



Guía del usuario: Herramienta de estimación de reducción de emisiones de GEI de proyectos de hidrógeno verde

agosto 2021

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:

Rainer Schröer

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: agosto 2021

Guía del usuario: Herramienta de estimación de reducción de emisiones de GEI de proyectos de hidrógeno verde /
GIZ, WSP; revisión y modificación; edición.
Santiago de Chile, 2021.
27 páginas
Energía - Hidrógeno verde – Tecnologías hidrógeno – MRV – -Combustibles sintéticos



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, 20 de agosto de 2021

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen ejecutivo | 7 |
| 1 Introducción | 9 |
| 2 Aspectos generales..... | 9 |
| 3 Cálculo de reducciones de cada tipo de proyecto | 11 |
| 3.1 Cambio de combustible en aplicaciones de transporte | 11 |
| 3.1.1 Motor Dual | 12 |
| 3.1.2 Vehículo 100% hidrógeno | 14 |
| 3.2 Producción de combustibles sintéticos..... | 16 |
| 3.3 Cambio de proceso de H2 gris a H2 verde | 19 |
| 3.3.1 Producción de amoníaco verde..... | 20 |
| 3.3.2 Cambio de proceso existente | 22 |
| 3.4 Uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde | 25 |
| 4 Referencias | 27 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Descripción de las hojas contenidas en la Herramienta de estimación de reducción de emisiones de GEI de proyectos de hidrógeno verde. | 10 |
| Tabla 2 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo motor dual: nivel 1. | 12 |
| Tabla 3 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo motor dual: nivel 2, dato disponible consumo de combustible..... | 13 |
| Tabla 4 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo motor dual: nivel 2, dato disponible rendimiento y distancia recorrida. | 13 |
| Tabla 5 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Vehículo 100% hidrógeno: Nivel 1. | 14 |
| Tabla 6 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Vehículo 100% hidrógeno: Nivel 2, dato disponible consumo de combustible..... | 15 |
| Tabla 7 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Vehículo 100% hidrógeno: Nivel 2, dato disponible rendimiento y distancia recorrida. | 15 |
| Tabla 8 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del tipo Producción de combustibles sintéticos..... | 17 |
| Tabla 9 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de emisiones producto de la captura de carbono. | 19 |
| Tabla 10 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Producción de amoniaco Verde: Nivel 1. | 20 |
| Tabla 11 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Producción de amoniaco Verde: Nivel 2. | 21 |
| Tabla 12 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del Cambio de proceso existente: Nivel 1. | 23 |
| Tabla 13 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del Cambio de proceso existente: Nivel 2. | 24 |
| Tabla 14 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de la intensidad de emisiones del proyecto de hidrógeno verde utilizada en el tipo de proyecto Cambio de proceso existente: Niveles 1 y 2. | 24 |
| Tabla 15 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de la reducción de emisiones para uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde: Nivel 1. | 26 |
| Tabla 16 Datos y fuentes utilizados en los cálculos del consumo equivalente de gas natural, dato utilizado en uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde Nivel 1..... | 26 |

Glosario

CC: Captura de carbono.

CH4: Metano.

CO2: Dióxido de carbono.

DEFRA: Department for Environment, Food and Rural Affairs.

GEI: Gases de efecto invernadero.

H2: Hidrógeno.

H2V: Hidrógeno Verde.

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

N2O: Óxido de nitrógeno.

PPA: *Power Purchase Agreement*.

MTT: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.

NH3: Amoníaco.

SEN: Sistema Eléctrico Nacional.

RESUMEN EJECUTIVO

Fondo y Objetivo

El presente estudio fue elaborado en el marco del proyecto “Descarbonización del Sector Energía en Chile”, en cooperación con el Ministerio de Energía, y financiado por el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación Natural y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU). El objetivo general del estudio fue desarrollar una Herramienta de estimación de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de proyectos de hidrógeno verde, para complementar la herramienta de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) de emisiones de CO₂ que actualmente posee el Ministerio de Energía.

Metodología

La herramienta fue elaborada siguiendo la misma estructura del sistema MRV de proyectos de autoabastecimiento del Ministerio de Energía. Se desarrolló una planilla independiente, que permite recopilar los datos y realizar los cálculos de reducción de emisiones de GEI para distintos tipos y subtipos de proyectos de hidrógeno verde. La herramienta contempla un enfoque de cálculo de reducción de emisiones *ex ante*, que permite tener una primera aproximación de la magnitud de la reducción de emisiones, y se diseñó considerando que su usuario principal es el Ministerio de Energía.

En forma complementaria, se desarrolló una guía para apoyar al usuario de la herramienta en su comprensión y utilización, y un video tutorial para ilustrar de manera práctica su funcionamiento. También, se analizaron y propusieron distintas propuestas de mejora para la herramienta del sistema MRV de proyectos de autoabastecimiento del Ministerio de Energía, para finalmente implementar dos de dichas propuestas en la planilla.

Resultados

La herramienta desarrollada permite cuantificar el potencial de reducción de emisiones de GEI *ex ante* de los tipos de proyectos de hidrógeno verde que se presentan a continuación.

Cambio de combustibles por hidrógeno verde en transporte: Este tipo de proyecto considera la reducción de emisiones generadas por el reemplazo de vehículos a combustible fósil por vehículos que utilicen hidrógeno verde. Permite realizar el cálculo de reducción de emisiones tanto de vehículos que utilicen 100% de hidrógeno verde, como de vehículos que funcionen con un porcentaje distinto de hidrógeno verde. La reducción de emisiones de GEI ocurre al evitar el uso de combustible fósil en los vehículos.

Producción de combustibles sintéticos: Este tipo de proyecto considera la reducción de emisiones que ocurre en el proceso productivo de metanol, a partir de hidrógeno verde y la captura de CO₂ de la atmósfera en una instalación nueva. A diferencia del tipo de proyecto anterior, en este caso se trata de un proceso nuevo y no un reemplazo de un proceso existente. Se consideran las potenciales emisiones asociadas al uso de combustible fósil y/o electricidad de la red en el proceso productivo y en la captura de CO₂. El cálculo se realiza en función de la cantidad de metanol producido, por lo que, para combustibles sintéticos derivados del metanol, se debe ingresar la cantidad de metanol producido. El alcance del proyecto considera solo la

producción de combustibles sintéticos y no su uso. Para que no exista doble contabilidad de la reducción de emisiones, si el productor reconoce la reducción de emisiones por la captura de carbono, el comprador no podrá reconocer reducción de emisiones por el uso del combustible neutro en emisiones en reemplazo de un combustible fósil.

Cambio de proceso de producción de hidrógeno gris a hidrógeno verde: Este tipo de proyecto considera la reducción de emisiones resultante del cambio en el proceso productivo de hidrógeno gris a hidrógeno verde, bajo el supuesto que el hidrógeno gris es producido mediante reformado de gas metano con vapor, mientras que el hidrógeno verde se produce por electrólisis del agua con energía renovable. Por completitud, la planilla permite incorporar potenciales consumos de energía de la red y/o combustibles fósiles dentro del proceso de producción de hidrógeno verde.

Además, como caso particular, este tipo de proyecto considera un subtipo para cuantificar la reducción de emisiones asociadas a la producción de amoníaco con hidrógeno verde en lugar de hidrógeno gris. En este caso se considera la reducción de emisiones resultantes del cambio de hidrógeno gris a hidrógeno verde utilizado como materia prima, y se asume que el proceso productivo del amoníaco se mantiene, es decir, solo cambia el origen de la materia prima. Este corresponde a un enfoque simplificado para la cuantificación de la reducción de emisiones.

Uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde: Este tipo de proyecto contempla la reducción de emisiones resultante de la operación de un equipo con una mezcla de hidrógeno verde y gas natural, que en su línea base opera sólo con gas natural. La reducción de emisiones se genera al reemplazar gas natural por hidrógeno verde. La reducción de emisiones ocurre cuando el usuario final consume el hidrógeno, y no están bajo el control del distribuidor. Es necesario tomar resguardos para evitar la doble contabilidad, entre el productor y los usuarios.

1 INTRODUCCIÓN

La Guía de usuario de la Herramienta de estimación de reducción de emisiones de GEI de proyectos de hidrógeno verde tiene como objetivo apoyar al usuario de la herramienta en su comprensión y utilización. Esta herramienta está diseñada para cuantificar el potencial de reducción de emisiones de GEI *ex ante* de los siguientes tipos de proyectos de hidrógeno verde:

- Cambio de combustibles por hidrógeno verde en transporte.
 - Motor Dual.
 - Vehículo 100% hidrógeno.
- Producción de combustibles sintéticos.
- Cambio de proceso de producción de hidrógeno gris a hidrógeno verde.
 - Producción de amoníaco verde.
 - Cambio de proceso existente.
- Uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde.

Esta guía presenta los contenidos de la Herramienta de estimación de reducción de emisiones de GEI de proyectos de hidrógeno verde y detalla los alcances, supuestos, principales parámetros considerados y el procedimiento para el uso correcto de la herramienta.

2 ASPECTOS GENERALES

El funcionamiento general de la planilla considera el uso de diferentes hojas dentro del libro. El usuario debe completar la información requerida en la hoja “Registro de información”, una vez ingresados todos los datos, el total de reducciones se muestra en la hoja “reporte total tecnología”. Además, se presentan las hojas de estimación de datos donde es posible ver los cálculos realizados para cada tipo de proyecto. También es posible ver, y cambiar de ser necesario, los datos utilizados para los cálculos en las hojas de listas y datos. Finalmente se encuentran la hoja “Guía” en la que se describe el funcionamiento de la planilla y las hojas “modelo>>”, “resultados>>” y “admin>>” las que cumplen la función de espaciar las secciones de la planilla.

El uso de la planilla es el siguiente: se ingresan los datos de los proyectos en la hoja “registro de información” donde **se deben llenar las casillas en color verde agua de izquierda a derecha**, al ir ingresando información las casillas cambiarán de color indicando en verde agua las casillas que se deben llenar y en gris las que no se deben llenar. Esta hoja contiene celdas donde se debe ingresar información general del proyecto como el nombre y ubicación, así como también el tipo de proyecto que se desea calcular. Además, las columnas “Control” permiten corroborar que los datos fueron ingresados de forma correcta, indicando “OK” si los datos ingresados en las celdas a su izquierda fueron ingresados correctamente, “COMPLETAR DATOS” en el caso de que falten datos y “CORREGIR DATO” en el caso de que existan datos erróneos.

La columna CUT entrega el Código Único Territorial correspondiente a la comuna ingresada, esta columna se muestra en naranja ya que es calculada por la planilla.

Las filas 10 a 28 contienen información necesaria para el funcionamiento interno de la planilla y pueden permanecer ocultas.

Los datos utilizados por la planilla se encuentran en las hojas “Listas y datos...”, de ser necesario actualizar o mejorar alguno de los datos es posible cambiarlos en estas hojas.

La herramienta contiene 15 hojas que se describen en la siguiente tabla.

Tabla 1 Descripción de las hojas contenidas en la Herramienta de estimación de reducción de emisiones de GEI de proyectos de hidrógeno verde.

| Nombre Hoja | Descripción |
|---------------------------------|--|
| Guía | Esta hoja explica brevemente cómo se deberá utilizar el libro de trabajo. |
| Registro de información | En esta hoja el usuario debe ingresar toda la información para el cálculo. Requerimientos específicos por tecnología, contiene celdas de control para validación del correcto ingreso de datos. |
| Modelo>> | Separador para dividir el modelo en secciones. |
| Estimación transporte | Esta hoja realiza los cálculos de la tecnología transporte. |
| Estimación comb. Sintéticos | Esta hoja realiza los cálculos de la tecnología combustibles sintéticos. |
| Estimación H2 gris a H2 Verde | Esta hoja realiza los cálculos de la tecnología H2 gris a H2 Verde. |
| Estimación Blending | Esta hoja realiza los cálculos de la tecnología blending, para uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde. |
| Resultados>> | Separador para dividir el modelo en secciones. |
| Reporte total tecnología | Esta hoja entrega los resultados de reducción de emisiones. |
| Admin>> | Separador para dividir el modelo en secciones. |
| Listas y datos generales | Listas y datos utilizados para el funcionamiento de la planilla. |
| Listas y datos transporte | |
| Listas y datos comb. Sintéticos | |
| Listas y datos H2 gris a H2V | |
| Listas y datos blending | |

Fuente: Elaboración propia.

3 CÁLCULO DE REDUCCIONES DE CADA TIPO DE PROYECTO

En esta sección se explica la forma de uso, datos, fuentes y ecuaciones correspondientes a cada uno de los tipos de proyectos, así como también los subtipos, niveles de cálculo y consideraciones a tener en cuenta a la hora de utilizar la planilla.

3.1 CAMBIO DE COMBUSTIBLE EN APLICACIONES DE TRANSPORTE

Este tipo de proyecto considera la reducción de emisiones generadas por el reemplazo de vehículos a combustible fósil por vehículos que utilicen hidrógeno verde. Permite realizar el cálculo de reducción de emisiones tanto de vehículos que utilicen 100% de hidrógeno verde, como de vehículos que funcionen con un porcentaje distinto de hidrógeno verde. La reducción de emisiones de GEI ocurre al evitar el uso de combustible fósil en los vehículos. Para los vehículos con un porcentaje diferente de consumo de hidrógeno se debe seleccionar la opción “Motor Dual”.

La forma en la que se calcula la reducción de emisiones será diferente dependiendo de los datos con los que el usuario disponga, para esto se presentan los niveles 1 y 2. El usuario debe seleccionar el nivel dependiendo de los datos que disponga.

- Nivel 1: requiere distancia recorrida, tipo de vehículo y combustible a reemplazar.
- Nivel 2: requiere consumo de combustible del vehículo a reemplazar, o el rendimiento, y distancia recorrida por los vehículos del proyecto.

El nivel 1 estima el consumo de combustible a partir de los datos ingresados, por lo que, de disponer datos para ambos niveles, se recomienda el uso del nivel 2 para disminuir el nivel de incertidumbre.

Una vez seleccionado el nivel correspondiente, se deben ingresar los datos que requiere el nivel seleccionado. La distancia recorrida es ingresada por el usuario. La planilla cuenta con listas desplegables para seleccionar el tipo de vehículo a reemplazar, este puede ser “liviano-mediano” que corresponde a autos y camionetas, o puede ser “pesado” que corresponde a camiones. Una vez seleccionado el tipo de vehículo se debe seleccionar un subtipo de vehículo que se asemeje al que se desea calcular, para esto, existe una lista desplegable que entregará los subtipos de vehículos considerados en la planilla correspondiente al tipo de vehículo seleccionado. Para el caso de los vehículos “Liviano – mediano” se debe indicar, además, el uso principal del vehículo, es decir, si se utiliza en ciudad, carretera o mixto.

Se asume que vehículos a hidrógeno verde recorren al menos la misma distancia que los vehículos a combustible fósil en el escenario base.

Los cálculos realizados para el Nivel 1 considera valores por defecto de rendimiento de MTT e intensidad de emisiones de DEFRA.

A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas por la planilla.

3.1.1 MOTOR DUAL

Este subtipo de proyecto considera la reducción de emisiones generadas al cambiar parcialmente el combustible utilizado por los vehículos de línea base. El reemplazo de combustibles fósiles por hidrógeno verde se calcula en términos energéticos. Es importante señalar que la fracción de combustible a reemplazar ingresada por el usuario es utilizada para calcular la masa de combustible fósil que se deja de utilizar respecto del combustible utilizado en el escenario de línea base.

3.1.1.1 NIVEL 1

El usuario debe indicar el tipo de vehículo a reemplazar, el combustible utilizado por el vehículo a reemplazar, el subtipo de vehículo a reemplazar, el uso principal del vehículo a reemplazar, el porcentaje de combustible que será reemplazado por hidrógeno verde en base energética y la distancia total recorrida por los vehículos del proyecto.

$$RE = Ie * D * (1 - x) * 10^{-3}$$

La constante 10^{-3} representa el cambio de unidades de kilogramos (kg) a toneladas (ton).

Tabla 2 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo motor dual: nivel 1.

| Dato | Fuente |
|--|---|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_{2eq}}{año} \right]$. | Calculado por la planilla. |
| Ie: Intensidad de emisiones vehículo de línea base $\left[\frac{kgCO_{2eq}}{km} \right]$. | Valor calculado en base a el rendimiento presentado en el Reporte de Consumo de Combustible y Emisiones de CO2 de Vehículos Homologados del MTT (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013) y los factores de emisión de las Directrices del IPCC (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH4 y N2O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later". Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |
| D: Distancia anual total recorrida por los vehículos del proyecto $\left[\frac{km}{año} \right]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| x: Fracción de combustible reemplazado (en términos energéticos). | Valor ingresado por el usuario. |

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.2 NIVEL 2

El cálculo de la reducción de emisiones de nivel 2 se puede realizar de dos maneras, dependiendo del dato del que disponga el usuario: Consumo de combustible, o rendimiento y distancia recorrida. Al seleccionar el nivel 2 la planilla requiere que se indique el combustible del vehículo a reemplazar y el dato del que dispone el usuario.

3.1.1.2.1 DATO DISPONIBLE CONSUMO DE COMBUSTIBLE

$$RE = C * f * (1 - x) * 10^{-3}$$

La constante 10⁻³ representa el cambio de unidades de kilogramos (kg) a toneladas (ton).

Tabla 3 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo motor dual: nivel 2, dato disponible consumo de combustible.

| Dato | Fuente |
|---|---|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_{2eq}}{año}\right]$. | Valor Calculado. |
| C: Consumo de combustible anual de combustible del total de vehículos a reemplazar $\left[\frac{ton}{año}\right]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| f: Factor de emisión del combustible (gasolina o diésel) $\left[\frac{kgCO_{2eq}}{ton\ de\ combustible}\right]$. | Calculado en base a los factores de emisión de las Directrices del IPCC del 2006 (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH ₄ y N ₂ O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later" y Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |
| x: Fracción de combustible reemplazado (en términos energéticos). | Valor ingresado por el usuario. |

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.2.2 DATO DISPONIBLE RENDIMIENTO Y DISTANCIA RECORRIDA

$$RE = \frac{1}{r} * d * f * \frac{1}{1000} * (1 - x) * D * 10^{-3}$$

La constante 1/1000 representa el cambio de unidades de litros (L) a metros cúbicos (m³) y la constante 10⁻³ representa el cambio de unidades de kilogramos (kg) a toneladas (ton).

Tabla 4 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo motor dual: nivel 2, dato disponible rendimiento y distancia recorrida.

| Dato | Fuente |
|---|--|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_{2eq}}{año}\right]$. | Valor Calculado. |
| r: Rendimiento del vehículo de línea base $\left[\frac{km}{L}\right]$. | Rendimientos promedio por tipo de carrocería, de acuerdo al Reporte de Consumo de Combustible y Emisiones de CO ₂ de Vehículos Homologados del MTT (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013) |
| d: Densidad del combustible del vehículo de línea base (gasolina o diésel) $\left[\frac{ton}{m^3}\right]$. | Balance Nacional de Energía. (Comisión Nacional de Energía, 2019) |

| Dato | Fuente |
|--|--|
| f: Factor de emisión del combustible del vehículo de línea base (gasolina o diésel) $\left[\frac{kgCO_{2eq}}{ton_{comb}} \right]$. | Calculado en base a los factores de emisión de las Directrices del IPCC del 2006 (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH4 y N2O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later" y Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |
| x: Fracción de combustible reemplazado (en términos energéticos). | Valor ingresado por el usuario. |
| D: Distancia total anual recorrida por los vehículos del proyecto $\left[\frac{km}{año} \right]$. | Valor ingresado por el usuario. |

Fuente: elaboración propia.

3.1.2 VEHÍCULO 100% HIDRÓGENO

Este subtipo de proyecto considera la reducción de emisiones generada por el cambio del combustible de los vehículos en su totalidad por hidrógeno verde.

3.1.2.1 NIVEL 1

El usuario debe indicar el tipo de vehículo a reemplazar, el combustible utilizado por el vehículo a reemplazar, el subtipo de vehículo a reemplazar, el uso principal del vehículo a reemplazar y la distancia total recorrida por los vehículos del proyecto.

$$RE = Ie * D * 10^{-3}$$

La constante 10⁻³ representa el cambio de unidades de kilogramos (kg) a toneladas (ton).

Tabla 5 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Vehículo 100% hidrógeno: Nivel 1.

| Dato | Fuente |
|---|---|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_{2eq}}{año} \right]$. | Valor Calculado. |
| Ie: Intensidad de emisiones vehículo de línea base $\left[\frac{kgCO_{2eq}}{km} \right]$. | Valor calculado en base a el rendimiento presentado en el Reporte de Consumo de Combustible y Emisiones de CO2 de Vehículos Homologados del MTT (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013) y los factores de emisión de las Directrices del IPCC (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH4 y N2O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later". Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |
| D: Distancia anual total recorrida por los vehículos del proyecto $\left[\frac{km}{año} \right]$. | Valor ingresado por el usuario. |

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.2 NIVEL 2

El cálculo de la reducción de emisiones de nivel 2 se puede realizar de dos maneras, dependiendo del dato del que disponga el usuario: Consumo de combustible, o rendimiento y distancia recorrida. Al seleccionar el nivel 2 la planilla requiere que se indique el combustible del vehículo a reemplazar y el dato del que dispone el usuario.

3.1.2.2.1 DATO DISPONIBLE CONSUMO DE COMBUSTIBLE

$$RE = C * f * 10^{-3}$$

La constante 10^{-3} representa el cambio de unidades de kilogramos (kg) a toneladas (ton).

Tabla 6 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Vehículo 100% hidrógeno: Nivel 2, dato disponible consumo de combustible.

| Dato | Fuente |
|---|---|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_{2eq}}{año}\right]$. | Valor Calculado. |
| C: Consumo anual de combustible del total de vehículos a reemplazar $\left[\frac{ton}{año}\right]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| f: Factor de emisión del combustible (gasolina o diésel) $\left[\frac{kgCO_{2eq}}{ton\ de\ combustible}\right]$. | Calculado en base a los factores de emisión de las Directrices del IPCC del 2006 (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH ₄ y N ₂ O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later" y Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.2.2 DATO DISPONIBLE RENDIMIENTO Y DISTANCIA RECORRIDA

$$RE = \frac{1}{r} * d * f * \frac{1}{1000} * D * 10^{-3}$$

La constante $1/1000$ representa el cambio de unidades de L a m³ y la constante 10^{-3} representa el cambio de unidades de kilogramos (kg) a toneladas (ton).

Tabla 7 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Vehículo 100% hidrógeno: Nivel 2, dato disponible rendimiento y distancia recorrida.

| Dato | Fuente |
|---|--|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_{2eq}}{año}\right]$. | Valor Calculado. |
| r: Rendimiento del vehículo de línea base $\left[\frac{km}{L}\right]$. | Rendimientos promedio por tipo de carrocería, de acuerdo al Reporte de Consumo de Combustible y Emisiones de CO ₂ de Vehículos Homologados del MTT (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013) |

| Dato | Fuente |
|--|---|
| d: Densidad del combustible del vehículo de línea base (gasolina o diésel) $\left[\frac{ton}{m^3}\right]$. | Balance Nacional de Energía. (Comisión Nacional de Energía, 2019) |
| f: Factor de emisión del combustible del vehículo de línea base (gasolina o diésel) $\left[\frac{kgCO_{2eq}}{ton_{comb}}\right]$. | Calculado en base a los factores de emisión de las Directrices del IPCC del 2006 (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH ₄ y N ₂ O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later" y Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |
| D: Distancia total anual recorrida por los vehículos del proyecto $\left[\frac{km}{año}\right]$. | Valor ingresado por el usuario. |

Fuente: Elaboración propia.

3.2 PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES SINTÉTICOS

Este tipo de proyecto considera la reducción de emisiones que ocurre en el proceso productivo de metanol, a partir de hidrógeno verde y la captura de CO₂ de la atmósfera en una instalación nueva. A diferencia del tipo de proyecto anterior, en este caso se trata de un proceso nuevo y no un reemplazo de un proceso existente. El proceso puede utilizar energía renovable y/o energía de la red y/o combustibles fósiles, y considera el consumo energético tanto del proceso productivo del combustible sintético como de la captura de CO₂ de la atmósfera. Específicamente, se contabiliza la reducción de emisiones que ocurre en el proceso de captura de CO₂ y se descuentan las emisiones debido al uso de energía de la red y/o combustibles fósiles.

Este tipo de proyecto no especifica subtipos y existe un solo nivel, el cual requiere que se ingrese la cantidad de metanol producido¹ y, en caso de que se utilice, se debe indicar la energía de la red y los combustibles fósiles consumidos. El cálculo de las emisiones asociadas a la operación del proyecto considera las emisiones asociadas al consumo de energía y combustibles fósiles tanto del proceso productivo del combustible sintético como de la captura de CO₂ de la atmósfera, por lo tanto, el usuario deberá indicar el total de consumos en ambas etapas o alternativamente, indicar solo aquellos consumos asociados al proceso productivo del combustible sintético, en cuyo caso la herramienta asume un valor por defecto para los consumos asociados al proceso de captura de CO₂ de la atmósfera. Por lo tanto, se debe indicar en la herramienta si los datos de energía de la red y combustibles fósiles contemplan la etapa de captura de carbono, y de no estar contemplados en el consumo de energía, se debe señalar y la planilla utilizará valores por defecto para estimar las emisiones producto de la captura de carbono. Para esto, se debe seleccionar en la columna AI una de las siguientes opciones: "Sí, consumo de la red y comb. fósiles consideran CC" o "No, utilizar factor por defecto para el cálculo de emisiones de CC", de seleccionarse la primera opción, los consumos de energía eléctrica de la red y consumos de combustibles fósiles deben ser la suma de los consumos del proceso productivo más los consumos del proceso de captura de carbono, si se selecciona la segunda opción, se deben ingresar los consumos de energía eléctrica y combustibles fósiles

¹ En caso de combustibles sintéticos derivados de metanol se debe ingresar la cantidad de metanol.

correspondientes solamente al proceso productivo y la planilla utilizará valores por defecto para estimar las emisiones producto del proceso de captura de carbono.

El cálculo se realiza en función de la cantidad de metanol producido, por lo que, para combustibles sintéticos derivados del metanol, se debe ingresar la cantidad de metanol producido. El alcance del proyecto considera solo la producción de combustibles sintéticos y no su uso. Para que no exista doble contabilidad de la reducción de emisiones, si el productor reconoce la reducción de emisiones asociada a este tipo de proyecto, que proviene de la captura de carbono asociada a la producción de metanol con hidrógeno verde, el comprador no podrá reconocer reducción de emisiones por el uso del combustible neutro en emisiones en reemplazo de un combustible fósil.

La planilla permite la consideración de Power Purchase Agreement (PPA), para lo que se debe ingresar si existe PPA y a qué porcentaje del consumo total corresponde. En caso que el proyecto utilice solo energía eléctrica de fuentes renovables, deberá ingresar en la herramienta que tiene un PPA asociado al 100% de su energía de la red, y la planilla asumirá un factor de emisión igual a cero. Si el proyecto consume energía eléctrica de fuentes renovables que no provenga del sistema interconectado, no será necesario ingresar dicho consumo en la planilla.

La planilla utiliza el factor de emisión del SEN (factor del año 2020 como default y debe ser actualizado todos los años en la hoja “Listas y datos generales”), sin embargo, el usuario puede ingresar el factor de emisión de la red como input, el cual reemplazará el del SEN para ese proyecto.

La reducción de emisiones de este tipo de proyecto depende de la energía consumida, por lo que es posible que proyectos con un alto consumo de energía de la red o de combustibles fósiles (baja eficiencia) no resulten en una reducción de emisiones, lo cual arroja un valor negativo de reducción de emisiones en la herramienta.

A continuación, se detalla la ecuación utilizada para realizar el cálculo de reducción de emisiones de proyectos de producción de combustibles sintéticos:

$$RE = MetOH * \frac{PM_{CO_2}}{PM_{Metanol}} - C_r * (1 - PPA) * f_r - (C_1 * f_1 + C_2 * f_2 + C_3 * f_3) - E_{CC}$$

- Si se indica que no existe PPA, este término se considera como 0.
- El usuario indica la cantidad de combustibles fósiles utilizados (C_1 , C_2 y C_3), los términos de consumo de combustible fósil no utilizados se consideran como 0.

Tabla 8 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del tipo Producción de combustibles sintéticos.

| Dato | Fuente |
|--|---------------------------------|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_{2eq}}{año} \right]$. | Valor calculado. |
| MetOH: Metanol generado como producto final $\left[\frac{ton}{año} \right]$. | Valor ingresado por el usuario. |

| Dato | Fuente |
|--|--|
| PM_{CO_2} : Peso molecular CO2 $\left[\frac{g}{mol}\right]$. | - |
| $PM_{Metanol}$: Peso molecular Metanol $\left[\frac{g}{mol}\right]$. | - |
| C_r : Consumo anual de electricidad de la red $\left[\frac{MWh}{año}\right]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| f_r : Factor de emisión de la red $\left[\frac{tCO_{2eq}}{MWh}\right]$. | Ministerio de Energía (Ministerio de Energía, 2020) o ingresado por el usuario. |
| C_1, C_2 y C_3 : Consumo de combustibles fósiles 1, 2 y 3 respectivamente. $\left[\frac{ton}{año}\right]$ si los combustibles fósiles son diésel, GLP, carbón o petróleo residual, y $\left[\frac{m^3}{año}\right]$ si el combustible fósil es gas natural. | Valor ingresado por el usuario. |
| f_1, f_2 y f_3 : Factores de emisión de los combustibles fósiles 1, 2 y 3, respectivamente. $\left[\frac{tCO_{2eq}}{ton}\right]$ si los combustibles fósiles son diésel, GLP, carbón o petróleo residual, y $\left[\frac{tCO_{2eq}}{m^3}\right]$ si el combustible fósil es gas natural. | Calculado en base a los factores de emisión de las Directrices del IPCC del 2006 (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH4 y N2O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later" y Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |
| PPA : Fracción del total de consumo de electricidad de la red que está considerado dentro de un Power Purchase Agreement. | Valor ingresado por el usuario. |
| E_{CC} : Emisiones generadas en la captura de carbono. | Valor Calculado |

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.1 CÁLCULO DE LA EMISIONES PRODUCTO DE LA CAPTURA DE CARBONO

En caso de que los datos de consumo de energía de la red y combustibles fósiles ingresados en la planilla no consideren el consumo de energía en el proceso de captura de carbono, la herramienta calcula las emisiones generadas en este proceso con la siguiente ecuación:

$$E_{CC} = D_e * \left(\frac{PM_{CO_2}}{PM_{MetOH}}\right) * f_r * \frac{1[MWh]}{1000[kWh]} + \frac{\left(D_t * f_{GN} * \left(\frac{PM_{CO_2}}{PM_{MetOH}}\right)\right)}{0,00116222 \left[\frac{kWh}{kcal}\right] * PCI_{GN} * 0,75}$$

Esta ecuación asume el uso de gas natural como fuente térmica para la captura de carbono con una eficiencia del 75%, y considera las emisiones del SEN (factor del año 2020 como default y debe ser actualizado todos los años en la hoja "Listas y datos generales") para la demanda eléctrica. Para este cálculo la planilla utiliza valores por defecto las demandas térmica y eléctrica.

De ser necesario modificar el tipo de combustible utilizado como fuente térmica para la captura de carbono es posible modificarlo en la hoja "Estimación comb. Sintéticos" donde en la columna

“Emisiones producto de la captura de carbono (tonCO₂eq/ton metanol generado)” se debe ingresar a la ecuación que contienen las celdas de esta columna y modificar los valores “Listas y datos comb. sintéticos!” y “Listas y datos comb. sintéticos!” por el factor de emisión del combustible que se desea utilizar (en kgGEI/kgcombustible o kg/m³ para gas natural), y el poder calorífico inferior del combustible que se desea utilizar (en kcal/kg o kcal/m³ para gas natural), respectivamente.

Tabla 9 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de emisiones producto de la captura de carbono.

| Dato | Fuente |
|---|---|
| E_{CC} : Emisiones generadas en la captura de carbono. | Valor calculado. |
| D_e : Demanda eléctrica. | Valor medio para captura desde el aire (Fahisi et al, 2019) y desde fuentes industriales (Carpenter, 2012). |
| PM_{CO_2} : Peso molecular CO ₂ $\left[\frac{g}{mol}\right]$. | - |
| $PM_{Metanol}$: Peso molecular Metanol $\left[\frac{g}{mol}\right]$. | - |
| f_r : Factor de emisión de la red $\left[\frac{tCO_2eq}{MWh}\right]$. | Ministerio de Energía (Ministerio de Energía, 2020) o ingresado por el usuario. |
| D_t : Demanda térmica. | Valor medio para captura desde el aire (Fahisi et al, 2019) y desde fuentes industriales (Carpenter, 2012). |
| f_{GN} : Factor de emisión del gas natural. | Directrices del IPCC (IPCC, 2006). |
| PCI_{GN} : Poder calorífico inferior del gas natural. | Engineering ToolBox (Fuels - Higher and Lower Calorific Values) (Engineering ToolBox, 2003). |

Fuente: Elaboración Propia.

3.3 CAMBIO DE PROCESO DE H₂ GRIS A H₂ VERDE

Este tipo de proyecto considera la reducción de emisiones resultante del cambio en el proceso productivo de hidrógeno gris a hidrógeno verde, bajo el supuesto que el hidrógeno gris es producido mediante reformado de gas metano con vapor, mientras que el hidrógeno verde se produce por electrólisis del agua con energía renovable. Por completitud, la planilla permite incorporar potenciales consumos de energía de la red y/o combustibles fósiles dentro del proceso de producción de hidrógeno mediante electrólisis.

Este tipo de proyecto presenta dos subtipos: Cambio en el proceso productivo de hidrógeno gris a hidrógeno verde (“cambio de proceso existente”) y, como caso particular, este tipo de proyecto considera un subtipo para cuantificar la reducción de emisiones asociadas a la producción de amoníaco con hidrógeno verde en lugar de hidrógeno gris. En este caso se considera la reducción de emisiones resultantes del cambio de hidrógeno gris a hidrógeno verde utilizado como materia prima, y se asume que el proceso productivo del amoníaco se mantiene, es decir, solo cambia el origen de la materia prima.

Además, existen dos niveles que dependen de los datos de los que se disponga para el cálculo:

- Nivel 1: para el subtipo “cambio de proceso existente”, requiere producción esperada de hidrógeno verde y producción histórica de hidrógeno gris. Para el subtipo “producción de amoníaco verde”, requiere la cantidad de amoníaco producida.

- Nivel 2 (sólo para el subtipo “cambio de proceso existente”): requiere además la intensidad de emisiones de la producción de hidrógeno gris.

El cálculo de Nivel 1 para ambos tipos de proyecto asume una intensidad de emisiones de la producción de hidrógeno gris de 9 [tCO₂eq/tH₂] (Hawkins et al, 2014).

3.3.1 PRODUCCIÓN DE AMONIACO VERDE

Este subtipo de proyecto considera la reducción de emisiones resultantes del cambio de hidrógeno gris a hidrógeno verde utilizado como materia prima en el proceso de producción de amoníaco. Este corresponde a un enfoque simplificado para la cuantificación de la reducción de emisiones.

Se asume que el proceso de producción de amoníaco no cambia, sólo se cambia el hidrógeno utilizado como materia prima para la reacción, de hidrógeno gris (línea base) a verde (proyecto calculado), por lo que no se consideran los consumos energéticos del proceso de producción de amoníaco, ya que estos serán los mismos para ambos procesos.

La reducción de emisiones corresponde al hidrógeno gris que se deja de utilizar como materia prima al ser reemplazado por hidrógeno verde, es decir, el hidrógeno que reacciona con nitrógeno para formar amoníaco y no como fuente de energía para el proceso de producción.

La planilla presenta dos formas de cálculo, el nivel 1 que asume que el hidrógeno verde utilizado es 100% verde, es decir, que no se generaron emisiones en la producción de éste, y el Nivel 2 que permite indicar el consumo de energía de la red y/o de combustibles fósiles en la producción de hidrógeno y considerar la intensidad de las emisiones de éste.

3.3.1.1 NIVEL 1

El cálculo de reducción de emisiones requiere que se seleccione Nivel 1 y se indique el amoníaco verde producido por el proyecto, también se puede indicar la eficiencia de conversión de esta reacción de manera opcional, de no ingresarse la eficiencia, la planilla asume una eficiencia del 100%.

$$RE = \frac{M_{NH_3prod} * \left(\frac{PM_{H_2}}{PM_{NH_3}} \right) * Re}{\eta} * I_{eH_2\ gris}$$

Tabla 10 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Producción de amoníaco Verde: Nivel 1.

| Dato | Fuente |
|---|---------------------------------|
| M_{NH_3prod} : Flujo másico de amoníaco producido por año [$\frac{ton}{año}$]. | Valor ingresado por el usuario. |
| PM_{H_2} : Peso molecular de H ₂ , la planilla utiliza 2,016 [g/mol]. | - |
| PM_{NH_3} : Peso molecular de NH ₃ , la planilla utiliza 17,031 [g/mol]. | - |

| Dato | Fuente |
|--|--|
| <i>Re</i> : Razón estequiométrica de la conversión de H ₂ a NH ₃ (1,5 [mol/mol]). | Relación molar de la conversión de hidrógeno a amoníaco. |
| η : Eficiencia de conversión de hidrógeno a amoníaco, de no ingresarse una eficiencia de conversión, la planilla asume 100%. | Valor ingresado por el usuario. |
| <i>I_{eH₂ gris}</i> : Intensidad de emisiones del hidrógeno gris, la planilla utiliza $9 \left[\frac{tCO_{2eq}}{tonH_2} \right]$. | (Hawkins et al, 2014) |
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_{2eq}}{año} \right]$. | Valor calculado. |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2 NIVEL 2

El cálculo de reducción de emisiones requiere que se seleccione Nivel 2 y se indique el amoníaco verde producido por el proyecto, también se puede indicar la eficiencia de conversión de esta reacción de manera opcional, de no ingresarse la eficiencia, la planilla asume una eficiencia del 100%. Además, se debe indicar si existe o no consumo de la red, de existir, se debe señalar el consumo eléctrico de la red, indicar si existe PPA y el porcentaje del consumo de la red considerado por el PPA; de manera opcional se puede indicar el factor de emisión de la red o dejarla celda en blanco y la planilla utilizará el factor de emisión del SEN (factor del año 2020 como default y debe ser actualizado todos los años en la hoja "Listas y datos generales") por defecto. Además, se debe indicar cuantos tipos de combustibles fósiles considera el proyecto o seleccionar "No" en caso de que no considere combustibles fósiles para la producción de hidrógeno verde; de indicarse que se consideran combustibles fósiles, se debe seleccionar el tipo de combustible fósil y el consumo de cada uno de ellos.

$$RE = \frac{M_{NH_3prod} * \left(\frac{PM_{H_2}}{PM_{NH_3}} \right) * Re}{\eta} * (I_{H_2\ gris\ hist} - I_{H_2\ verde})$$

Donde:

$$I_{H_2\ verde} = \frac{C_r * (1 - PPA) * f_r + C_1 * f_1 + C_2 * f_2 + C_3 * f_3}{\frac{M_{NH_3prod} * \left(\frac{PM_{H_2}}{PM_{NH_3}} \right) * Re}{\eta}}$$

Tabla 11 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del subtipo Producción de amoníaco Verde: Nivel 2.

| Dato | Fuente |
|--|--|
| <i>M_{NH₃prod}</i> : Amoníaco producido por año $\left[\frac{ton}{año} \right]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| <i>PM_{H₂}</i> : Peso molecular de H ₂ , la planilla utiliza 2,016 [g/mol]. | - |
| <i>PM_{NH₃}</i> : Peso molecular de NH ₃ , la planilla utiliza 17,031 [g/mol]. | - |
| <i>Re</i> : Razón estequiométrica de la conversión de H ₂ a NH ₃ (1,5 [mol/mol]). | Relación molar de la conversión de hidrógeno a amoníaco. |

| Dato | Fuente |
|--|--|
| η : Eficiencia de conversión de hidrógeno a amoníaco, de no ingresarse una eficiencia de conversión, la planilla asume 100%. | Valor ingresado por el usuario. |
| $I_{H_2 \text{ gris hist}}$: Intensidad de emisiones del hidrógeno gris histórica $\left[\frac{tCO_2eq}{tonH_2} \right]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_2eq}{año} \right]$. | Valor Calculado. |
| $I_{H_2 \text{ verde}}$: Intensidad de emisiones del proyecto de hidrógeno verde $\left[\frac{tCO_2eq}{tonH_2} \right]$. | Valor calculado. |
| C_r : Consumo anual de electricidad de la red $\left[\frac{MWh}{año} \right]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| PPA: Fracción del total de consumo de electricidad de la red que está considerado dentro de un Power Purchase Agreement. | Valor ingresado por el usuario. |
| f_r : Factor de emisión de la red $\left[\frac{tCO_2eq}{MWh} \right]$. | Ministerio de Energía (Ministerio de Energía, 2020) o ingresado por el usuario. |
| C_1, C_2 y C_3 : Consumo de combustibles fósiles 1, 2 y 3 respectivamente (indicados por el usuario). $\left[\frac{ton}{año} \right]$ si los combustibles fósiles son diésel, GLP, carbón o petróleo residual, y $\left[\frac{m^3}{año} \right]$ si el combustible fósil es gas natural. | Valor ingresado por el usuario. |
| f_1, f_2 y f_3 : Factores de emisión de los combustibles fósiles 1, 2 y 3, respectivamente. $\left[\frac{tCO_2eq}{ton} \right]$ si los combustibles fósiles son diésel, GLP, carbón o petróleo residual, y $\left[\frac{tCO_2eq}{m^3} \right]$ si el combustible fósil es gas natural. | Calculado en base a los factores de emisión de las Directrices del IPCC del 2006 (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH4 y N2O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later" y Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 CAMBIO DE PROCESO EXISTENTE

Este subtipo de proyecto considera la reducción de emisiones resultantes del cambio de hidrógeno gris a hidrógeno verde de un proceso existente. La planilla permite el cálculo de reducciones al cambiar a hidrógeno verde producido utilizando hasta 3 tipos de combustibles fósiles y/o energía eléctrica de la red con o sin un porcentaje de esta contemplado en un PPA y/o energía renovable.

El cálculo de la reducción de emisiones considera la cantidad de hidrógeno verde producido como el mínimo entre la producción histórica de hidrógeno gris y la producción esperada de hidrógeno verde para trabajar con un valor conservador.

Existen dos niveles de cálculo, el nivel 1 utiliza un valor por defecto para la intensidad de emisiones del hidrógeno gris y el nivel 2 utiliza la intensidad de emisiones histórica de hidrógeno gris que ingresa el usuario.

3.3.2.1 NIVEL 1

El cálculo de reducción de emisiones requiere que se seleccione Nivel 1, se indique el hidrógeno verde producido por el proyecto y la producción histórica promedio de hidrógeno gris. Además, se debe indicar si existe o no consumo de la red, de existir, se debe señalar el consumo eléctrico de la red, indicar si existe PPA y el porcentaje del consumo de la red considerado por el PPA; de manera opcional se puede indicar el factor de emisión de la red o dejarla celda en blanco y la planilla utilizará el factor de emisión del (factor del año 2020 como default y debe ser actualizado todos los años en la hoja “Listas y datos generales”) por defecto. Además, se debe indicar cuantos tipos de combustibles fósiles considera el proyecto o seleccionar “No” en caso de que no considere combustibles fósiles para la producción de hidrógeno, de indicarse que se consideran combustibles fósiles se debe seleccionar el tipo de combustible fósil y el consumo de cada uno de ellos.

La ecuación que calcula la reducción de emisiones es la siguiente:

$$RE = P_m * I_{H_2gris\ def} - I_{H_2verde} * P_m$$

Tabla 12 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del Cambio de proceso existente: Nivel 1.

| Dato | Fuente |
|---|---|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_2eq}{año} \right]$. | Valor calculado. |
| P_m : Valor mínimo entre la producción histórica promedio de H ₂ gris y la producción de hidrógeno verde del proyecto $\left[\frac{ton}{año} \right]$. | Valor calculado en base a los datos ingresados por el usuario. |
| $I_{H_2gris\ def}$: Intensidad de emisiones por defecto de H ₂ gris $\left[\frac{tCO_2eq}{ton_{H_2}} \right]$. | (Hawkins et al, 2014) |
| I_{H_2verde} : Intensidad de emisiones del proyecto de hidrógeno verde $\left[\frac{tCO_2eq}{ton_{H_2}} \right]$. | Valor Calculado (la forma de cálculo está descrita en el punto 3.2.2 “Cálculo de la intensidad de emisiones del proyecto de hidrógeno verde utilizada en los niveles 1 y 2”). |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.2 NIVEL 2

El cálculo de reducción de emisiones requiere que se seleccione Nivel 2, se indique el hidrógeno verde producido por el proyecto y la producción histórica promedio de hidrógeno gris. Además, se debe indicar si existe o no consumo de la red, de existir, se debe señalar el consumo eléctrico de la red, indicar si existe PPA y el porcentaje del consumo de la red considerado por el PPA; de manera opcional se puede indicar el factor de emisión de la red o dejarla celda en blanco y la planilla utilizará el factor de emisión del SEN (factor del año 2020 como default y debe ser actualizado todos los años en la hoja “Listas y datos generales”) por defecto. Además, se debe indicar cuantos tipos de combustibles fósiles considera el proyecto o seleccionar “No” en caso de que no considere combustibles fósiles para la producción de hidrógeno, de indicarse que se consideran combustibles fósiles se debe seleccionar el tipo de combustible fósil y el consumo de

cada uno de ellos. Finalmente se debe ingresar la intensidad de emisiones histórica de hidrógeno gris, de no poseer este dato, seleccionar Nivel 1.

La ecuación que calcula la reducción de emisiones es la siguiente:

$$RE = P_m * I_{H_2gris\ hist} - I_{H_2verde} * P_m$$

Tabla 13 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de reducción de emisiones del Cambio de proceso existente: Nivel 2.

| Dato | Fuente |
|---|---|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_2eq}{año}\right]$. | Valor calculado. |
| P_m : Valor mínimo entre la producción histórica promedio de H ₂ gris y la producción de hidrógeno verde del proyecto $\left[\frac{ton}{año}\right]$. | Valor calculado en base a lo datos ingresados por el usuario. |
| $I_{H_2gris\ hist}$: Intensidad de emisiones histórica de H ₂ gris $\left[\frac{tCO_2eq}{ton_{H_2}}\right]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| I_{H_2verde} : Intensidad de emisiones del proyecto de hidrógeno verde $\left[\frac{tCO_2eq}{ton_{H_2}}\right]$. | Valor Calculado (la forma de cálculo está descrita en el punto 3.2.2 "Cálculo de la intensidad de emisiones del proyecto de hidrógeno verde utilizada en los niveles 1 y 2"). |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.3 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE EMISIONES DEL PROYECTO DE HIDRÓGENO VERDE UTILIZADA EN LOS NIVELES 1 Y 2.

A continuación, se presenta la ecuación utilizada para calcular la intensidad de emisiones del proyecto de hidrogeno verde, este valor es utilizado en los cálculos de reducción de emisiones de proyectos del tipo "Cambio de proceso de H2 gris a H2 verde".

$$I_{H_2verde} = \frac{C_r * (1 - PPA) * f_r + C_1 * f_1 + C_2 * f_2 + C_3 * f_3}{P_{H_2verde}}$$

Tabla 14 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de la intensidad de emisiones del proyecto de hidrógeno verde utilizada en el tipo de proyecto Cambio de proceso existente: Niveles 1 y 2.

| Dato | Fuente |
|---|---------------------------------|
| I_{H_2verde} : Intensidad de emisiones del proyecto de hidrógeno verde $\left[\frac{tCO_2eq}{ton_{H_2}}\right]$. | Valor Calculado. |
| C_r : Consumo anual de electricidad de la red $\left[\frac{MWh}{año}\right]$. | Valor ingresado por el usuario. |

| Dato | Fuente |
|--|--|
| PPA : Fracción del total de consumo de electricidad de la red que está considerado dentro de un Power Purchase Agreement. | Valor ingresado por el usuario. |
| f_r : Factor de emisión de la red $\left[\frac{tCO_2eq}{MWh}\right]$. | Ministerio de Energía o ingresado por el usuario. |
| C_1, C_2 y C_3 : Consumo de combustibles fósiles 1, 2 y 3 respectivamente (indicados por el usuario). $\left[\frac{ton}{año}\right]$ si los combustibles fósiles son diésel, GLP, carbón o petróleo residual, y $\left[\frac{m^3}{año}\right]$ si el combustible fósil es gas natural. | Valor ingresado por el usuario. |
| f_1, f_2 y f_3 : Factores de emisión de los combustibles fósiles 1, 2 y 3, respectivamente. $\left[\frac{tCO_2eq}{ton}\right]$ si los combustibles fósiles son diésel, GLP, carbón o petróleo residual, y $\left[\frac{tCO_2eq}{m^3}\right]$ si el combustible fósil es gas natural. | Calculado en base a los factores de emisión de las Directrices del IPCC del 2006 (IPCC, 2006). Para vehículos a gasolina se consideró factor de emisión de CH4 y N2O correspondiente a "Motor Gasoline - Low Mileage Light Duty Vehicle Vintage 1995 or Later" y Potenciales de calentamiento global del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). |
| $P_{H_2 verde}$: Producción de hidrógeno verde del proyecto $\left[\frac{ton}{año}\right]$. | Valor ingresado por el usuario. |

Fuente: Elaboración propia.

3.4 USO DE MEZCLA DE GAS NATURAL E HIDRÓGENO VERDE

Este tipo de proyecto contempla la reducción de emisiones resultante de la operación de un equipo con una mezcla de hidrógeno verde y gas natural, que en su línea base opera sólo con gas natural. La reducción de emisiones se genera al reemplazar gas natural por hidrógeno verde. Este tipo de proyecto no considera subtipos.

La reducción de emisiones ocurre cuando el usuario final consume el hidrógeno, y no están bajo el control del distribuidor. Es necesario tomar resguardos para evitar la doble contabilidad entre las emisiones contabilizadas por el productor y los usuarios.

El reemplazo de gas natural por hidrógeno verde se realiza en términos energéticos, sin embargo, los datos deben ser ingresados en flujo volumétrico.

Existe sólo un nivel de cálculo.

3.4.1.1 NIVEL 1

El cálculo de reducción de emisiones requiere que se seleccione Nivel 1, se indique la fracción de H2 en la mezcla (% en volumen), la base en la que se calculó la fracción de H2 en la mezcla, el consumo de mezcla de gas natural + H2 del equipo (m3/año), que se indicó la unidad utilizada, eficiencia del equipo que utilizará la mezcla de gas natural y H2, y la eficiencia del equipo al usar sólo gas natural; de no contar con los valores de eficiencia, ingresar 100% en ambas.

La ecuación que calcula la reducción de emisiones es la siguiente:

$$RE = \frac{\left((C_{eq\ GN} - C_{mezcla} * (1 - X_{H_2})) * PCI_{CH_4} * f_{CH_4} \right)}{1000000 \left[\frac{MJ}{TJ} \right] * 1000 \left[\frac{kg}{ton} \right]}$$

Tabla 15 Datos y fuentes utilizados en los cálculos de la reducción de emisiones para uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde: Nivel 1.

| Dato | Fuente |
|--|------------------------------------|
| RE: Reducción de emisiones $\left[\frac{tCO_2eq}{año} \right]$. | Valor calculado. |
| $C_{eq\ GN}$: Consumo equivalente de gas natural $[m^3/año]$. | Valor calculado. |
| X_{H_2} : Fracción de hidrógeno en la mezcla. | Valor ingresado por el usuario. |
| PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del gas natural. $[MJ/m^3]$. | GIZ. Estudio Blending. |
| f_{CH_4} : Factor de emisión del gas natural $[kgGEI/TJ\ combustible]$ | Directrices del IPCC (IPCC, 2006). |

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2 CÁLCULO DEL CONSUMO EQUIVALENTE DE GAS NATURAL

El consumo equivalente de gas natural utilizado en el cálculo de reducción de emisiones por uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde se calcula de la siguiente manera.

$$C_{eq\ GN} = \frac{C_m * \left((1 - X_{H_2}) * PCI_{CH_4} + X_{H_2} * PCI_{H_2} \right) * \eta_{mezcla}}{\eta_{GN} * PCI_{CH_4}}$$

Tabla 16 Datos y fuentes utilizados en los cálculos del consumo equivalente de gas natural, dato utilizado en uso de mezcla de gas natural e hidrógeno verde Nivel 1.

| Datos | Fuente |
|--|---------------------------------|
| $C_{eq\ GN}$: Consumo equivalente de gas natural $[m^3/año]$. | Valor calculado. |
| C_m : Consumo de mezcla de hidrógeno y gas natural $[m^3/año]$. | Valor ingresado por el usuario. |
| X_{H_2} : Fracción de hidrógeno en la mezcla. | Valor ingresado por el usuario. |
| PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del gas natural. $[MJ/m^3]$. | GIZ. Estudio Blending. |
| PCI_{H_2} : Poder calorífico inferior del hidrógeno. $[MJ/m^3]$. | GIZ. Estudio Blending. |
| η_{mezcla} : Eficiencia del equipo utilizando la mezcla de hidrógeno y gas natural. | Valor ingresado por el usuario. |
| η_{GN} : Eficiencia del equipo utilizando sólo gas natural. | Valor ingresado por el usuario. |

Fuente: Elaboración propia.

4 REFERENCIAS

Carpenter A. (2012). CO2 abatement in the iron and steel industry. IEA Clean Coal Centre.

Comisión Nacional de Energía. (2019). Balance Nacional de energía 2019. Recuperado el 23 de agosto de 2021, de Energía Abierta: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>

DEFRA. (2020). Greenhouse gas reporting: conversion factors.

Engineering ToolBox. (2003). Fuels - Higher and Lower Calorific Values. Recuperado el 23 de agosto de 2021, de Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

Fasihi M., Efimova O. y Breyer C. (2019). Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants.

GIZ. Estudio blending.

Hawkins T., Morelli B., Wang M., Z. Lu, Elgowainy A., Young B. y Sun P. (2014). Office of Scientific and Technical Information (U.S. Department of Energy). Recuperado el 23 de Agosto de 2021, de Office of Scientific and Technical Information: <https://www.osti.gov/biblio/1546962>

IPCC. (2007). Cuarto Informe de Evaluación del IPCC: Cambio climático 2007 (AR4).

IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Preparado por National Greenhouse Gas Inventories Programme. [Equipo de redacción H.S Eggleston., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe (eds)]. Publicado por: IGES, Japón.

Keith D. W., Holmes G., St. Angelo D. y Heidel K. (2018). A Process for Capturing CO2 from the Atmosphere.

Ministerio de Energía. (2020). Factor de emisión promedio del SEN 2020. Recuperado el 23 de agosto de 2021, de Energía Abierta: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2013). Reporte de Consumo de Combustible y Emisiones de CO2 de Vehículos Homologados del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.

Vogel B. (2017). CO2 - The Raw Material that comes from Air. Swiss Federal Office of Energy.