USD / kWh
Agua	1.0	USD / m ³
Precio de venta de hidrógeno	8.0	USD / kg
Inflación ⁽⁵⁾	0%	%
Depreciación	Lineal	-

(5) Para revisar qué elementos son reajustados hacer click aquí.

Figura 38: Tipo de depreciación, hojas datos de entrada ("Evaluación – Buses", "Evaluación – Celdas" o "Evaluación – General" según corresponda).

A partir de la vida útil de los activos y los costos de inversión de estos, se estima el valor anual de depreciación en la hoja "Depreciación". Para ello se utiliza la ecuación a continuación:

$$Depreciación = \frac{Valor\ activos}{Vida\ útil}$$

Donde:

- $Depreciación$ corresponde al valor depreciado anualmente.
- $Valor\ activos$ corresponde al costo de inversión (CAPEX) de los equipos.
- $Vida\ útil$ corresponde a los años de vida útil de los activos, de acuerdo con el listado del Servicio de Impuestos Internos¹⁶ de Chile.

Al igual que la inversión realizada en el año 0, la reinversión asociada al recambio de *stacks* es depreciada a partir del año en que se realiza el recambio.

¹⁶ https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm

4.6 Costos financieros

Los valores de intereses y amortización se calculan a partir de un valor DSCR¹⁷ meta y los CFADS¹⁸ calculados anualmente. El valor del DSCR meta, así como los distintos parámetros que permiten calcular el costo de capital, se presentan en la hoja "Datos usuario avanzado" en la sección K.

K. Parámetros financieros		
Parámetro	Valor	Unidad
Beta desapalancado	0.67	
Tasa de Impuestos	27%	%
Tasa libre de riesgo	3.16%	%
Riesgo país	1.63%	%
Premio de mercado	6.22%	%
Costos de Capital	6.84%	%
DSCR Meta	1.12	-

Figura 39: Parámetros financieros usuario avanzado, hoja "Datos usuario avanzado".

Por otra parte, los CFDAS anuales se obtienen a partir de la construcción del flujo de caja libre, el cual se presenta en la hoja "Flujo de caja" a partir de la fila 39.

Los datos financieros a partir de los cuales se estima la deuda se presentan en la hoja datos de entrada ("Evaluación – Buses", "Evaluación – Celdas" o "Evaluación – General" según corresponda). Un mayor detalle respecto a estos se presenta en la tabla a continuación:

Parámetros financieros		
Parámetros	Valor	Unidad
Año de inicio de la evaluación	2022	-
Mes de inicio	Julio	-
Costo de capital	6.8%	%
Periodo de evaluación	-	-
☐ Valor por defecto		años
☒ Valor usuario	20	años
Apalancamiento ⁽⁴⁾	60%	%
Tasa de interés anual	5.00%	%
Periodo préstamo	9	años
Periodo de gracia	12	meses
WACC	5.6%	%

Figura 40: Parámetros financieros, hojas de evaluación .

Tabla 8: Parámetros evaluación financiera.

Parámetro	Descripción
Costo de capital (%)	Costo de capital utilizado para determinar el WACC.

¹⁷ Debt-Service Coverage Ratio.

¹⁸ Cash Flow Available for Debt Service.

Parámetro	Descripción
Periodo de evaluación (años)	Periodo de años en el que se hará la evaluación. La herramienta ofrece un valor por defecto a partir correspondiente a la vida útil de los activos. Alternativamente el usuario puede seleccionar un periodo menor a esta vida útil.
Apalancamiento (%)	Porcentaje de la inversión que corresponde a capital propio. La deuda inicial asociada al préstamo ($M_{crédito}$) es calculada a partir de este parámetro de la siguiente forma: $M_{crédito} = CAPEX_{total} * (1 - Apalancamiento)$
Tasa de interés	Tasa de interés entregada por la institución financiera.
Periodo préstamo (años)	Duración del préstamo en función de los periodos ofrecidos por las instituciones financieras y la vida útil del proyecto.
Periodo de gracia (meses)	Periodo de tiempo libre de costos financieros.
WACC	Tasa de descuento utilizada para determinar el valor presente de los flujos futuros.

Fuente: Elaboración propia.

Un dato importante para destacar dentro de la hoja "Flujo de caja" es la celda F56, la cual indica el monto de la deuda al final del periodo de préstamo. En caso de que este valor sea mayor a cero, el valor se destacará con color amarillo y será notificado mediante un mensaje cuando se realice la evaluación y se presione el botón de "Calcular resultados" en la hoja de datos de entrada ("Evaluación - Buses", "Evaluación - Celdas" o "Evaluación - General" según corresponda). En la siguiente figura se muestra un ejemplo de lo mencionado anteriormente:

	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
38														
39														
41														
42														
43														
44														
45														
46														
47														
48														
50														
51														
52														
53														
54														
55														
56														
57														
58														
59														
60														
61														
62														
63														
64														
65														
66														
67														
68														
69														

2. Flujo de caja libre												
Item	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
EBITDA (+)	-	152,234	394,543	387,400	381,855	376,366	372,413	365,551	360,225	354,952	371,562	393,479
Delta Capital de trabajo (+)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CAPEX (+)	-6,599,948	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-170,116	-
Impuestos (-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-72,339
CFADS	-6,599,948	152,234	394,543	387,400	381,855	376,366	372,413	365,551	360,225	354,952	201,446	321,140

3. Servicio a la deuda												
Item	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031		
Periodo Préstamo	9	años										
Año fin préstamo	2031	-										
Periodo de gracia	1	años										
DSCR Meta	1.12											
Deuda Al final del periodo de préstamo	883,572											
Deuda inicial	2,639,979	2,771,978	2,774,109	2,559,130	2,339,806	2,114,487	1,882,822	1,643,118	1,397,579	1,144,538		
Amortización	-131,999	-2,131	214,978	219,324	225,320	231,665	239,704	245,539	253,041	260,966		
Deuda final	2,771,978	2,774,109	2,559,130	2,339,806	2,114,487	1,882,822	1,643,118	1,397,579	1,144,538	883,572		
CFADS	-	152,234	394,543	387,400	381,855	376,366	372,413	365,551	360,225	354,952		
DSCR meta	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12		
Servicio de deuda meta (cuota)	-	136,468	353,684	347,280	342,310	337,389	333,845	327,694	322,920	318,193		
Costos financieros	131,999	138,599	138,705	127,957	116,990	105,724	94,141	82,156	69,879	57,227		
Amortización meta	-131,999	-2,131	214,978	219,324	225,320	231,665	239,704	245,539	253,041	260,966		
Dividendos	-	15,766	40,859	40,120	39,545	38,977	38,568	37,857	37,305	36,759		

Flujo de caja del proyecto (con financiamiento)												
...	Evaluación - Celdas	Datos usuario avanzado	Flujo de caja	Cálculos mensuales	Proyección de precios	Inversiones	Depreciación	Costos transporte & alm	Costos co	...		

Figura 41: Flujo de caja libre, hoja "Flujo de caja".

La construcción del flujo de caja libre es construida a partir del EBITDA y los impuestos obtenidos del flujo de caja para el proyecto sin financiamiento (desarrollado en la misma hoja "Flujo de caja" entre las filas 7 y 37) y los costos de inversión (de la planta ERNC, la planta de electrólisis y los recambios de stacks). Los costos de capital no han sido estimados para la herramienta.

En la hoja "*Flujo de caja*" se presentan los cálculos asociados. En esta hoja se presenta un flujo de caja para el proyecto sin financiamiento, un flujo de caja libre, el Servicio a la deuda, un flujo de caja para el proyecto con financiamiento, y finalmente el flujo de caja del inversionista.

5 RESULTADOS

Los resultados de la evaluación se presentan en la misma hoja de datos de entrada ("Evaluación - Buses", "Evaluación - Celdas" o "Evaluación - General" según corresponda) a partir de la columna L.

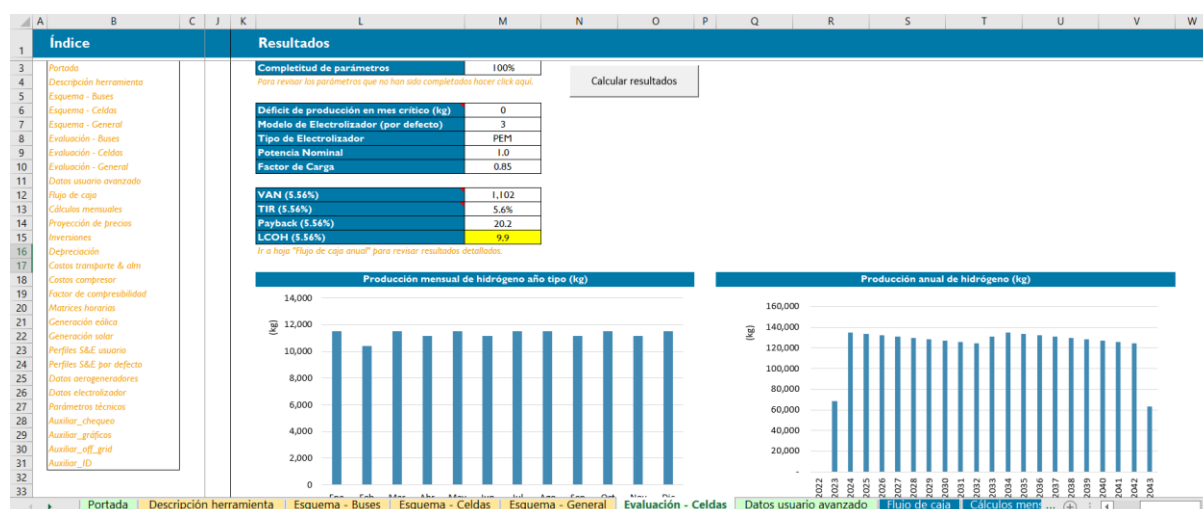


Figura 42: Salida de resultados.

Como primer paso, y tal como se indicó en la sección 2.2, se debe verificar que todos los datos estén completos. Posteriormente se puede presionar el botón "Calcular resultados" para correr la macro asociada y obtener los resultados.

Entre las celdas L6 y M10 se presentan algunos datos de la evaluación, mientras que entre las celdas L12 y M15 se presentan indicadores relevantes de la evaluación, como son el VAN, TIR, *payback* y LCOH. Estos indicadores se presentan para el proyecto puro (sin financiamiento). No obstante, se ha agregado un link debajo de estos resultados en caso de que se quieran revisar los flujos de caja y construir indicadores adicionales.

Es importante señalar que los resultados presentados entre las celdas L6 y M15 se presentan siempre y cuando se tenga la totalidad de parámetros requeridos completados.

Una celda relevante incluida es la celda M6. Este campo indica si existe un déficit de producción de hidrógeno para la configuración de los parámetros seleccionados. En caso de ser 0, se satisface la demanda diaria en cada mes. En caso contrario, la celda se destaca con color rojo y deben modificarse los tamaños de la planta ERNC o el electrolizador.

Más abajo, a partir de la fila 18, se presentan gráficamente los siguientes resultados:

- Producción mensual de hidrógeno año tipo [kg].
- Producción anual de hidrógeno [kg] para el periodo de evaluación.
- Consumos e inyecciones de energía eléctrica en un año tipo [MWh].
- Consumos de agua mensual año tipo [m³].
- Estructura de costos de inversión.
- Producción anual de excedentes de electricidad [kWh].
- Estructura de costos normalizados de producción.
- Estructura de costos variables de producción.
- Ingresos Anuales [USD].
- Resumen EBITDA.
- Resumen servicio de deuda.

Debajo de cada gráfico se ha añadido un enlace que permite ver los resultados a partir de los cuales se construyen los gráficos.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los indicadores se presentan a continuación:

Tabla 9: Cálculo de indicadores de resultado.

Indicadores	Descripción	Fórmula
Valor Presente Neto (VPN)	Permite calcular el valor presente de flujos de caja futuros. Se calcula sobre el flujo de caja puro del proyecto, sobre el flujo de caja con financiamiento, y sobre el flujo de caja del inversionista.	Se utiliza la fórmula de Excel VNA: $VPN = flujo_0 + VNA(WACC, flujos_i)$ Donde <i>WACC</i> corresponde a la tasa de descuento, <i>flujo₀</i> corresponde al flujo monetario del año 0, <i>flujos_i</i> corresponde a los flujos monetarios proyectados a partir del año 1.
Tasa Interna de Retorno (TIR)	Mide los rendimientos futuros esperados de la inversión para cada tecnología.	Se utiliza la fórmula de Excel TIR: $TIR = TIR(flujos)$ Donde <i>flujos</i> corresponde a los flujos monetarios proyectados
Periodo de retorno de la inversión (<i>payback</i>)	Corresponde al periodo para el cual se recupera la inversión inicial.	$PayBack = [Último periodo con FlujoAcumulado negativo] + ([Valor absoluto del último Flujo Acumulado negativo]/[Valor del Flujo de Caja del siguiente periodo])$
Costo nivelado del hidrógeno (LCOH)	Costo unitario de hidrógeno para el cual el VNP es cero.	Se calcula con la herramienta Solver de Excel

Fuente: Elaboración propia.

6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La herramienta permite realizar un análisis de sensibilidad para ciertas variables operacionales, económicas y financieras que determinan la rentabilidad del proyecto. Para esto, en cada hoja de evaluación ("Evaluación - Buses", "Evaluación - Celdas" o "Evaluación - General") se ha habilitado un botón asociado a una macro que permite obtener resultados de VAN, TIR y LCOH al variar los siguientes parámetros.

- Precio venta hidrógeno [USD/kg].
- Precio venta electricidad [USD/kWh].
- Precio compra electricidad [USD/kWh].
- CAPEX total (CAPEX de planta ERNC y CAPEX de equipos de electrólisis).
- Factor de planta.
- Nivel de apalancamiento.
- Tasa de interés.

En la sección 2.2, en el punto 6, se explicó brevemente cómo realizar el análisis de sensibilidad. Las variables que serán sensibilizadas se encuentran en las celdas AB9 e Y12 para el caso de variables operacionales o económicas; y en las celdas AB22 e Y25 para el caso de variables financieras. Asociado a estas variables se encuentran los pasos o variaciones que se aplicarán a cada variable (celdas Z9, Z10, Z22, Z23). Los resultados se presentan en formato de tablas de doble entrada como se muestra a continuación:

Sensibilización de variables económicas y operacionales						
VAN (MM USD)		0.25				
Paso eje horizontal	5%	Precio venta electricidad (USD/kWh)				
Paso eje vertical	5%	-10%	-5%	Selec.	5%	10%
CAPEX	-10%	90%	0.99	0.99	1.00	1.01
	-5%	95%	0.61	0.62	0.62	0.63
	Selec.	100%	0.23	0.24	0.25	0.25
	5%	105%	-0.15	-0.14	-0.13	-0.12
	10%	110%	-0.52	-0.52	-0.51	-0.50

Sensibilización de variables financieras						
VAN (MM USD)		0.25				
Paso eje horizontal	5%	Nivel de apalancamiento				
Paso eje vertical	1	-10.0%	-5.0%	Selec.	5.0%	10.0%
Periodo préstamo	-2	7	50.0%	55.0%	60.0%	65.0%
	-1	8	0.44	0.34	0.25	0.15
	Selec.	9	0.44	0.34	0.25	0.15
	1	10	0.44	0.34	0.25	0.15
	2	11	0.44	0.34	0.25	0.15

Figura 43: Salidas de análisis de sensibilidad para VAN.

En total se presentan seis bloques con los resultados. Los bloques comprendidos entre las filas 9 y 16 evalúan las variaciones de variables económicas y operacionales según se describe a continuación:

1. El bloque comprendido entre las celdas Y7 y AF16 presenta los distintos VAN obtenidos para variaciones en el parámetro horizontal (celda AB9) y el parámetro vertical (celda Y12). (ver bloque superior en Figura 43).
2. El bloque comprendido entre las celdas AH7 y AO16 presenta las distintas TIR obtenidas para variaciones en el parámetro horizontal (celda AB9) y el parámetro vertical (celda Y12).
3. El bloque comprendido entre las celdas AQ7 y AX16 presenta los distintos LCOH obtenidos para variaciones en el parámetro horizontal (celda AB9) y el parámetro vertical (celda Y12).

Similarmente, los bloques comprendidos entre las celdas Y20 y AF29 evalúan las variaciones de variables financieras según se describe a continuación:

1. El bloque comprendido entre las celdas Y20 y AF29 presenta los distintos VAN obtenidos para variaciones en el parámetro horizontal (celda AB22) y el parámetro vertical (celda Y25). (ver bloque inferior en Figura 43).
2. El bloque comprendido entre las celdas AH20 y AO29 presenta las distintas TIR obtenidas para variaciones en el parámetro horizontal (celda AB22) y el parámetro vertical (celda Y25).
3. El bloque comprendido entre las celdas AQ20 y AX29 presenta los distintos LCOH obtenidos para variaciones en el parámetro horizontal (celda AB22) y el parámetro vertical (celda Y25).

Un elemento interesante es que en este formato pueden visualizarse los resultados de la sensibilización de 2 parámetros al mismo tiempo.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Anglo American. (23 de Agosto de 2021). *ANGLO AMERICAN GENERA LA PRIMERA MOLÉCULA DE HIDRÓGENO VERDE PARA VEHÍCULOS CERO CARBONO EN CHILE*. Obtenido de <https://chile.angloamerican.com/media/press-releases/pr-2021/2021-08-23.aspx>
- Breeze, P. (2018). *Power System Energy Storage Technologies - Chapter 8 - Hydrogen Energy Storage*. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812902-9.00008-0>
- Council on Clean Transportation. (2020). *Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe*. Obtenido de https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/final_icct2020_assessment_of_hydrogen_production_costs-v2.pdf
- Enel. (10 de septiembre de 2021). *Instalan la primera piedra del proyecto piloto para producir hidrógeno verde en Magallanes*. Obtenido de <https://www.enel.cl/es/conoce-enel/prensa/press-enel-green-power-chile/d202109-instalan-primera-piedra-proyecto-piloto-producir-hidrogeno-verde-en-magallanes.html>
- European Commission . (2021). *Science for policy briefs - Assessment of hydrogen delivery options*.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2021). *Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems*. Obtenido de <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf>
- GIZ . (2021b). *Estudio de prefactibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis para la entidad Espinos S.A.*
- GIZ . (2021c). *Estudio de prefactibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis para la entidad GNA.*
- GIZ. (2019). *Tecnologías del Hidrógeno y perspectivas para Chile*.
- GIZ. (2021a). *Estudio de prefactibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis para las entidades Aguas CAP y Energías de la Patagonia y Aysén SpA.*
- Gobierno de Chile. (2020). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile*. Consejo de Ministros para la Sustentabilidad. Obtenido de https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf
- Hydrogen Council. (2020). *Path to hydrogen competitiveness A cost perspective*. Obtenido de https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*.
- IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction*. Obtenido de https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- Ito, H., Miyazaki, N., Ishida, M., & Nakano, A. (2016). Efficiency of unitized reversible fuel cell systems. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Mayyas, A., Chadly, A., Amer, S., & Azar, E. (2022). Economics of the Li-ion batteries and reversible fuel cells as energy storage systems when coupled with dynamic electricity pricing schemes. *Energy*.

- Ministerio de Energía. (2020). *Estrategia Nacional Hidrógeno Verde*. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente. (13 de Junio de 2022). Ley 21.455 - Ley Marco de Cambio Climático. Obtenido de <http://bcn.cl/32l1s>
- NREL. (2014). *Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs: Systems Integration*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/58564.pdf>
- Ramírez, P. (2021). *Introducción al hidrógeno como vector energético. Cadena de valor del hidrógeno*.
- Store and Go. (2019). *Analysis on future technology options and on techno-economic optimization*. Obtenido de https://www.storeandgo.info/fileadmin/downloads/deliverables_2019/20190801-STOREandGO-D7.7-EIL-Analysis_on_future_technology_options_and_on_techno-economic_optimization.pdf
- Vahidinasab, V., & Habibi, M. (2021). *Energy Storage in Energy Markets - Chapter 15 - Electric energy storage systems integration in energy markets and balancing services*. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820095-7.00019-4>