



# DESARROLLO DE FACTORES DE EMISIÓN ASOCIADOS PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES EN PROYECTOS DE COGENERACIÓN EN CHILE

INFORME GIZ

Contrato de Servicios No. 83400794



**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:**

Proyecto Reducción de Emisiones a través de la Aplicación  
de Cogeneración en los Sectores de la Industria y el Comercio en Chile  
Marchant Pereira 150  
7500654 Providencia  
Santiago • Chile  
+56 22 30 68 600  
www.giz.de

**Responsables:**

David Fuchs/ Cecilia Figueroa

**En coordinación:**

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

Agencia de Sostenibilidad Energética  
Monseñor Nuncio Sótero Sanz 221  
7500007 Providencia  
Santiago • Chile  
+56 2257 12 200  
www.agenciase.org

**Título:**

DESARROLLO DE FACTORES DE EMISIÓN ASOCIADOS PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES EN PROYECTOS DE  
COGENERACIÓN EN CHILE

**Autor:**

Bernardita Díaz Soto  
Nicolás Urra Riquelme

Logo



**Aclaración:**

El presente informe fue preparado por encargo del proyecto "Proyecto Reducción de Emisiones a través de la Aplicación de Cogeneración en los Sectores Industrial y Comercial en Chile" implementado por el Ministerio de Energía, Agencia Sostenibilidad Energética y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Sin perjuicio de ello, las conclusiones, opiniones y recomendaciones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. De igual forma, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar no constituye en ningún caso una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando se cite la fuente de referencia. Santiago de Chile, diciembre

## Contenido del informe

<b>1. CALCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN COGENERACIÓN .....</b>	<b>4</b>
1.1. METODOS DE CÁLCULO DE EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	4
1.1.1. Ejemplo de estimación de emisiones siguiendo el método indicado.....	5
1.2. METODOS DE ATRIBUCIÓN DE EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	6
1.2.1. Ejemplo de atribución de emisiones de GEI .....	6
<b>2. DISCUSIONES .....</b>	<b>8</b>
2.1. COMPARACIÓN DE EMISIONES CON ESCENARIO DE REEMPLAZO DE ENERGÍAS. ....	9
<b>3. CONCLUSIONES .....</b>	<b>10</b>
<b>4. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>11</b>
<b>5. ANEXO 1 DATOS DE GENERACIÓN Y CONSUMOS DE INSTALACIÓN DE EJEMPLO .....</b>	<b>12</b>
<b>6. ANEXO 2 ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE GEI .....</b>	<b>13</b>
<b>7. ANEXO 3 ATRIBUCIÓN DE EMISIONES .....</b>	<b>14</b>
7.1. ATRIBUCIÓN POR CONTENIDO DE ENERGÍA .....	14
7.2. MÉTODO DE ATRIBUCIÓN POR EXERGÍA.....	14
7.3. TOTAL DE EMISIONES ATRIBUIDAS SEGÚN MÉTODO .....	17
7.3.1. Atribución por método de contenido de energía .....	17
7.3.2. Atribución por método de exergía.....	18
7.3.3. Atribución en generación Eléctrica .....	18
7.3.4. Atribución en generación Térmica .....	18
7.3.5. Atribución por método de los Tercios .....	19
<b>8. ANEXO 4 ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE GEI DE INSTALACIÓN EJEMPLO UTILIZANDO MEDIOS CONVENCIONALES. ....</b>	<b>20</b>
8.1. ENERGÍA ELÉCTRICA.....	20
8.2. ENERGÍA TÉRMICA.....	20
<b>9. ANEXO 5 UNIDADES DE CONVERSIÓN Y DATOS UTILIZADOS .....</b>	<b>22</b>

# 1. CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN COGENERACIÓN

A continuación, en el presente informe de avance se definirán los métodos recomendados para realizar los cálculos de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes y sus atribuciones. Este informe de avance contiene el desarrollo de entregable N°3. Los métodos para cálculo y atribución de emisiones de CO<sub>2</sub> han sido descritos ampliamente en el informe de avance N°1 del proyecto “Desarrollo de factores de emisión asociados para el cálculo de emisiones en proyectos de cogeneración en Chile”.

## 1.1. METODOS DE CÁLCULO DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

De los métodos descritos en el informe de avance N°1 en el capítulo 2.2, el método recomendado y utilizado por la plataforma Huella Chile del Ministerio de Medio Ambiente, está basado en la siguiente ecuación (ver Ecuación 1):

**Ecuación 1. Fórmula para la estimación de las emisiones de GEI en fuentes estacionarias de combustión según metodología de Huella Chile.**

$$ECG = CC * FE_1$$

Donde,

ECG : Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de centrales de cogeneración

CC : Consumo de combustible en unidades de masa o volumen

FE<sub>1</sub> : Factor de emisión de gases de efecto invernadero por unidad de masa o volumen de combustible

EL consumo de combustible será ingresado en unidades de masa (kilogramos o similar) o en unidades de volumen (metros cúbicos o similar) según corresponda.

Los factores de emisión para los combustibles ya han sido definidos por el Ministerio de Medio Ambiente y se describen en la siguiente tabla considerando la información de la base de datos de factores de emisión de Huella Chile 2019<sup>1</sup> como fuente.

**Tabla 1. Factores de emisión de gases de efecto invernadero para los combustibles utilizados en Chile (Fuente: Huella Chile, 2019)**

Combustible	Factor de emisión de CO <sub>2</sub>	Factor de emisión de CH <sub>4</sub>	Factor de emisión de N <sub>2</sub> O	Unidad
Carbón	2,44	0,0005	0,0056	[kgCO <sub>2eq</sub> /kg]
Gas Ciudad	1,73			[kgCO <sub>2eq</sub> /kg]
Gas de alto horno	0,79			[kgCO <sub>2eq</sub> /kg]
Gas de refinería	0,9246	0,0004	0,0004	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ] en fase líquida
Gas Licuado de Petróleo	1.582,3485	0,7022	0,6645	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ] en fase líquida

<sup>1</sup>[https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/06/Base-de-Datos\\_Factores\\_Emision\\_HuellaChile\\_2019.xlsx](https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/06/Base-de-Datos_Factores_Emision_HuellaChile_2019.xlsx)

Gas Natural	1,9746	0,001	0,0009	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ] en fase liquida
Gasolina	2.253,6161	2,7317	5,1706	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ] en fase liquida
Kerosene	2.571,2406	3,004	5,6861	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ] en fase liquida
Nafta	2.346,9599	2,6896	5,0909	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ]
Petcoke	2,85			[kgCO <sub>2eq</sub> /kg]
Petróleo (Diesel)	2 2.698,5459	5,7904	3,0591	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ] en fase liquida
Petróleo 5	2.996,5106	3,252	6,1556	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ]
Petróleo 6	3.054,6952	3,3152	6,2751	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ]

Los datos mostrados en la Tabla 1 han sido obtenidos de Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories del IPCC preparado el 2016 en base al Balance Nacional de Energía.

Los datos de actividad serán convertidos a la unidad de masa o volumen correspondiente y luego se aplica el factor de emisión que permitirá obtener la emisión de gases de efecto invernadero requerida.

### 1.1.1. Ejemplo de estimación de emisiones siguiendo el método indicado.

A continuación, se describirá la estimación de emisiones de una institución que cuenta con un equipo de cogeneración. El equipo de cogeneración es un motor de combustión interna con agua como fluido caloportador. El periodo analizado es un registro de 12 meses de generación eléctrica y térmica. Los datos para la estimación se pueden revisar en el Anexo 1 y los supuestos utilizados se pueden revisar en detalle en el anexo 4.

Este equipo genera en promedio mensualmente 90.011 kWh eléctricos y 172.598 kWh térmicos con una eficiencia de 34% en generación eléctrica y una eficiencia de 66% de energía térmica.

Esta generación requiere un consumo de 239.845 kg de gas licuado de petróleo considerando su poder calorífico inferior en 13,139 kWh/kg<sup>2</sup>.

Las emisiones de gases de efecto invernadero para la institución indicada son las siguientes (ver Tabla 2) considerando una densidad en fase liquida del GLP de 539 kg/m<sup>3</sup><sup>3</sup>.

<sup>2</sup> [https://iea.blob.core.windows.net/assets/41f0451c-3db9-45ea-b3d9-6f28ac7536ff/Oil\\_documentation.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/41f0451c-3db9-45ea-b3d9-6f28ac7536ff/Oil_documentation.pdf)

<sup>3</sup> [https://iea.blob.core.windows.net/assets/41f0451c-3db9-45ea-b3d9-6f28ac7536ff/Oil\\_documentation.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/41f0451c-3db9-45ea-b3d9-6f28ac7536ff/Oil_documentation.pdf)

**Tabla 2. Estimación de emisiones de GEI en la instalación de ejemplo.**

Consumo de combustible [kg]	Consumo de combustible [m3]	Emisiones de CO2 [kgCO <sub>2eq</sub> ]	Emisiones de CH4 [kgCO <sub>2eq</sub> ]	Emisiones de N2O [kgCO <sub>2eq</sub> ]	Total de emisiones [kgCO <sub>2eq</sub> ]
704.723	445	704.115	312	296	704.723

La suma de las emisiones de GEI de la institución para el ciclo analizado de 2014 a 2015 es de 704.723 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes. Los resultados obtenidos se pueden revisar en el Anexo 2

## **1.2. MÉTODOS DE ATRIBUCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub>**

Los métodos de atribución descritos en el informe de avance N°1 se indican a continuación:

- Método de contenido de energía
- Método de exergía
- Selección de atribución
- Método de los tercios

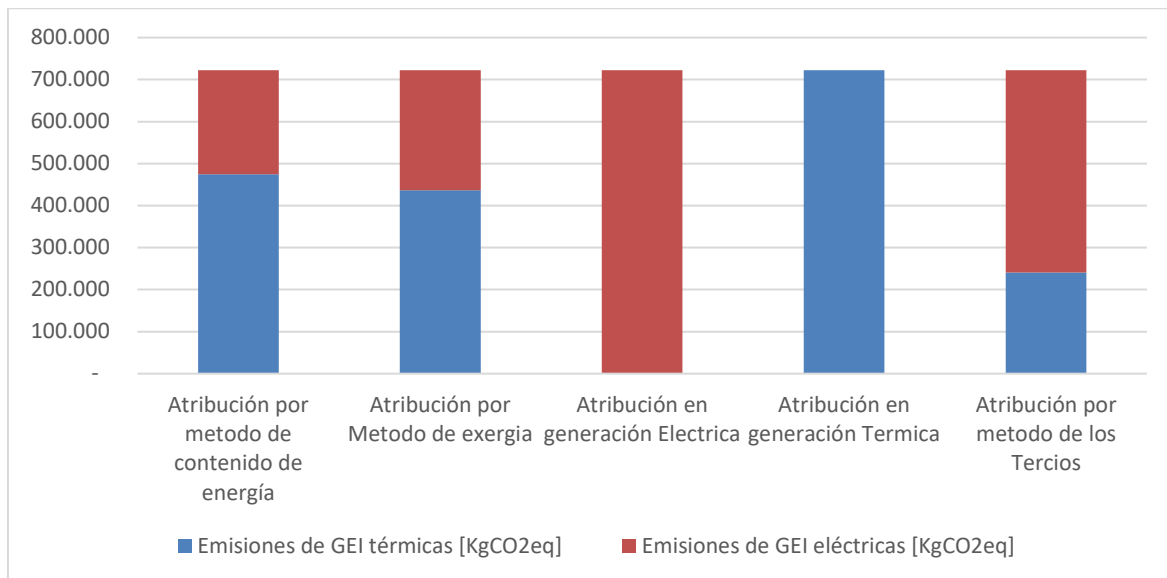
Según el estado del arte de los proyectos de cogeneración presentes en Chile, y con una declaración de emisiones conocida, la atribución de emisiones se realiza por el método de contenido de energía.

El método de contenido de energía es un método sencillo, utilizado por diversas agencias internacionales y simple para el usuario final. La desventaja de este método es que no considera la calidad de la energía entregada, pero como primer acercamiento a la atribución de emisiones genera un dato robusto.

### **1.2.1. Ejemplo de atribución de emisiones de GEI**

A continuación, se han evaluado todos los métodos de atribución de emisiones de GEI para el total de emisiones estimadas, en la instalación de ejemplo en el capítulo anterior en la tabla 2, de 704.723 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes.

Los resultados de la atribución se pueden ver en la Figura 1 para cada uno de los métodos indicados en el informe de avance N°1. Los detalles del cálculo para los métodos de atribución de contenido de energía y exergía se pueden revisar en el anexo 3.



**Figura 1. Comparación de nivel de emisiones para la instalación de ejemplo según métodos de atribución descritos.**

Cada método descrito considera diferentes factores de atribución que se pueden revisar en la Tabla 3. El detalle del cálculo se encuentra en el anexo 3 (Capítulo 7).

El método de la exergía requiere información de la instalación que no se encuentra disponible. Existen complejidades para obtener información que permita obtener un resultado acertado, considerando que las temperaturas varían cada hora, cada mes y por cada estación del año. Para la siguiente estimación se consideró un equipo de cogeneración por motor a combustión con agua como fluido portador. Las temperaturas son promedios del periodo analizado (12 meses). La estimación fue realizada utilizando los siguientes supuestos:

- Temperatura ambiental: 15°C
- Temperatura de salida del sistema: 85 °C
- Temperatura de entrada del sistema: 65°C

**Tabla 3. Factores de atribución según métodos descritos.**

Método de atribución	Factor para energía térmica	Factor para energía eléctrica
Atribución por método de contenido de energía	0,657	0,343
Atribución por Método de exergia	0,61	0,39
Atribución en generación Eléctrica	0	1
Atribución en generación Térmica	1	0
Atribución por método de los Tercios	0,333	0,666

## 2. Discusiones

Considerando los diferentes métodos de atribución, el más recomendado y utilizado por diferentes estándares nacionales e internacionales es el método de contenido de energía. Esto se debe principalmente que la fórmula de cálculo requiere información de fácil acceso y principalmente en el sistema de control y monitoreo se hace más accesible la obtención de los datos para el usuario final.

Otra discusión interesante a considerar en el factor de atribución mediante el método de exergia, es la temperatura. Esto se debe principalmente a que dentro de los indicadores que se necesitan para realizar este cálculo se encuentra la temperatura ambiental, de salida o de entorno al sistema, lo que, en el caso de Chile, se ve condicionado a la situación geográfica y climática por lo que se debieran tener distintos valores, si es que lo consideramos caso a caso. En este contexto, el ajuste o la utilización de un factor por defecto se hace necesario definir debido a la incertidumbre que podría generar con este método de cálculo.

Para complementar esta discusión es que, de acuerdo con la experiencia en el desarrollo y utilización de metodologías de cálculo de emisiones en proyectos de cogeneración, se utilizan parámetros como es: cantidad de fuente primaria y el factor de emisión asociado a la fuente y en lo que tiene que ver a la fuente secundaria, solo considera factores de eficiencia de transformación energética y en algunos casos, como es la biomasa, la humedad. Se debe comprender que los sistemas de cogeneración son más complejos ya que existen múltiples exergías térmicas, por lo que como se mencionó anteriormente, se hace necesario simplificar esta medición considerando las variables más fáciles de obtener.

Adicionalmente en las metodologías de cálculo de emisiones no se considera la temperatura como factor influyente en las emisiones totales.

Este método es utilizado por la Agencia Internacional de Energía, la unión europea y en las metodologías del MDL se considera las emisiones de acuerdo con su contenido de energía.

Es importante considerar las estimaciones permiten diferir que las emisiones atribuidas por el método de contenido de energía difieren en 16% con el método de exergia para la generación térmica, y en un 31% menos en la generación eléctrica.

La selección del método de atribución de emisiones de GEI depende de la perspectiva, considerando la planta de cogeneración, la instalación del usuario final de cogeneración o la medición nacional. (Rosen, 2008) (Holmberg, 2012). Las diferentes perspectivas pueden hacer



diferencias en el cálculo debido a las diferentes selecciones de atribución de emisiones. Esto se puede ver en la figura 1 como cambian las emisiones por tipo de energía según cada método.

Sin embargo, para efectos de sencillez y robustez del dato es utilizar el método de atribución de GEI considerando la energía de cada flujo energético y sobre todo que queremos que este factor sea utilizado en el Programa Huella Chile, entendiendo que es una plataforma la cual debe ser lo más amigable y de fácil entendimiento para el usuario final.

## 2.1. Comparación de emisiones con escenario de reemplazo de energías.

A modo de comparación se presenta la estimación de emisiones considerando la generación térmica en una caldera y la obtención de la energía eléctrica desde la matriz nacional.

Para estimar las emisiones de una caldera se considera una eficiencia del 80% y para la energía eléctrica se utiliza el factor de emisión de la red nacional que es 0,32 kg CO<sub>2e</sub>/kWh<sup>4</sup>.

Los resultados obtenidos de la estimación se presentan en la siguiente tabla (Ver Tabla 4): Los cálculos para la estimación de GEI en el método convencional y la cogeneración se pueden revisar en detalle en el anexo 4 y 2, respectivamente.

**Tabla 4. Estimación de emisiones de GEI en escenario de reemplazo de energías con cogeneración y métodos convencionales.**

Estimación de Emisiones de GEI	Emisiones de GEI en generación térmica [kgCO <sub>2eq</sub> ]	Emisiones de GEI en generación eléctrica [kgCO <sub>2eq</sub> ]
Emisiones por energía generada convencionalmente	593.399	345.645
Emisiones del sistema por cogeneración atribuidas según el método de contenido de energía	463.174	241.550
Reducción (Ahorro) de emisiones de GEI	130.225	104.095
Reducción total de emisiones de GEI (suma de ambas emisiones de generaciones de energía)	234.320 [kgCO <sub>2eq</sub> ]	

La reducción de emisiones o ahorro en emisiones de GEI se estima restando la situación convencional contra la situación con el sistema de cogeneración. Esto permite obtener un ahorro de emisiones de GEI en energía térmica de 130.225 [kgCO<sub>2eq</sub>] y en energía eléctrica de 104.095 [kgCO<sub>2eq</sub>].

Finalmente, se genera una reducción de emisiones total, considerando la suma de las reducciones en energía térmica y eléctrica, en la cogeneración de 234.320 kg de CO<sub>2</sub> equivalente en comparación a métodos convencionales de generación de energía.

<sup>4</sup> [https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/03/INFORME-FINAL\\_factores-de-emisio%CC%81n.pdf](https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/03/INFORME-FINAL_factores-de-emisio%CC%81n.pdf)

### **3. Conclusiones**

El presente estudio nace de la necesidad por parte de GIZ de mostrar el cálculo para estimar las emisiones de gases de efectos invernadero utilizando diferentes tecnologías en los sistemas de cogeneración en Chile. Para esto se revisaron proyectos de cogeneración en Europa, USA y de Chile implementados principalmente por GIZ y los presentados en el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Dentro de este análisis se evaluaron los factores de emisión considerados, metodologías de cálculo, tecnologías asociadas y estándares de medición de GEI.

Una de las principales conclusiones en este informe es el uso del método de atribución de contenido de energía, el método simple, transparente y de mayor uso por distintos proyectos a nivel mundial. Este método no sólo simplifica la obtención de datos para la realización del cálculo, sino se alinea con lo desarrollado por el Programa Huella Chile, del Ministerio de Medio Ambiente, el cual utiliza como herramienta de estimación la ISO 14.064, la cual se asemeja a las metodologías y herramientas aprobadas por las Naciones Unidas.

Cabe destacar que el Programa Huella Chile lleva trabajando desde el 2013 en la cuantificación y gestión de emisiones de GEI en las instituciones públicas y privadas del país, por lo que el poder presentarlo para ser utilizado dentro de la plataforma, podrá no sólo aportar a la diversificación de proyectos dentro de esta iniciativa gubernamental, sino también se podrían presentar bajo esta metodología proyectos de reducción que aporten a la acción climática del país.

#### 4. Bibliografía

Estay, T., & Ovalle, X. (2017). *Desarrollo de factores de emisión específicos para el programa HuellaChile*. Santiago: UNAB.

Holmberg, H. T. (2012). . Allocation of fuel costs and CO<sub>2</sub>-emissions to heat and power in an industrial CHP plant: Case integrated pulp and paper mill. . *Applied Energy* 93, 614–623.

International Energy Agency. (2021). *Database documentation Oil Information 2021 Edition*. IEA.

Programa Huella Chile. (2019). *Base de Datos de Factores de Emisión Huella Chile 2019*. Santiago: Ministerio de Medio Ambiente.

Rosen, M. (2008). Allocating carbon dioxide emissions from cogeneration systems: descriptions of selected output-based methods. *Journal of Cleaner Production*, 171-177.

## 5. Anexo 1 Datos de generación y consumos de instalación de ejemplo

Mes	Generación eléctrica [kWh] <sub>e</sub>	Eficiencia eléctrica	Generación térmica [kWh] <sub>t</sub>	Eficiencia Térmica	Total de energía generada [kWh]	Consumo de Combustible [kg]
jun-14	102.646	34%	201.170	66%	303.816	23.123
jul-14	76.882	34%	150.370	66%	227.252	17.296
ago-14	102.969	34%	202.120	66%	305.089	23.220
sep-14	110.352	35%	206.840	65%	317.192	24.141
oct-14	104.481	34%	202.880	66%	307.361	23.393
nov-14	110.984	36%	197.050	64%	308.034	23.444
dic-14	98.710	35%	181.900	65%	280.610	21.357
ene-15	95.118	34%	186.480	66%	281.598	21.432
feb-15	102.709	34%	197.250	66%	299.959	22.830
mar-15	97.810	34%	193.500	66%	291.310	22.171
abr-15	39.804	34%	78.390	66%	118.194	8.996
may-15	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
jun-15	37.676	34%	73.230	66%	110.906	8.441

n.d: no disponible

## 6. Anexo 2 Estimación de emisiones de GEI

**Tabla 5. Estimación de consumo de combustible considerando el PCI del GLP.**

Generación eléctrica anual [kWh] <sub>e</sub>	Generación térmica anual [kWh] <sub>t</sub>	Energía generada anual [kWh]	Consumo anual de Combustible [kg]
1.080.141	2.071.180	3.151.321	239.845

**Tabla 6. Estimación de las emisiones de GEI del sistema de cogeneración**

Consumo anual de Combustible [m <sup>3</sup> ]	Emisión de CO <sub>2</sub> [kg CO <sub>2eq</sub> ]	Emisión de CH <sub>4</sub> [kg CO <sub>2eq</sub> ]	Emisión de N <sub>2</sub> O [kg CO <sub>2eq</sub> ]	Total de emisiones de GEI [kg CO <sub>2eq</sub> ]
445	704.115	312	296	704.723

## 7. Anexo 3 Atribución de emisiones

A continuación, se estimarán los factores de atribución del sistema de cogeneración en la instalación de ejemplo considerando un motor de combustión con agua como flujo caloportador y un periodo de 12 meses analizado. En la Tabla 7 se pueden revisar los principales datos de generación de energía.

**Tabla 7. Resumen de total de energía generada y por tipo de energía en el sistema de cogeneración de la instalación de ejemplo.**

Generación eléctrica anual [kWhe]	Generación térmica anual [kWht]	Energía generada anual [kWh]
1.080.141	2.071.180	3.151.321

### 7.1. Atribución por contenido de energía

La atribución por contenido de energía se determina estimando los factores de atribución térmico (Ver Ecuación 2) y eléctrico (Ver Ecuación 3), como se puede revisar a continuación.

**Ecuación 2. Estimación de factor de atribución de energía térmica del método de contenido de energía**

$$f_Q = \frac{Q}{Q + E}$$

Donde,

- $f_Q$  : Factor de atribución de emisiones de CO<sub>2</sub> para la energía térmica
- $Q$  : Generación de energía térmica en unidades de energía térmica
- $E$  : Generación de energía eléctrica en unidades de energía eléctrica

Considerando la información entregada en la tabla 7, a continuación, se puede ver el detalle de cálculo

$$f_Q = \frac{2.071.180 [kWh]}{2.071.180 [kWh] + 1.080.141 [kWh]}$$

El resultado final es  $f_Q$ : 0,657.

**Ecuación 3. Estimación de factor de atribución de energía eléctrica del método de contenido de energía.**

$$F_e: 1 - f_Q$$

Considerando el resultado de la formula 3, desarrollada anteriormente, el resultado para el factor de atribución eléctrico se describe a continuación:

$$F_e: 1 - 0,657$$

El resultado final es  $f_e$ : 0.343.

## 7.2. Método de atribución por exergía

La atribución por 15xergía se determina estimando los factores de atribución eléctrico (Ver Ecuación 4) y térmico (Ver

Ecuación 5).

Ecuación 4. Estimación de factor de atribución de energía eléctrica del método de contenido de energía.

$$F_{ex,e}: 1 - f_{ex,Q}$$

Ecuación 5. Fórmula para determinar el factor de atribución de emisiones de GEI en la energía térmica.

$$f_{ex,Q} = \frac{ExQ}{ExQ + ExE}$$

Donde,

$F_{ex,Q}$  : Factor de atribución de emisiones de CO<sub>2</sub> por exergía para la energía térmica

$Ex_Q$  : Exergía térmica en unidades de energía térmica

$Ex_E$  : Exergía eléctrica en unidades de energía eléctrica

Donde,

Ecuación 6. Fórmula para determinar la 15xergía del flujo térmico de energía.

$$Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) x Q$$

$Ex_Q$  : Contenido de exergía de la energía térmica

$T_0$  : Temperatura ambiente promedio del periodo

$T$  : Temperatura termodinámica media del sistema

$Q$  : Contenido de energía térmica [kWh<sub>t</sub>]

Tabla 8. Supuesto de Temperatura Promedio ambiental de un año en la instalación de ejemplo.

Dato	Supuesto
$T_0$	15 °C

Ecuación 7. Fórmula para determinar la temperatura termodinámica media.

$$T = \frac{(T_s - T_r)}{\ln\left(\frac{T_s}{T_r}\right)}$$

Donde,

$T_s$  : Temperatura de salida del sistema

$T_r$  : Temperatura de retorno del sistema

T : Temperatura termodinámica media del sistema<sup>5</sup>

Tabla 9. Supuestos de temperaturas de salida y retorno del sistema de cogeneración de la instalación de ejemplo.

Dato	Supuesto
T <sub>r</sub>	65°C
T <sub>s</sub>	85°C

Desarrollando la ecuación 7 se llega al resultado de:

$$T = \frac{(85 [^{\circ}\text{C}] - 65 [^{\circ}\text{C}])}{\ln \left( \frac{85 [^{\circ}\text{C}]}{65 [^{\circ}\text{C}]} \right)}$$

$$T = 41,86 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Considerando el resultado del valor T y aplicando la Ecuación 6 se obtiene el siguiente valor de EX<sub>q</sub>.

$$Ex_Q = \left( 1 - \frac{15 [^{\circ}\text{C}]}{41,86 [^{\circ}\text{C}]} \right) \times 2.071.180 [kWh]$$

$$Ex_Q : 1.329.401 [kWh]$$

Desde un punto de vista termodinámico, el factor de exergía de la electricidad generada tiene un factor de 1 (Toda la energía es convertida en trabajo), por lo tanto, la exergía de la electricidad es igual a la cantidad de energía eléctrica generada.

$$Ex_e = \text{Energía Eléctrica} = 1.080.141 [kWh]$$

$$f_{ex,Q} = \frac{1.329.401 [kWh]}{1.329.181 [kWh] + 1.080.141 [kWh]}$$

Aplicando la Ecuación 6 se obtiene un valor de F<sub>ex,Q</sub> de 0,55.

$$F_{ex,e}: 1 - 0,55$$

Aplicando la Ecuación 4 se obtiene una valor de F<sub>ex,e</sub> de 0,45.

---

<sup>5</sup> Para otros casos de cogeneración, se debe considerar el periodo a analizar, que para el análisis de huella de carbono es un año calendario, y además determinar por convención las temperaturas de retorno y salida del sistema. Estas temperaturas son diferentes para los variados sistemas de cogeneración.



### 7.3. Total de emisiones atribuidas según método

Considerando que el total de emisiones de GEI generadas en el sistema de cogeneración de la instalación de ejemplo son 704.723 [kgCO<sub>2eq</sub>], en la Tabla 10 se pueden ver como son atribuidas las emisiones de GEI según cada método analizado.

**Tabla 10. Resumen de las emisiones atribuidas para cada energía según el método de atribución estudiado.**

Método de atribución	Emisiones de GEI térmicas [kgCO <sub>2eq</sub> ]	Emisiones de GEI eléctricas [kgCO <sub>2eq</sub> ]
Atribución por método de contenido de energía	463.174	241.550
Atribución por método de exergía	387.598	317.125
Atribución en generación Eléctrica	-	704.723
Atribución en generación Térmica	704.723	-
Atribución por método de los Tercios	232.559	465.117

El detalle de cálculo de cada atribución se indicará a continuación considerando los factores de atribución descritos en la Tabla 3 del presente informe.

#### 7.3.1. Atribución por método de contenido de energía

La fórmula para determinar la atribución térmica y eléctrica se puede revisar a continuación (Ver Ecuación 8).

**Ecuación 8. Formula de estimación de emisiones atribuidas para un sistema de cogeneración.**

$$EAt_e = f_a \times ET$$

Donde,

EAt<sub>e</sub> : Emisiones de GEI atribuidas para cada energía

f<sub>a</sub> : factor de atribución térmico u eléctrico del método

ET : Emisiones de GEI totales del sistema analizado

La aplicación para la ecuación 8 se describe a continuación (utilizando la información del ejemplo):

$$EAt_e = 0,657 \times 704.723 [kgCO_{2eq}]$$

El factor de atribución térmico es 0,657, resultando en las emisiones atribuidas para la energía térmica es 463.003 [kgCO<sub>2eq</sub>].

Para el caso de la energía eléctrica, el desarrollo sería el siguiente:

$$EAt_e = 0,343 \times 704.723 [kgCO_{2eq}]$$

El factor de atribución eléctrico es 0,343, resultando en las emisiones atribuidas para la energía eléctrica es 241.720 [kgCO<sub>2eq</sub>].

### 7.3.2. Atribución por método de exergía

Para la estimación de la atribución de emisiones de GEI por el método de exergía se utiliza la Ecuación 8 considerando los factores de atribución correspondientes (ver Tabla 3).

La aplicación para la ecuación 8 se describe a continuación para el método de exergía (utilizando la información del ejemplo):

$$EAt_e = 0,61 \times 704.723 \text{ [kgCO}_{2eq}\text{]}$$

El factor de atribución térmico es 0,61, resultando en las emisiones atribuidas para la energía térmica es 486.259 [kgCO<sub>2eq</sub>].

Para el caso de la energía eléctrica, el desarrollo sería el siguiente:

$$EAt_e = 0,39 \times 704.723 \text{ [kgCO}_{2eq}\text{]}$$

El factor de atribución eléctrico es 0,39, resultando en las emisiones atribuidas para la energía eléctrica es 274.842 [kgCO<sub>2eq</sub>].

### 7.3.3. Atribución en generación Eléctrica

Para la estimación de la atribución de emisiones de GEI por el método de atribución en generación eléctrica se utiliza la Ecuación 8 considerando los factores de atribución correspondientes (ver Tabla 3).

Hay que considerar que el factor de atribución eléctrico en este caso tiene un valor 1 y el térmico tiene valor 0.

La aplicación para la ecuación 8 se describe a continuación para el método de atribución de generación eléctrica (utilizando la información del ejemplo):

$$EAt_e = 1 \times 704.723 \text{ [kgCO}_{2eq}\text{]}$$

El factor de atribución eléctrico es 1, resultando en las emisiones atribuidas para la energía eléctrica es 704.723 [kgCO<sub>2eq</sub>].

$$EAt_e = 0 \times 704.723 \text{ [kgCO}_{2eq}\text{]}$$

El factor de atribución térmico es 0, resultando en las emisiones atribuidas para la energía térmica es 0 [kgCO<sub>2eq</sub>].

### 7.3.4. Atribución en generación Térmica

Para la estimación de la atribución de emisiones de GEI por el método de atribución en generación térmica se utiliza la Ecuación 8 considerando los factores de atribución correspondientes (ver Tabla 3).

Hay que considerar que el factor de atribución térmica en este caso tiene un valor 1 y el eléctrico tiene valor 0.

La aplicación para la ecuación 8 se describe a continuación para el método de atribución de generación térmica (utilizando la información del ejemplo):

$$EAt_e = 1 \times 704.723 \text{ [kgCO}_{2eq}\text{]}$$

El factor de atribución térmico es 1, resultando en las emisiones atribuidas para la energía térmica es 704.723 [kgCO<sub>2eq</sub>].

$$EAt_e = 0 \times 704.723 [kgCO_{2eq}]$$

El factor de atribución eléctrico es 0, resultando en las emisiones atribuidas para la energía eléctrica es 0 [kgCO<sub>2eq</sub>].

### 7.3.5. Atribución por método de los Tercios

Para la estimación de la atribución de emisiones de GEI por el método de los tercios se utiliza la Ecuación 8 considerando los factores de atribución correspondientes (ver Tabla 3).

Hay que considerar que el factor de atribución térmica en este caso tiene un valor 0,333 y el eléctrico tiene valor 0,666.

Estos valores vienen dados por la observación generalizada que la eficiencia de generación térmica (50% a 90%) es el doble de la eficiencia de la generación eléctrica (25% a 50%). Esto quiere decir que de tres unidades de combustible 2 son utilizadas para una unidad eléctrica y 1 unidad es utilizada para energía térmica.

La aplicación para la ecuación 8 se describe a continuación para el método de los tercios (utilizando la información del ejemplo):

$$EAt_e = 0,333 \times 704.723 [kgCO_{2eq}]$$

El factor de atribución térmico es 0,333, resultando en las emisiones atribuidas para la energía térmica es 234.672 [kgCO<sub>2eq</sub>].

Para el caso de la energía eléctrica, el desarrollo sería el siguiente:

$$EAt_e = 0,666 \times 704.723 [kgCO_{2eq}]$$

El factor de atribución eléctrico es 0,666, resultando en las emisiones atribuidas para la energía eléctrica es 469.346 [kgCO<sub>2eq</sub>].

## 8. Anexo 4 Estimación de emisiones de GEI de instalación ejemplo utilizando medios convencionales.

Considerando la energía generada por la instalación de ejemplo, en el presente anexo se han estimado las emisiones por generación en medios convencionales.

### 8.1. Energía eléctrica

El método convencional para esta energía es obtener el recurso de la red eléctrica nacional. La estimación de emisiones de GEI para esta fuente de emisiones se muestra en la siguiente ecuación.

**Ecuación 9. Formula de estimación de emisiones de GEI para consumo de electricidad de la red nacional.**

$$EEC = CE * FE_{RNE}$$

Donde,

EEC : Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de electricidad consumida desde la red nacional eléctrica

CE : Consumo de electricidad en unidades de energía

FE<sub>RNE</sub> : Factor de emisión de gases de efecto invernadero por unidad de energía eléctrica de red nacional eléctrica.

Para el presente caso el valor de CE sería de 1.080.141 [kWh]. El valor de FE<sub>RNE</sub> para el año 2019 fue de 0,32 [kgCO<sub>2eq</sub>/kWh]. La aplicación de la ecuación 9 se puede revisar a continuación:

$$EEC = 1.080.141 [kWh] * 0,32 \left[ \frac{kgCO_{2eq}}{kWh} \right]$$

Finalmente, el resultado final de EEC es 345.645 kgCO<sub>2eq</sub>.

### 8.2. Energía térmica

El método convencional para esta energía es considerar la generación de energía de una caldera convencional. La estimación de emisiones de GEI para esta fuente de emisiones se muestra en la siguiente ecuación.

**Ecuación 10. Formula de estimación de emisiones de GEI para generación convencional de energía térmica.**

$$EET = CC * FE_{CC}$$

Donde,

EET : Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de electricidad consumida desde la red nacional eléctrica

CC : Consumo de combustible en unidades de masa y volumen

$FE_{CC}$  : Factor de emisión de gases de efecto invernadero por unidad de masa o volumen para el combustible consumido.

Para estimar el valor CE se consideró una eficiencia de 80%<sup>6</sup> y un poder calorífico inferior de 12,819 [kWg/kg]. La estimación de consumo de combustible fue la siguiente:

**Ecuación 11. Fórmula para determinar el consumo de combustible del método convencional de generación de energía térmica.**

$$ETu = CC * PCI * Ef$$

Donde,

ETu : Energía térmica útil generada por la caldera.

CC : Consumo de combustible en unidades de masa y volumen

PCI : Poder calorífico inferior del combustible

Ef : Eficiencia de la caldera (80%)

Reordenando para determinar el consumo de combustible y aplicando los valores indicados el resultado de consumo de combustible es 201.956 kg de GLP. Considerando que la densidad para el LPG en estado líquido es 539 kg/m<sup>3</sup>, el consumo de combustible es de 374 m<sup>3</sup> de GLP.

$$CC = \frac{2.071.180 [kWh]}{12.819 \left[ \frac{kWh}{kg} \right] \times 80\%}$$

Finalmente, aplicando lo indicado en la Ecuación 111, para el presente caso el valor de CC sería de 374 [m<sup>3</sup>]. El valor de  $FE_{CC}$  para el GLP es de 1.583,72 [kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>3</sup>]. El detalle se puede revisar a continuación:

$$CC = \frac{201.956 [kg]}{539 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 374 [m^3]$$

La aplicación de la ecuación 10 se puede revisar a continuación:

$$EET = 374 [m^3] \times 1.583,72 \left[ \frac{kgCO_{2eq}}{m^3} \right]$$

Finalmente, el resultado final de EET es 593.399 kgCO<sub>2eq</sub>.

---

<sup>6</sup> La eficiencia de 80% es un ejemplo, esta puede ser determinada empíricamente con la información del sistema de cogeneración o ser determinada por la autoridad reguladora correspondiente.

## 9. Anexo 5 Unidades de conversión y datos utilizados

Datos	Valores	Fuente
Poder calorífico inferior GLP	12,819 [kWg/kg]	IEA 2020
Densidad GLP en fase líquida a 15°C y 1 atm	539 [kg/m <sup>3</sup> ]	IEA 2020
Factor de emisión de CO <sub>2</sub>	1.582,35 [kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ]	IPCC 2006
Factor de emisión de CH <sub>4</sub>	0,7022 [kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ]	IPCC 2006
Factor de emisión de N <sub>2</sub> O	0,6645 [kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> ]	IPCC 2006