

[ANEXO 6]

MEDIDA Y CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) [23]

A6.1 Medida de emisiones

En la Tabla 26 adjunta se presentan los gases de efecto de invernadero que deben considerarse de acuerdo con el Anexo A del Protocolo de Kioto. Los tres primeros GEI de esta tabla ocurren en la naturaleza. El dióxido de carbono es con diferencia el más abundante, produciéndose en la combustión de combustibles fósiles, en algunos procesos industriales y en la deforestación. El metano se genera principalmente en la descomposición de la materia orgánica, en la operación de vertederos, y en otros procesos industriales, y se libera en la minería del carbón y en las perforaciones petrolíferas y gasistas. El óxido nitroso se emite en la fabricación de fertilizantes. El sector de transporte es un contribuyente importante a la emisión de este GEI.

Los tres segundos GEI de la citada tabla 26 son gases industriales fluorados. Los hidrofluorocarbonos (HFC) se utilizan en refrigeración y aire acondicionado; se han considerado de esta familia los cuatro gases más representativos. Los perfluorocarbonos (PFC) se emplean en sustitución de los hidrofluorocarbonos, habiéndose presentado los dos más utilizados.

El último GEI considerado, es el hexafluoruro de azufre utilizado como fluido dieléctrico, siendo el GEI antropógeno de mayor PCA.

La medida de las emisiones y absorciones se realiza en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e), definidas como el producto de la masa física del GEI_i expresada en toneladas métricas (tGEI_i), siendo i la identificación del GEI, según el ordinal de las filas de la tabla 26, por un índice denominado Potencial de Calentamiento Atmosférico del gas (PCA_i), también indicado en dicha tabla. Es decir,

$$tCO_2e = tGEI_i \cdot PCA_i \quad (62)$$

El PCA se define como la relación entre la capacidad de un gas de efecto invernadero de almacenar calor en la atmósfera con la capacidad de dióxido de Carbono (CO₂). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha definido los valores de establecimiento de los PCA y su puesta al día.

Tabla 26 Gases de Efecto Invernadero y sus Potenciales de Calentamiento Atmosférico.

GAS DE EFECTO INVERNADERO (GEI _i)		Símbolo químico	Masa molecular	Potencial de Calentamiento Atmosférico (PCA _i)
Dióxido de carbono	1	CO ₂	44	1
Metano	2	CH ₄	16	21
Oxido nitroso	3	N ₂ O	30	310
Hidrofluorocarbonos (HFC)	4	HFC 23 (CHF ₃)	70	11700
	5	HFC 125 (CHF ₂ CF ₃)	120	2800
	6	HFC 134a (CH ₂ FCF ₃)	102	1300
	7	HFC 152a (CH ₃ CHF ₂)	66	140
Perfluorocarbonos (PFC)	8	CF ₄	88	6500
	9	C ₂ F ₆	138	9200
Hexafluoruro azufre	10	SF ₆	146	23900

Como ejemplo de aplicación de la expresión A6.1, la emisión de 5 tGEI₂, resultan 105 toneladas métricas de CO₂ equivalentes (tCO₂e), ya que el subíndice i es igual a 2; por tanto se trata de gas metano cuyo Potencial de Calentamiento Atmosférico es 21.

Si en el proceso se emiten n GEI, la ecuación anterior se amplía de la forma siguiente,

$$tCO_2e = \sum_i^n tGEI_i PCA_i \quad (63)$$

A6.2 Cálculo de las emisiones

El cálculo de emisiones anuales antropógenas de GEI se basa en el nivel anual de actividad del proyecto Q, multiplicados por los Factores de Emisión de dióxido de carbono equivalente (FE) correspondientes a los escenarios de la base de referencia (EB), del proyecto (EP) y de las fugas (EE) o posibles emisiones externas, es decir producidas fuera del ámbito del proyecto, pero atribuibles al mismo. La reducción de emisiones (RE) atribuible al proyecto MDL es la diferencia entre las emisiones debidas a la base de referencia y las producidas en el proyecto y en las fugas.

El párrafo anterior queda resumido en la siguiente ecuación:

$$RE = EB - (EP + EE) = EB - EP - EE \quad (64)$$

Las Emisiones incluidas en la ecuación anterior y por lo tanto la Reducción de Emisiones (RE) deben expresarse en tCO₂e/a.

El Factor de Emisión (FE) en cada escenario, indica la emisión de dióxido de carbono equivalente por TJ de combustible consumido, por MWh de electricidad generada o por unidad de actividad de proyecto (Q), pudiendo expresarse por ejemplo, en tCO₂e / TJ.

Se denomina Q a la actividad de Proyecto y G al consumo de combustible. En el supuesto de una central eléctrica Q se mide en MWh.

El Factor de Emisión (FE_{j,i}) del Gas de Efecto Invernadero i (GEI_i) producido por la fuente j, indica las emisión de este gas por unidad de energía liberada (TJ), por unidad de energía eléctrica generada (MWh), o por unidad de actividad de proyecto, pudiendo expresarse por ejemplo como tGEI_i/TJ, donde tGEI_i representa toneladas métricas del gas GEI_i.

$$RE = EB - (EP + EE) = EB - EP \quad (65)$$

La Tabla 27 incluye los Factores de Emisión por defecto, de dióxido de carbono, para los principales combustibles, recomendados por el Panel Internacional sobre el Cambio Climático (IPCC, 1996, Vol. 3º) a emplear en los cálculos de emisiones de GEI en el primer periodo de compromiso, 2008/2012.

Tabla 27 Valores de los Factores de Emisión de dióxido de carbono más representativos:

Combustibles	F.E. [tCO ₂ /TJ]	Combustibles	F.E. [tCO ₂ /TJ]
Sólidos		Líquidos	
Antracita	98.3	Fuel residual	77.4
Carbón de coque	94.6	GLP	63.1
Hulla	94.6	Etano	61.6
Carbones sub-bituminosos	96.1	Nafta	73.3
Lignito	101.2	Asfaltos	80.7
Turba	106.0	Lubricantes	80.7
		Coque de petróleo	100.8
Gaseosos		Materia prima de refinería	73.3
Gas natural	56.1	Crudo	73.3
Metano	55.1	Orimulsión	80.7
Gas de refinería	66.7	GNL	63.1
Gas de horno de coque	108 / 47	Gasolinas	69.3
Gas de horno alto	24.2	Queroseno (aviación)	71.5
		Otros querosenos	71.9
		Gasóleo	74.1

El equivalente energético en TJ - G(TJ/a)- del consumo anual de combustible G, expresado en unidades de masa -G(kt/a)- se obtiene multiplicando el

consumo másico por el poder calorífico inferior del combustible (PCI en TJ/ kt), donde kt indica miles de toneladas métricas.

$$G(\text{TJ/a}) = G(\text{kt/a}) \text{ PCI}(\text{TJ/kt}) \quad (66)$$

Si el consumo anual de combustible se expresa en unidades de volumen G (l/a), siendo l, litros y ρ la densidad del combustible medida en miles de toneladas (kt) por litros:

$$G(\text{kt/a}) = G(\text{l/a}) \rho(\text{kt/l}) \quad (67)$$

El poder calorífico de los combustibles primarios dependen de su origen y se indican en la tabla 1-2 (IPCC, 1996, Volumen 3º). Sin embargo los combustibles secundarios (refinados), no presentan grandes variaciones, incluyendo la tabla 28 los valores por defecto recomendados por el IPCC.

Tabla 28 Valores del poder calorífico de combustibles refinados

Poder calorífico inferior de combustibles refinados [TJ/kt]			
Refinados del petróleo		Asfalto	40,19
Gasolinas	44,80	Lubricantes	40,19
Queroseno (aviación)	44,59	Coque de petróleo	31,00
Otros querosenos	44,75	Materia prima de refinería	44,80
Pizarra bituminosa	36,00	Gas de refinería	48,15
Gasóleo/diesel	43,33	Otros productos del petróleo	40,19
Fuel	40,19	Otros productos	
GLP	47,31	Alquitranes	28,00
Etano	47,49	Esquisto bituminoso	9,40
Nafta	45,01	Orimulsión	27,50

La emisión anual E de cada escenario puede calcularse por la siguiente fórmula, suponiendo que el Proyecto da lugar a n sub-actividades,

$$E = \sum_j^n Q_j \text{ FE} \quad (68)$$

Siendo FE_j el Factor de Emisión correspondiente a la sub-actividad j de proyecto Q , que puede calcularse mediante la expresión,

$$FE_j = \sum_{i=1}^{n_j} FE_{j,i} PCA_i \quad (69)$$

Donde n_j es el número de GEI producidos por la sub-actividad j Q , e i el subíndice identificador del GEI según la tabla 26,

El Factor de Emisión de dióxido de carbono debe tener en cuenta que cuando el combustible se quema, parte de su carbono no se oxida para formar CO_2 , debido a ineficiencias en el proceso de combustión. La tabla 28 incluye las fracciones de carbono oxidado recomendadas por el IPCC para su utilización por defecto en función del tipo de combustible.

De acuerdo con el párrafo anterior los Factores de Emisión de CO_2 incluidos en la Tabla 27, deben ser multiplicados por la fracción de oxidación de la siguiente, para tener el FE efectivo de CO_2 .

Tabla 29. Fracción de oxidación

Fracción de carbono oxidado	
Carbón	0,98
Productos petrolíferos	0,99
Gas	0,995
Turba para generación eléctrica	0,99

A continuación se considera la aplicación de las ecuaciones 68 y 69 a dos procesos particulares.

Proceso con una sola fuente de GEI o sea, $n = 1$ y por tanto $j = 1$, $n_j = n1$

$$E = Q \sum_{i=1}^{n1} FE_i PCA_i \quad (70)$$

Lo que permite en este supuesto, definir el Factor de Emisión del proceso FE,

$$FE = \sum_i^{n1} FE_{PCA} \quad (71)$$

$$E = Q FE \quad (72)$$

A6.3 Generación de electricidad con fuentes renovables para una red de distribución

Base de referencia. Para un sistema donde todo el combustible fósil que se utiliza para la generación es fuel o diesel, son los kWh anuales generados por las fuentes renovables, multiplicado por el Factor de emisión de un generador diesel moderno, en función de su nivel óptimo de carga (ver Tabla 30). Para el resto de sistemas, la línea base son los kWh generados por fuente renovable, multiplicados por un Factor de emisión calculado como: a) la media ponderada entre el margen de operación aproximado y el margen de construcción, b) el valor medio ponderado de las emisiones del mix de generación (en kgCO₂eq/kWh).

En resumen, puede verse que para la mayoría de este tipo de proyectos se utilizan los Factores de emisión correspondientes a un equipo diesel moderno que se presentan en la citada tabla 5.6 que se adjunta a continuación.

Tabla 30 Factores de emisión para un generador diesel moderno (en kgCO₂e/kWh*), con tres niveles de factor de carga**[23]

Casos:	Mini red con 24 h de servicio	i) Mini red con servicio temporal (4-6 h/día) ii) Aplicaciones de producción iii) Bombas de agua	Mini red con almacenamiento
Factores de carga (%)	25(%)	50(%)	100(%)
<15kW	2,4	1,4	1,2
>=15<35kW	1,9	1,3	1,1
>=35>135kW	1,3	1,0	1,0
>135>200kW	0,9	0,8	0,8
>200kW***	0,8	0,8	0,8

* Se ha utilizado un factor de emisión de 3,2kgCO₂ por kg de diesel

** Las cifras proceden del manual online <http://retscreen.net/>

*** Valores por defecto

A6.4 Proyecto Hidroeléctrico de pequeña escala “La Planta”. Choroni Edo. Aragua

A6.4.1 Descripción general

Generación de energía a partir de fuentes renovables con potencia <15 MW. No forma parte de un proyecto de gran escala. Consiste en la recuperación de una central hidroeléctrica de 2,1 MVA que utiliza el agua del Río Grande del Medio de Choroni en el municipio Girardot (Aragua). La energía generada será introducida a la red de distribución de la Empresa CADAFE.

El proyecto reduciría emisiones de GEI por sustitución de fuentes de generación eléctrica que utilizan combustibles fósiles (diesel). Contribuye al desarrollo sostenible promoviendo el uso de energías renovables. La tecnología utilizada será de importación y servirá de modelo para proyectos similares en pequeña escala.

Fundamento cálculo: La base de referencia se calcula considerando un sistema donde el combustible fósil que se quema para la generación térmica es un diesel. La base de referencia son los kWh anuales generados por el proyecto en un periodo multiplicado por el factor de emisión correspondiente a una unidad de generación diesel moderna en función de su nivel óptimo de carga (en este caso el factor de emisión para un sistema diesel en nivel de carga >200kW es 0,8 kgCO₂e/kWh).

Factor de emisión (FE) de una unidad diesel (>200 kW)	0,8 tCO ₂ e/MWh
Energía generada por el proyecto al año (Q)	6300 MWh-año
Emissiones de la base (EB= QxFE)	5040 tCO ₂ eq-año

Para el caso en que la base de referencia representa sistemas híbridos como es el caso del sistema eléctrico de la zona central constituido por importaciones de energía hidroeléctrica desde el sur-este del país a través de EDELCA y la generación de energía de origen termoeléctrica, cuyo combustible es gas natural y fuel-oil N° 6. Planta Centro tiene una estación de medición y regulación con capacidad máxima de suministro de $2,79 \times 10^9$ m³/año de gas natural suficiente para la generación a plena carga de 2 unidades de 400MW durante un año

Con los datos anteriores asumiendo una densidad del gas natural en condiciones estándar de 742×10^{-9} kt/m³ y las ecuaciones 67 y 66 se obtiene el consumo de combustible en su equivalente en tera joules (TJ) $G=99750,62$ TJ/año con ayuda de las tablas 28, la tabla 29 y la ecuación A6.11 se obtiene un factor de emisión en margen de operación de

$$FE_{mo} = \frac{G[TJ - año] \times FE}{Q}$$

Donde Q es la energía eléctrica generada $Q = 2 \times 400MW \times 8760h$
 $Q = 7,01MWh - año$

$$FE_{mo} = \frac{99750,62[TJ - año] \times 56,1[tCO_2 / TJ]}{7,01 \times 10^6 [MWh - año]}$$

$$FE_{mo} = 0,798[tCO_2 / MWh]$$

Como el sistema eléctrico tiene aproximadamente 73% de participación hidroeléctrica entonces se tiene que el $FE=FE_{mo} \cdot (1-0,73)$

$$FE=0,216\text{tCO}_2/\text{MWh}$$

$$RE=6300[\text{MWh}]*0,216[\text{tCO}_2/\text{MWh}]$$

$$RE=1361[\text{tCO}_2\text{eq-año}]$$

De esta forma la reducción de emisiones para éste caso base es:

Factor de emisión (FE) del sistema eléctrico	0,216 tCO ₂ e/MWh
Energía generada por el proyecto al año (Q)	6300 MWh-año
Reducción Emisiones de la base (EB= QxFE)	1361 tCO ₂ eq/año