

Anexo I. Descripción de los equipos térmicos

I1.MGWH: Motor de gas (produce agua caliente)



Producción de electricidad: 0,580 MW
 Consumo de combustible: 1,422 MW
 Flujo másico de escape: 3 239 kg/h
 Temperatura de los gases de escape: 467°C
 Calor recuperado de los gases de escape:
 0,348 MW
 Calor recuperado de las camisas: 0,208 MW
 Calor recuperado del intercooler: 0,118 MW
 (no aprovechable)

Principales materiales de su composición:

2000 Kg de acero al carbono
 3500 kg acero para maquinaria
 200 Kg acero para componentes
 Aceite

I2.CGWH: Caldera de gas (produce agua caliente)



Thermital THE-Q modelo 575

Potencia térmica útil: 0,532 MW

Principales materiales de su composición:

850 Kg de acero para maquinaria
 25 Kg de aluminio para componentes

13.ICWC: Intercambiador agua-agua



SEDICAL UFX-12/35

Potencia térmica útil: 0,400 MW

Principales materiales de su composición
760kg acero inoxidable

14.FAWH: Enfriadora de absorción (S.E.)



THERMAX Prochill modelo 14S

Potencia frigorífica útil: 0,493 MW

COP: 0,60

Principales materiales de su composición
9000 Kg de acero para maquinaria

15.FMWR: Enfriadora mecánica



HydroCiat LW – LWP modelo 2150BX
de Ciat

Potencia frigorífica útil: 0,492 MW
COP: 4,47

Principales materiales de su composición

2000 Kg acero para maquinaria

500 Kg de cobre

1000Kg PVC

20 Kg de aluminio

ACEITE y R134a

16.ICWR: Torre de refrigeración (Marley NC8302)



MARLEY NC8302F1

Potencia frigorífica útil: 1,000 MW

Flujo de agua: 143800 kg/h

Principales materiales de su composición

3500kg acero inoxidable

1605kg PVC

17.PROCESOS PARA ACEITE LUBRICANTE Y R134a

a) Aceite lubricante

Se considerará el aceite recomendado por los fabricantes, el Bitzer BSE 170, de densidad 0.97 g/cm³.

Para el motor (MGWH), la carga es de 100 dm³ con un consumo adicional de 0.2g/kWh.

100dm³ = 105 cm³ → la carga es de 97kg

Considerando la operación, hay que recargar 997kg de aceite al año = 9970 kg en 10 años.

Siempre estamos considerando el peor escenario de disposición final posible, entonces consideramos que 1kg de aceite es tirado al suelo.

The screenshot shows the SimaPro software interface for editing a material process named 'Aceite lubricante FMWR'. The interface is divided into several sections: 'Productos', 'Entradas', and 'Salidas'. In the 'Entradas' section, there is an entry for 'Lubricating oil, at plant/RER S' with a quantity of 1 kg. A callout box points to this entry with the text 'Material>>Chemical>>Oth'. In the 'Salidas' section, there is an entry for 'Oils, unspecified' with a quantity of 1 kg. A callout box points to this entry with the text 'Consideramos que el aceite es tirado al suelo en el escenario final de'. The bottom of the screen shows the Windows taskbar with the SimaPro 7 application running.

TOTAL CONSIDERADO MGWH: 97 + 9970 = 10067kg de aceite

Para la enfriadora mecánica (FMWR), la carga es de 37 litros = 36kg

Consideramos una carga al año, por 10 años: 360kg

TOTAL CONSIDERADO FMWR: 36 + 360 = 396kg

b) Refrigerante 134a

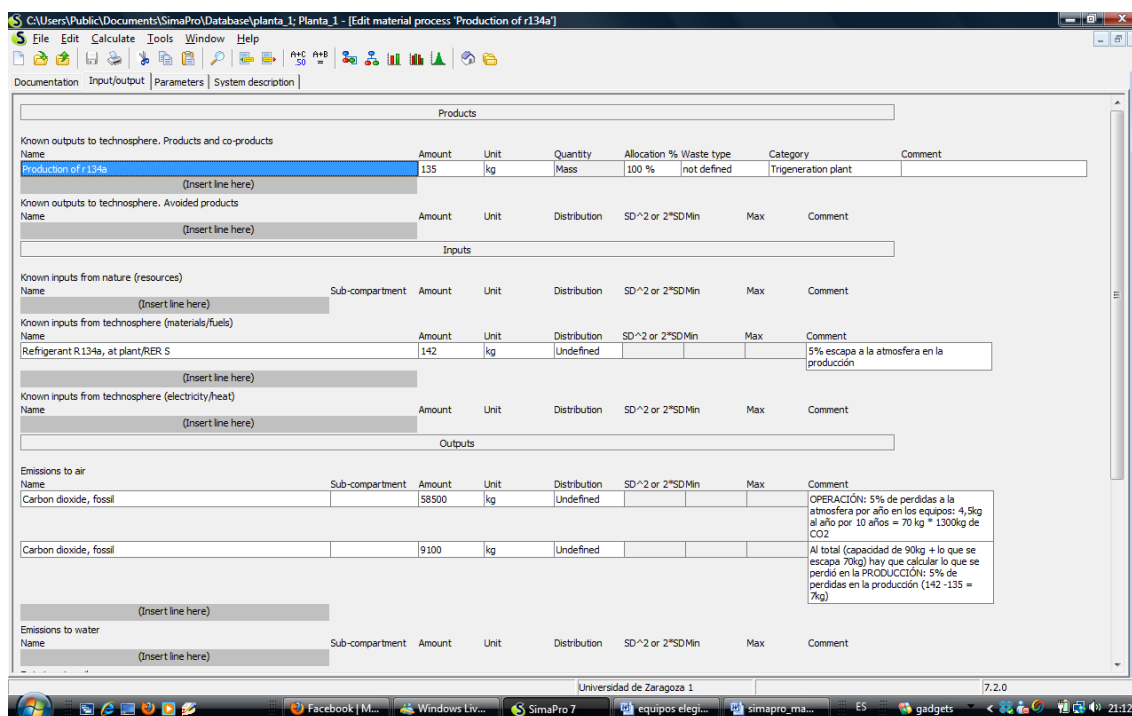
La carga de refrigerante en la enfriadora es de 90kg.

La enfriadora sólo es utilizada en junio, julio, agosto y septiembre.

Se considera que hay que recargar el 5% a cada año, por 10 años = 45kg

Y en la producción del refrigerante, el 5% se escapa a la atmosfera = $1.05 * 135\text{kg} = 142\text{kg}$

Cada kg de refrigerante equivale a 1300kg de CO₂



Consideraciones sobre los materiales:

Carbon steel es siempre HT I (acero al carbono)

Steel for machinery es siempre 9S20 I (acero para maquinaria).

Stainless steel es siempre X10CrNiMoNb I.

El acero utilizado en tuercas, tornillos, es siempre X12Cr13 (416) I (acero inoxidable martensítico).

El aluminio utilizado es siempre AlCuMg2(2024) I.

AlCuMg1(2017) es utilizado para tornillos, tuercas, etc.

Montajes / Assembly

Los materiales que constituyen el equipo tienen que ser trabajados, por lo tanto hay que añadir procesos de manufactura para cada uno.

También se considera el transporte según la norma EURO V, por 300km. La unidad es la tonelada * kilometro, así que hay que calcular el peso del equipo (en tonelada) multiplicado por 300km.

Anexo II. Ejemplo de cálculo para el CML2 baseline 2000, para la categoría de impacto *Cambio Climático*.

Para realizar este cálculo seguimos los siguientes pasos:

1. Evaluación del inventario de todas las emisiones relevantes al calentamiento global (emisiones al aire) m_i en todos los procesos que forman el ciclo de vida del equipo o utilidad.
2. Cálculo de las contribuciones parciales causadas por cada ítem del inventario. Esto se hace multiplicando cada ítem del inventario m_i por su factor de conversión GWP_i .
3. El factor de calentamiento global es el sumatorio de todas las contribuciones parciales.

Por tanto, el valor total para la categoría de impacto *Cambio Climático*, será la suma de los efectos causados por cada sustancia, según indica la siguiente fórmula:

$$\text{Calentamiento Global} = \sum_i GWP_i * m_i$$

Siendo GWP_i el potencial global de calentamiento de la sustancia i , m_i la cantidad de sustancia i emitida.

GAS NATURAL

El consumo de gas natural se ha obtenido a través de la combinación de dos procesos: emisiones relativas a la combustión del gas natural y el inventario de sistema agregado total para un consumidor de gas natural en España, que incluye exploración, producción, transportes, distribución y suministro regional.

a) Combustión del gas natural

El inventario de ciclo de vida (emisiones al aire) para la combustión del gas natural se muestra en la Tabla II.1.

Tabla II.1 Inventario para la combustión del gas natural (1 kWh).

Sustancia (emisión al aire)	Unidad	Cantidad
Díóxidos de nitrógeno NO ₂	mg	653,58
Oxídeos de azufre SO ₂	mg	8,5263
Monóxido de carbono CO	mg	4,7368
Díóxido de carbono	g	240,54

La consulta de los factores de caracterización GWP_i evalúa la contribución de cada sustancia relevante del inventario a la categoría de impacto de calentamiento global (Tabla II.3)

Los valores de la Tabla II.3 se han obtenido a través de la multiplicación de cada sustancia m_i del inventario (compartimiento de emisiones al aire, Tabla II.1) por su factor de caracterización GWP_i (Tabla II.2). Algunas sustancias presentes en el inventario pueden no tener factor de conversión, por lo que su contribución es nula en este caso.

Tabla II.2 Factores de conversión GWP_i aplicables al inventario específico de combustión del gas natural.

Sustancia	Factor de conversión (tCO ₂ eq/t)
Monóxido de carbono CO	1,57
Dióxido de carbono CO ₂	1

La Tabla II.3 muestra el valor final de la contribución al calentamiento global de la combustión del gas natural.

Tabla II.3 Contribución final de la combustión de gas natural al calentamiento global.

Sustancia	Contribución
Monóxido de carbono CO	$7,4368 \cdot 10^{-6}$
Dióxido de carbono CO ₂	0,24054
Total	≈ 0,24054 kgCO₂ eq / kWh consumido

b) Inventario de sistema agregado total

Para completar los cálculos del consumo de 1 kWh de gas natural, el siguiente paso es repetir el procedimiento para el inventario de sistema agregado total para un consumidor de gas natural en España, que incluye exploración, producción, transportes, distribución y suministro regional.

El inventario de ciclo de vida (emisiones al aire) para el inventario agregado del gas natural se muestra en la Tabla II.4

Tabla II.4 Inventario para la combustión del gas natural (1 kWh).

Sustancia (emisión al aire)	Unidad	Cantidad
Methane, bromo-, Halon 1001	pg	7,51E-06
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	pg	0,030152
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	pg	0,048949
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	pg	2,002361
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	pg	3,541464
Methane, trifluoro-, HFC-23	pg	9,59364
Methane, monochloro-, R-40	pg	54,553
Methane, dichloro-, HCC-30	pg	60,7806
Chloroform	pg	304,2864

Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	pg	507,744
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	pg	577,6369
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	ng	8,68212
Methane, tetrachloro-, CFC-10	ng	12,94272
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	ng	14,29344
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	ng	21,49154
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	ng	112,4768
Sulfur hexafluoride	ng	166,1109
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	ng	191,1429
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	µg	5,27832
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	µg	16,33883
Methane, biogenic	µg	134,548
Dinitrogen monoxide	µg	343,6639
Carbon dioxide, land transformation	µg	509,436
Carbon monoxide, fossil	mg	51,10992
Methane, fossil	mg	227,706
Carbon dioxide, fossil	g	30,21872

La consulta de los factores de caracterización GWP_i evalúa la contribución de cada sustancia relevante del inventario a la categoría de impacto de calentamiento global (Tabla II.6)

Los valores de la Tabla AII.6 se han obtenido a través de la multiplicación de cada sustancia m_i del inventario (compartimiento de emisiones al aire, Tabla II.4) por su factor de caracterización GWP_i (Tabla II.5). Algunas sustancias presentes en el inventario pueden no tener factor de conversión, por lo que su contribución es nula en este caso.

Tabla II.5 Factores de conversión GWP_i aplicables al inventario específico de combustión del gas natural.

Sustancia	Factor de conversión (tCO₂ eq / t)
Methane, bromo-, Halon 1001	5
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	210
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	4600
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	140
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	6000
Methane, trifluoro-, HFC-23	12000
Methane, monochloro-, R-40	16
Methane, dichloro-, HCC-30	10
Chloroform	30
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	120
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	10600
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	9800
Methane, tetrachloro-, CFC-10	1800
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	6900
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	11900
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1300
Sulfur hexafluoride	22200

Methane, tetrafluoro-, CFC-14	5700
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	1300
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	1700
Methane, biogenic	20
Dinitrogen monoxide	296
Carbon dioxide, land transformation	1
Carbon monoxide, fossil	1,57
Methane, fossil	23
Carbon dioxide, fossil	1

La Tabla II.6 muestra el valor final de la contribución al calentamiento global de la combustión del gas natural.

Tabla II.6 Contribución final de la combustión de gas natural al calentamiento global.

Sustancia	Contribución
Carbon dioxide	0,030219
Methane, fossil	0,005237
Dinitrogen monoxide	0,000102
Carbon monoxide	8,02E-05
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	2,78E-05
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	6,86E-06
Sulfur hexafluoride	3,69E-06
Methane, biogenic	2,69E-06
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	1,09E-06
Carbon dioxide, land transformation	5,09E-07
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	2,56E-07
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1,46E-07
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	9,86E-08
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	8,51E-08
Methane, tetrachloro-, CFC-10	2,33E-08
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	6,12E-09
Methane, trifluoro-, HFC-23	1,15E-10
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	6,09E-11
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	2,12E-11
Chloroform	9,13E-12
Methane, monochloro-, R-40	8,73E-13
Methane, dichloro-, HCC-30	6,08E-13
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	2,8E-13
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	2,25E-13
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	6,33E-15
Methane, bromo-, Halon 1001	3,75E-20
Total	0,03568 kgCO ₂ eq / kWh consumido

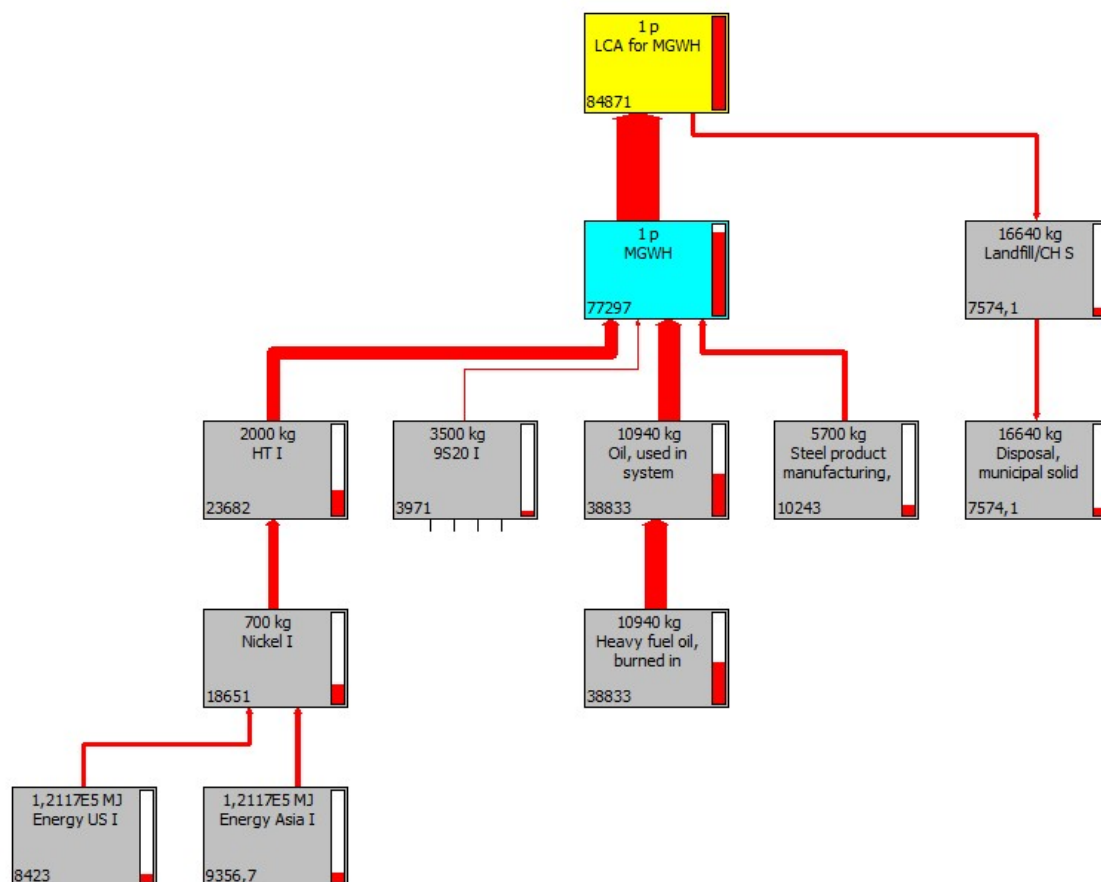
La suma de las dos contribuciones resulta en el poder de calentamiento global de 1 kWh de gas natural consumido en España:

$$0,24054 + 0,03568 = \mathbf{0,27622} \text{ kgCO}_2 \text{ eq / kWh consumido}$$

Anexo III. Diagramas de árbol para los distintos componentes del sistema, obtenidos mediante el Sima Pro 7.3

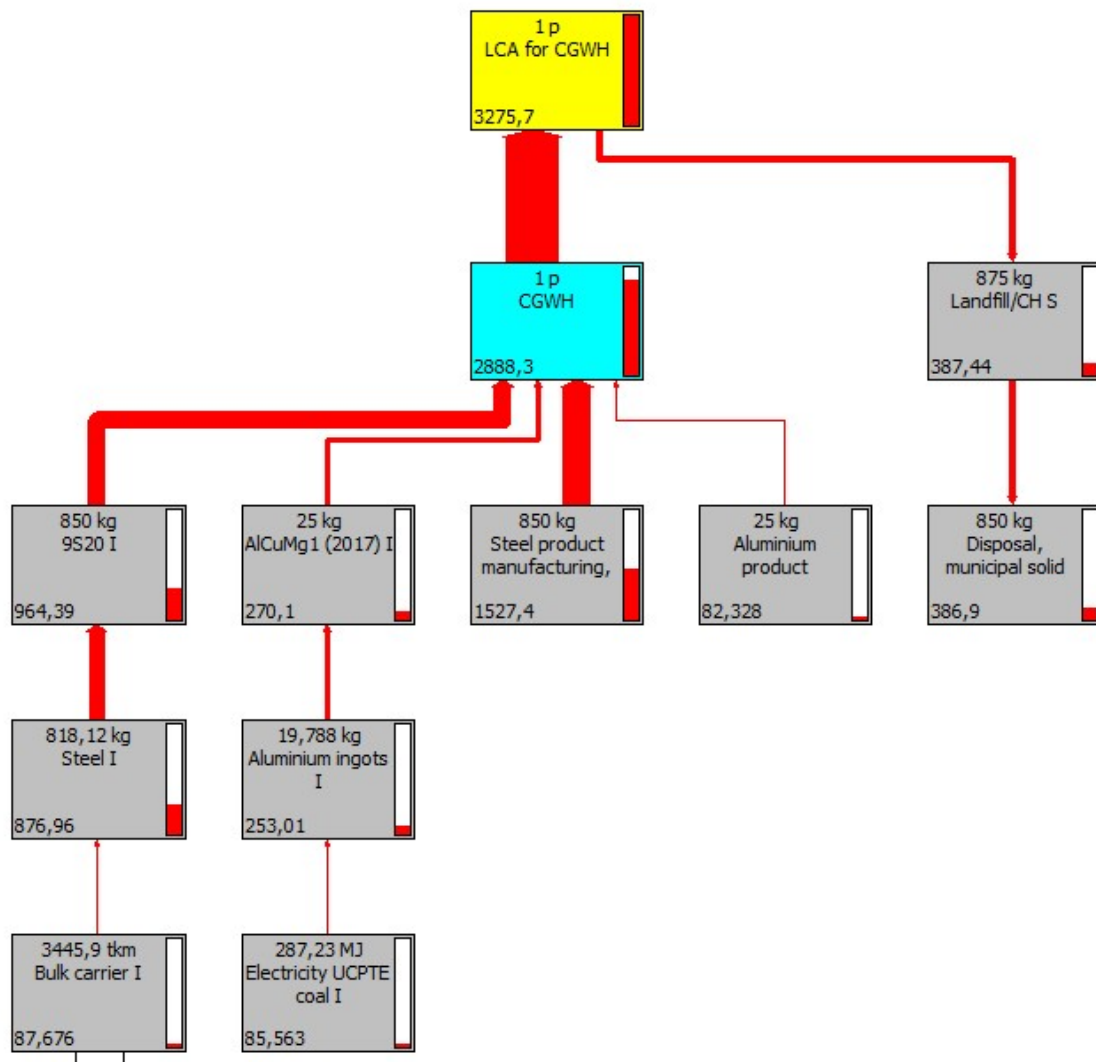
III.1. MOTOR DE GAS (MGWH)

El diagrama de árbol, que se obtiene del Sima Pro 7.3, para el ACV (LCA), se observan los flujos de emisiones de los distintos materiales que componen el motor de gas MGWH. En este caso se observa que además del flujo de los componentes como el acero HTI hay un flujo importante debido al aceite que usa el motor para lubricarse.



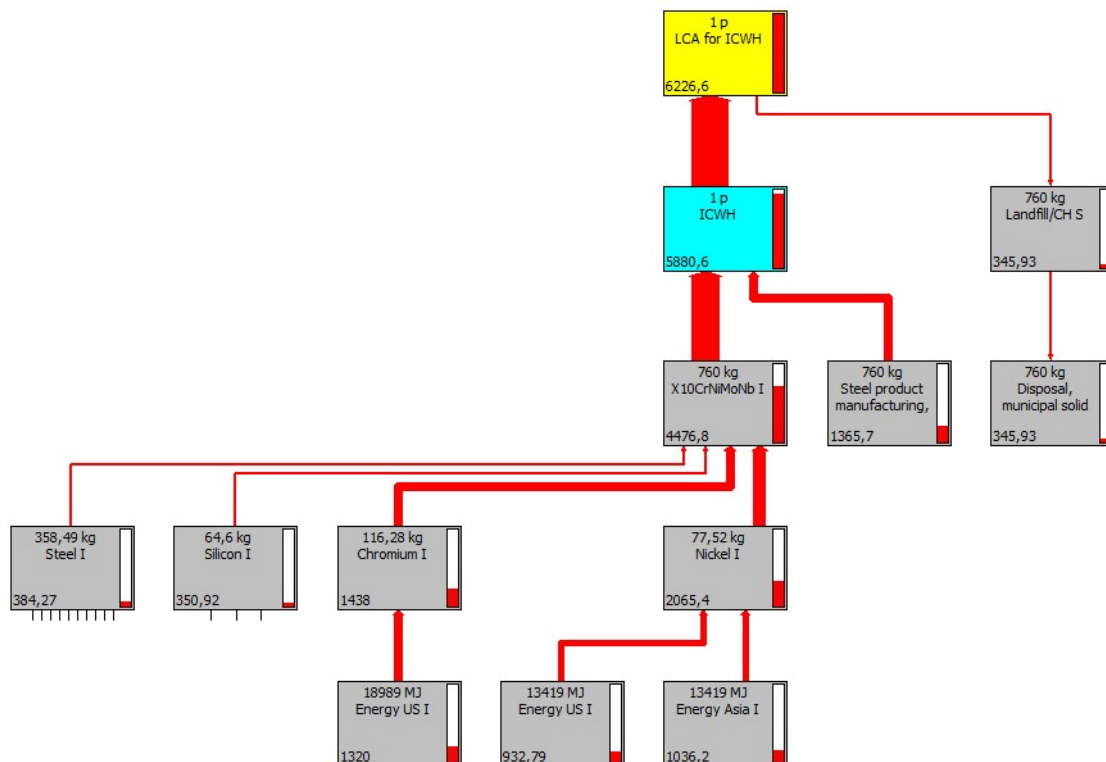
III.2. CALDERA DE AGUA CALIENTE (CGWR)

Como se muestra en el diagrama de árbol que se obtiene del SimaPro 7.3, para el ACV (LCA), se observan los flujos de emisiones de los distintos materiales que componen la caldera de agua caliente CGWR. Los flujos más importantes son los de la manufactura del acero y el tipo de acero 9S20I.



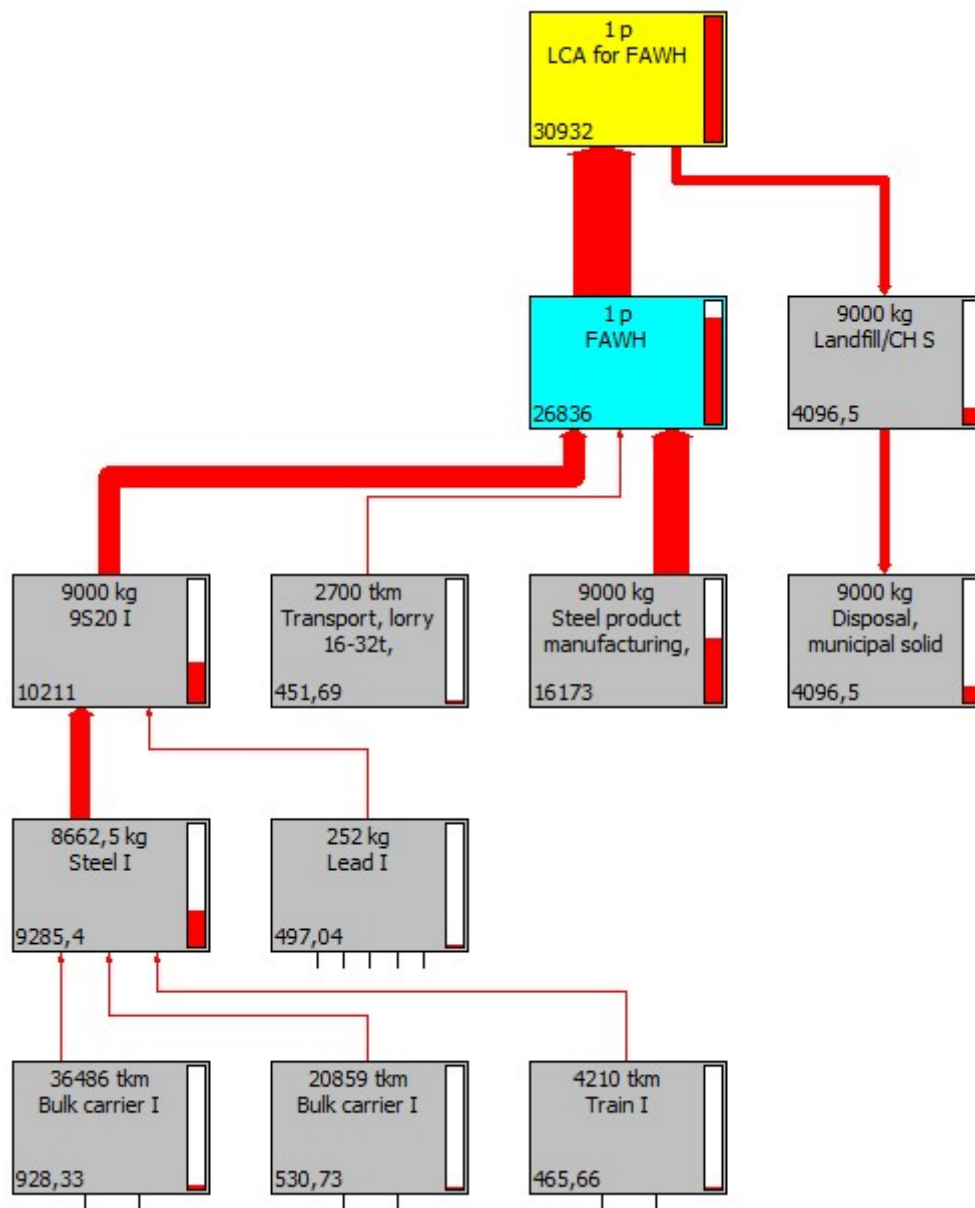
III.3. INTERCAMBIADOR DE CALOR (ICWH)

El diagrama de árbol, que se obtiene del Sima Pro 7.3, para el ACV (LCA), se observan los flujos de emisiones de los distintos materiales que componen el intercambiador de calor ICWH. Como se puede observar los flujos de los componentes como el Cr y Ni en la composición del acero y la manufactura de productos de acero son los más importantes



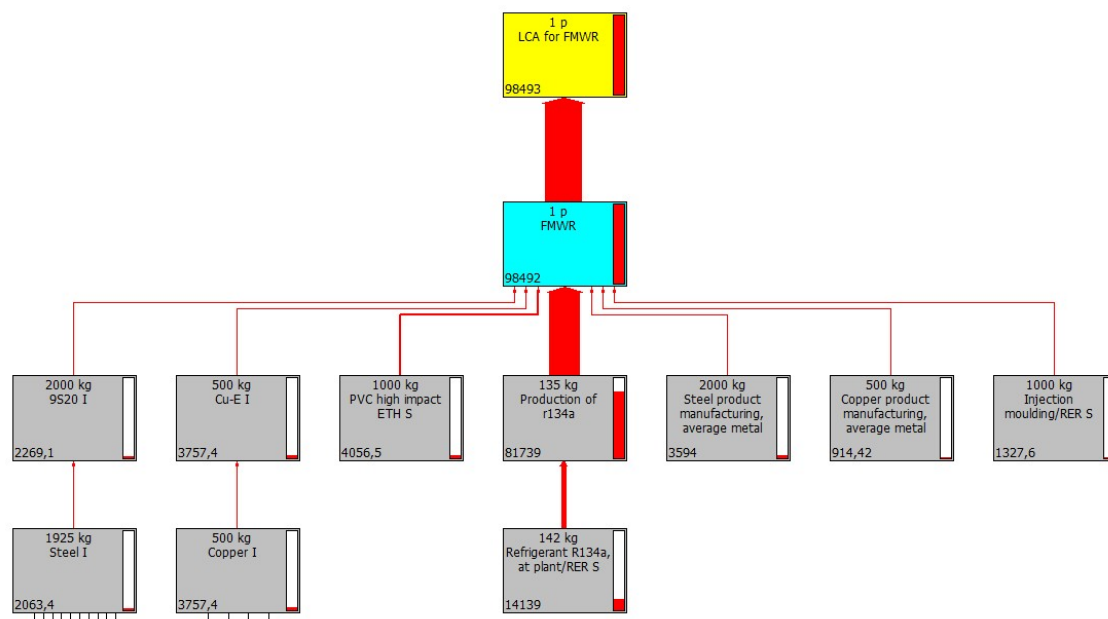
III.4. ENFRIADOR DE ABSORCIÓN DE SIMPLE EFECTO (FAWH)

El diagrama de árbol, que se obtiene del Sima Pro 7.3, para el ACV (LCA), se observan los flujos de emisiones de los distintos materiales que componen el enfriador de absorción de simple efecto FAWH. Los flujos más importantes se ven en la composición del acero 9S20I y también la cantidad del mismo (9000 kg) y la manufactura de productos de acero con la misma cantidad.



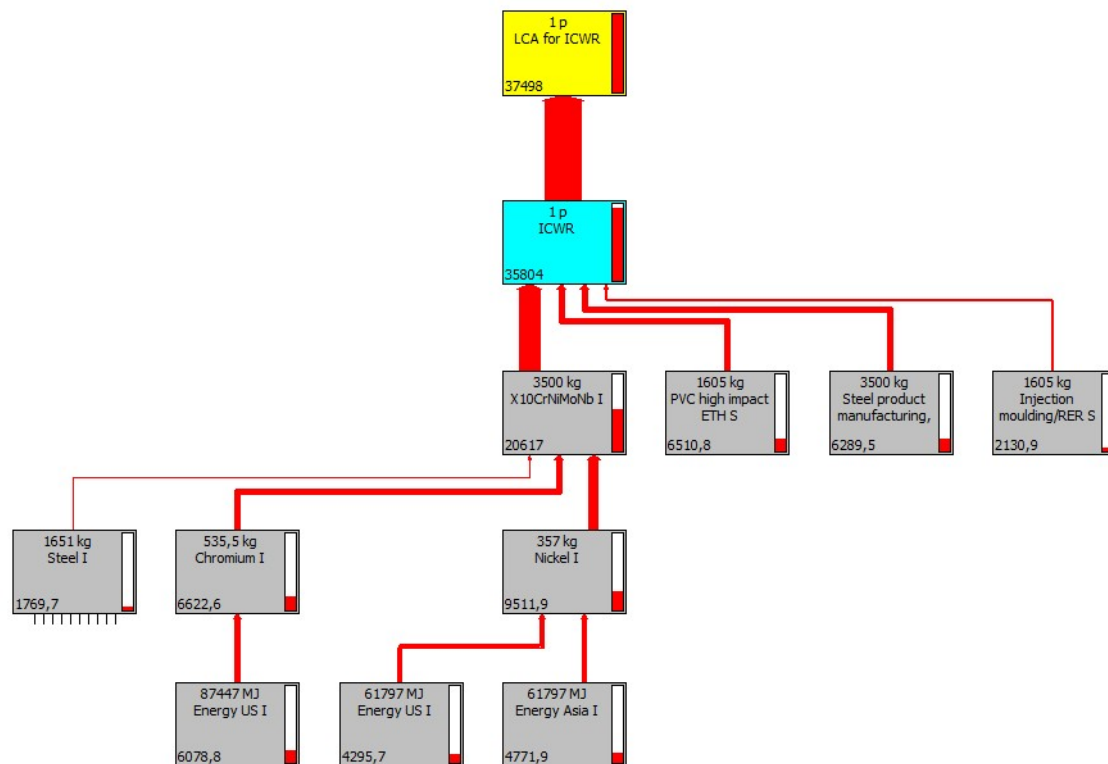
III.5. ENFRIADORES MECÁNICOS (FMWR)

El diagrama de árbol, que se obtiene del Sima Pro 7.3, para el ACV (LCA), se observan los flujos de emisiones de los distintos materiales que componen el enfriador mecánico FMWR. Los flujos más importantes que se observan son el PVC pero sobretodo en el refrigerante usado (R134a).



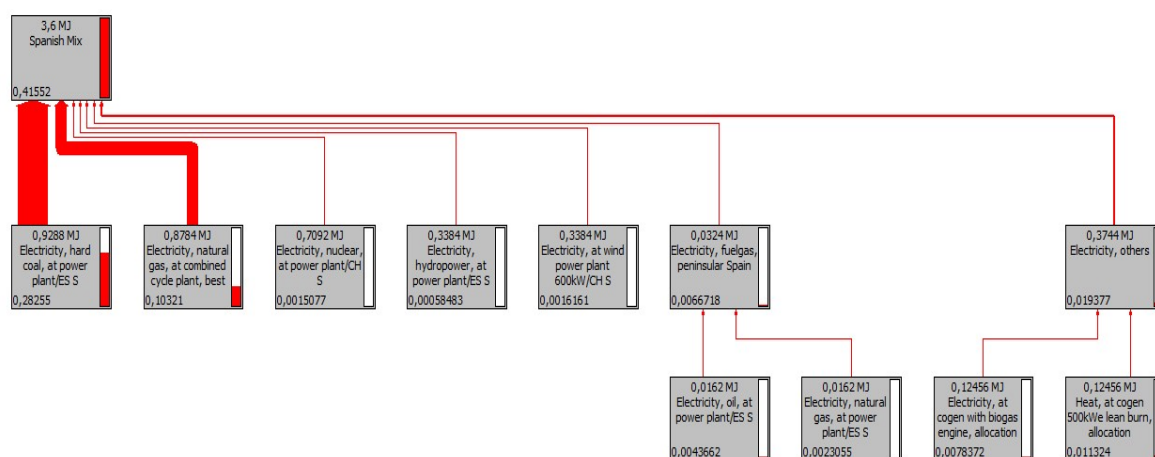
III.6. TORRE DE REFRIGERACIÓN (ICWR)

El diagrama de árbol, que se obtiene del Sima Pro 7.3, para el ACV (LCA), se observan los flujos de emisiones de los distintos materiales que componen la torre de refrigeración ICWR. Se aprecian claramente los flujos de metales (Cr, Ni), que forman el tipo de acero, el PVC también tiene un importante flujo y los productos manufacturados de acero.



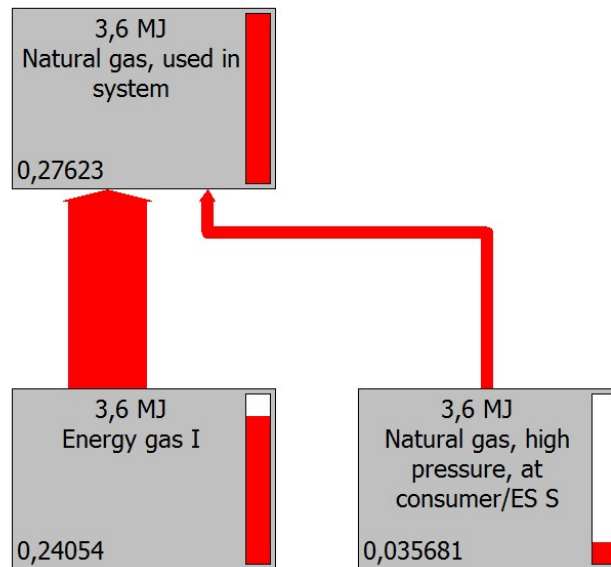
III.7. MIX ELECTRICO ESPAÑOL

El diagrama de árbol, que se obtiene del Sima Pro 7.3, para el ACV (LCA), se observan los flujos de emisiones para el mix eléctrico español, donde los mayores aportes vienen dados por las centrales de carbón, gas natural y ciclo combinado.



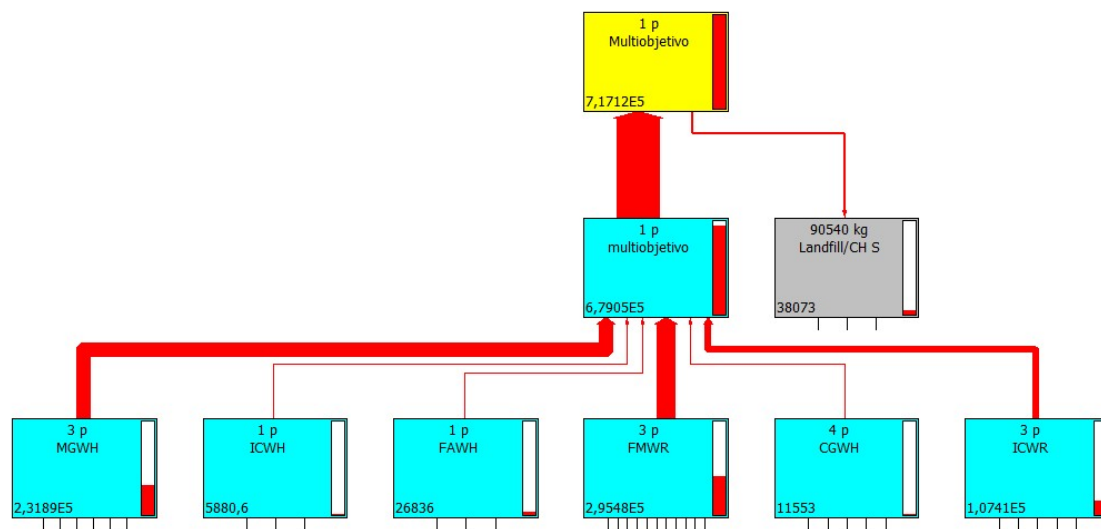
III.8. GAS NATURAL

El diagrama de árbol, que se obtiene del Sima Pro 7.3, para el ACV (LCA), se observan los flujos de emisiones para el gas natural.



III.9. SISTEMA DE TRIGENERACION OPTIMIZADO

El diagrama que se presenta finalmente es el del sistema de trigeneración optimizado, es decir, formado para todos los elementos del sistema. El diagrama de árbol que se obtiene del Sima Pro 7.3, para el ACV (LCA), se observa que los flujos más importantes corresponden a los enfriadores mecánicos FMWR, seguido de los motores de gas MGWH y a las torres de refrigeración ICWR.



Anexo IV. Aplicación ilustrativa para el Gas natural utilizado y para los materiales (equipos, aceite, refrigerante) en la metodología MC3 con la Hoja de Cálculo MC3v.2

IV1. Cálculo para el Gas Natural

Para el Gas Natural utilizado en el sistema de trigeneración optimizado, introducimos el valor de consumo anual de gas en la columna de categorías de consumo, columna 1, “Emisiones directas” donde aparecen los combustibles y allí el Gas Natural en m³/año, donde se introduce nuestro dato, ver Figura 1a).

Conocemos la densidad del gas que es 0,828 kg/m³, por lo que obtenemos las toneladas/año, columna 4.

En la columna 5, introducimos el valor del poder calorífico inferior del gas, 48,27 GJ/t, tomado del Inventario Nacional.

En la columna 6, tenemos ya el valor de multiplicar la columna 4 por la columna 5, es decir:

$$1.754,1 \text{ t/año} * 48,27 \text{ GJ/t} = 84.670,48 \text{ GJ/año}$$

En la columna 8, tenemos el factor de emisión en tCO₂/GJ, que nos dará la huella, por el tipo de ecosistema en tCO₂ y que se recoge su valor en la columna 9 de la Figura 1b).

$$84.670,48 \text{ GJ/año} * 0,0560 \text{ tCO}_2/\text{GJ} = 4.741,5 \text{ tCO}_2$$

Como se muestra en la Figura 2, la columna 15, refleja el dato de la Huella de Carbono en tCO₂.

La columna 16, representa la contrahuella que equivale a las tCO₂ evitadas, en el supuesto que corresponda.

Figura IV.1a). Hoja de Cálculo MC3v.2

CATEGORÍAS DE CONSUMOS	Unidades	Consumo anual					Factor emisión	
		en unidades de consumo [ud./año]	en euros sin IVA [€/año]	en toneladas [t/año]	[GJ/t]	en gigajulios [GJ/año]	[t CO2 eq / t comb.]	[tCO2/Gj]
1.-EMISIONES DIRECTAS								
1.1. Combustibles								
Carbón (antracita) (combustión)	[€]		0	0	29,45	0		0,0973
" (Ciclo de Vida)							0,969	
Leña (combustión)	[€]		0	0	15,6	0		0,112
" (Ciclo de Vida)							0,122	
Biomasa de madera	[€]		0	0	15,6	0		0,112
" (Ciclo de Vida)							0,122	
Biomasa (no madera)	[€]		0	0	11,6	0		0,1
" (Ciclo de Vida)							0,122	
Gas natural	[m3]	2.118.430,00	821.334,70	1.754,10	48,27	84.670,48		0,056
" (Ciclo de Vida)						27.094,55		0,013

Columna 1

Columna 4

Columna 5

Columna 6

Columna 8

Consumo en m³

Densidad del gas: 0,828 kg/m³

Poder calorífico Inferior del gas, tomado del Inventario Nacional

Factor de emisión, tomado del Inventario Nacional

Figura IV.1 b) Continuación de la Hoja de Cálculo MC3v.2

Huella por tipo de ecosistema, en tCO ₂						HUELLA TOTAL	CONTRA- HUELLA
bosques para CO ₂	tierra cultivable	pastos	bosques	terreno construido	mar		
[tCO ₂]	[tCO ₂]	[tCO ₂]	[tCO ₂]	[tCO ₂]	[tCO ₂]	[tCO ₂]	tCO ₂]
0						0	
0						0	
0						0	0
0			0			0	
0						0	0
0			0			0	
0						0	0
0	0					0	
4.741,50						4.741,50	
352,2						352,2	

IV2.Cálculo de los materiales

En el cálculo del equipamiento, tenemos que el coste de los equipos del sistema de trigeneración optimizado es de 413.195 € (Carvalho, 2011). Dado que tenemos el coste global de todos los equipos, calculamos para todo el equipamiento las emisiones de CO₂.

Este dato (columna 3) se introduce en Categorías de consumo: “Otras emisiones indirectas” y en el apartado 3.3 Materiales amortizables/s IVA, Columna 1, Figura IV.2a, de la Hoja de cálculo MC3v2. Las unidades de este dato son €/año y se ha transformar a t/año (columna 4). Para ello, nos vamos a la matriz de cálculos arancelarios de la citada Hoja de cálculo MC3v2 (Figura IV.3), en el capítulo 84 de la matriz, incluye el equipamiento que lo define como “reactores nucleares, calderas, máquinas, aparatos y artefactos mecánicos; partes de estas máquinas o aparatos”.

Figura IV.3. Matriz de capítulos arancelarios

Nº	CAPÍTULO	AÑO 2009		
		PESO (t)	VALOR (miles euros)	FACTOR DE CONVERSIÓN (€/t)
72	FUNDICIÓN, HIERRO Y ACERO	4.644.948,20	2.616.915,20	473,25
73	MANUFACTURAS DE FUNDICIÓN, DE HIERRO O ACERO	1.154.095,80	2.331.413,30	1.696,90
74	COBRE Y SUS MANUFACTURAS	257.608,00	744.199,20	2.426,66
75	NÍQUEL Y SUS MANUFACTURAS	1.855,30	15.691,50	7.104,44
76	ALUMINIO Y SUS MANUFACTURAS	311.955,50	932.946,30	2.512,14
77				
78	PLOMO Y SUS MANUFACTURAS	13.759,70	15.138,90	924,20
79	CINC Y SUS MANUFACTURAS	148.849,10	159.210,20	898,47
80	ESTAÑO Y SUS MANUFACTURAS	2.176,60	10.156,60	3.919,67
81	LOS DEMÁS METALES COMUNES; CERMETS; MANUFACTURAS DE ESTAS MATERIAS	3.775,70	11.226,90	2.497,71
82	HERRAMIENTAS Y ÚTILES, ARTÍCULOS DE CUCHILLERÍA Y CUBIERTOS DE MESA, DE METAL COMÚN, PARTES DE ESTOS ARTÍCULOS, DE METAL COMÚN	37.585,60	272.861,70	6.098,18
83	MANUFACTURAS DIVERSAS DE METAL COMÚN	90.588,10	479.860,80	4.449,62
84	REACTORES NUCLEARES, CALDERAS, MÁQUINAS, APARATOS Y ARTEFACTOS MECÁNICOS; PARTES DE ESTAS MÁQUINAS O APARATOS	1.069.618,80	7.342.947,80	5.766,61

Identificado el capítulo arancelario, en nuestro caso el 84, vamos a la matriz de intensidades energéticas agrupadas (compuesta) para los materiales y en su epígrafe “3. Materiales no orgánicos”, localizamos el correspondiente capítulo arancelario, el 84 (Figura IV.4), y para el factor de conversión a €/t y la Intensidad energética media en GJ/t, obtenemos los correspondientes valores de 5.532,58€/t y 100GJ/t, respectivamente.

Figura IV.4. Matriz de intensidades energéticas agrupadas (compuesta)

MATERIAL	Capítulos Arancelarios	Factor conversión (€/t)	I.E. media (GJ/t)
3. MATERIALES NO ORGÁNICOS			
Maquinaria industrial y grandes equipamientos (y sus partes)	84	5.532,58	100,00

En la columna 6 de la Figura IV.2a podemos ver el valor en GJ/año del equipamiento y en la columna 8 el factor de emisión, obtenido del Inventario Nacional.

Figura IV.2a. Hoja de cálculo del MC3v2 para el equipamiento.

CATEGORÍAS DE CONSUMOS	Unidades	Consumo anual					Factor emisión	
		en unidades de consumo [ud./año]	en euros sin IVA [€/año]	en toneladas [t/año]	[GJ/t]	en gigajulios [GJ/año]	[t CO ₂ eq. / t comb.]	[tCO ₂ /GJ]
3.3. Materiales amortizables	sin IVA				[GJ/t]			
. Productos básicos del aluminio y derivados	[€]		0.0	0.0	205.00	0.00		0.0737
. Manufacturas del hierro, acero y otros metales corrientes (no aluminio), utensilios y herramientas	[€]		0.0	0.0	60.00	0.00		0.0737
. Mobiliario y carruajes de hierro o acero y otros materiales sintéticos	[€]		0.0	0.0	100.00	0.00		0.0737
. Miscelánea manufacturas, mat. oficina	[€]		0.0	0.0	75.00	0.00		0.0737
. Maquinaria industrial y grandes equipamientos (y sus partes)	[€]		413.195.0	74.7	100.00	7.468.40		0.0737
. Aparatos eléctricos comunes, iluminación, electrodomésticos	[€]		0.0	0.0	100.00	0.00		0.0737
. Vehículos transporte (tierra, mar y aire), artefactos flotantes automóviles terrestres y tractores (y sus partes)	[€]		0.0	0.0	100.00	0.00		0.0737
. Aparatos eléctricos de precisión, ordenadores, móviles, calculadoras, etc.	[€]		0.0	0.0	257.14	0.00		0.0737
Subtotal 3.3			413.195.0	74.7		7.468.40		

Valor equipos €/año

Valor de conversión de €/año a t/año

Valor de I.E. en GJ/t

Valor total, GJ/año

Factor emisión, Inventario Nacional

La conversión de €/año a t/año, se obtiene de dividir el coste de los equipos por el factor de conversión de la matriz de intensidades energéticas correspondientes al capítulo arancelario 84 (Figura IV.4).

Este valor es el que aparece en la columna 4. Si lo multiplicamos por la intensidad energética (columna 5), obtenemos el valor total en GJ/año (columna 6). En la columna 8, están los factores de emisión del inventario Nacional, que multiplicado por el valor total de la columna 6, obtenemos las emisiones de CO₂ correspondientes a los equipos instalados y la huella de carbono (Figura IV.2b)

Figura IV.2b. Emisiones de CO₂ correspondiente al equipamiento.

Huella por tipo de ecosistema, en tCO ₂						HUELLA TOTAL	CONTRA- HUELLA
bosques para CO ₂ [tCO ₂]	tierra cultivable [tCO ₂]	pastos [tCO ₂]	bosques [tCO ₂]	terreno construido [tCO ₂]	mar [tCO ₂]		
0,0						0,0	
0,0						0,0	
0,0						0,0	
0,0						0,0	
550,4						550,4	
0,0						0,0	
0,0						0,0	
0,0						0,0	
550,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	550,4	0,0

En las categorías de consumo en el apartado 3.2. Materiales no amortizables, hemos de incluir aquí el aceite que consumen los motores como el refrigerante que consumen los enfriadores mecánicos. Todo ello forma parte del grupo de materiales. Siguiendo el mismo procedimiento que para los equipos, se obtiene su valor de emisión de CO₂.

Los capítulos arancelarios serían el 27 “combustibles minerales, aceites minerales y productos de su destilación; materias bituminosas; ceras minerales” y 28 “productos químicos inorgánicos; compuestos inorgánicos u orgánicos de metal precioso, de elementos radiactivos, de metales de las tierras raras o de isótopos”, nos dan los factores de conversión e intensidad energética media como puede se puede ver en la Figura IV.5, de la matriz de intensidades energéticas.

Figura IV.5. Matriz de intensidades energéticas de los materiales agrupados para los capítulos arancelarios 27 y 28.

MATERIAL	Capítulos Arancelarios	Factor conversión (€/t)	I.E. media (GJ/t)
Combustibles y aceites minerales, bituminosos, etc.	27	465,49	-
Productos químicos, higiénicos y limpieza; pinturas vegetales, insecticidas, fungicidas, etc.	28, 29, 34	915,90	42,50

Los valores de los factores de conversión, se utilizan para convertir los €/año a t/año columnas 3 y 4 de la Figura IV.3a; la intensidad energética se llevan a la columnas 5 y obtenemos en la columna 6 los

valores de energía en GJ/año. En la columna 8 tenemos los factores de emisión de CO₂, Figura IV.3a.

Figura IV.3a. Cálculo de los materiales no amortizables.

Columna 1	Columna3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 8
-----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

CATEGORÍAS DE CONSUMOS	Unida des	Consumo anual					Factor emisión	
		en unidades de consumo [ud./ año]	en euros sin IVA [€/ año]	en toneladas [t/año]	[GJ/t]	en gigajulios [GJ/año]	[t CO2 eq / t comb.]	[tCO2/G j]
3.2. Materiales no amortizables	sin IVA	[GJ/t]						
Combustibles y aceites minerales, bituminosos, etc.	[€]	2.188,0	41.136,0	88,4	41,70	3.685,06		0,0134
Productos químicos, higiénicos y limpieza; pinturas vegetales, etc.	[€]	1.485,0	72.515,5	79,2	42,50	3.364,91		0,0737

Valores de conversión
de €/año a t/año

Valores de
I.E. en Gj/t

Valores totales,
Gj/año

Factor emisión,
Inventario Nacional

Finalmente obtenemos el valor de las emisiones de CO₂ para estos materiales, Figura IV.3b.

Figura IV.3b. Valor de las emisiones de CO₂ para los materiales no amortizables

Huella por tipo de ecosistema, en tCO ₂						HUELLA TOTAL [tCO ₂]	CONTRA-HUELLA tCO ₂
bosques para CO ₂ [tCO ₂]	tierra cultivable [tCO ₂]	pastos [tCO ₂]	bosques [tCO ₂]	terreno construido [tCO ₂]	mar [tCO ₂]		
7,4						7,4	
248,0						248,0	

La suma de las emisiones para los materiales amortizables (equipos) Figura IV.2b y los materiales no amortizables (aceite, refrigerante), Figura IV.3b, nos dan las emisiones totales de los equipos, Figura IV.6.

Figura IV.6. Emisiones totales de CO2 de los materiales

Huella por tipo de ecosistema, en tCO2						HUELLA TOTAL [tCO2]	CONTRA- HUELLA tCO2]
bosques para CO2 [tCO2]	tierra cultivable [tCO2]	pastos [tCO2]	bosques [tCO2]	terreno construido [tCO2]	mar [tCO2]		
550,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	550,4	0,0
7,4						7,4	
248,0						248,0	
805,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	805,8	0,0

Anexo V. Descripción del sistema de trigeneración optimizado

V1. Sistema de Trigeneración y escenario económico

Este estudio ha analizado un hospital de tamaño medio con 500 camas, ubicado en Zaragoza. Las demandas energéticas consideradas son calor (agua caliente sanitaria, ACS, y calefacción), refrigeración, y electricidad.

La síntesis de un sistema de trigeneración comienza con la creación de una superestructura, que debe incluir todos los procesos y conexiones posibles. Una vez optimizado el sistema, esta superestructura se reduce a una configuración óptima. Por tanto, se debe asegurar que todos los equipos y flujos que puedan formar parte de una configuración óptima estén incluidos en la superestructura inicial, y además se deben permitir redundancias y varias alternativas posibles para cada proceso. La Figura 1 muestra la superestructura con las tecnologías propuestas para el hospital, donde se pueden observar los flujos energéticos y sus interacciones.

La superestructura de un sistema de trigeneración que satisfaga las demandas energéticas de calor (ACS y refrigeración), frío y electricidad cuenta con la posibilidad de instalación de equipos como: TGVA (turbina de gas + caldera de recuperación, produciendo vapor y agua caliente), CGVA (caldera de vapor), MGWC (motor de gas + recuperadores de calor de agua caliente), TCVA (intercambiador vapor-agua caliente), CGWC (caldera de agua caliente), ICWC (intercambiador agua caliente-agua de refrigeración), FAVA (máquina de refrigeración por absorción de doble efecto y accionada con vapor), FAWC (máquina de refrigeración por absorción de simple efecto y accionada con agua caliente), FMWR (máquina de refrigeración mecánica con accionamiento eléctrico y refrigerada con agua) y ICWR (torre de refrigeración para evacuar al ambiente el calor del agua de refrigeración).

Las utilidades disponibles son CG (gas natural), VA (vapor de agua saturado, 180°C), WC (agua caliente, 90°C), WR (agua de refrigeración, $t_0 + 5^\circ\text{C}$), AA (aire ambiente, t_0), WF (agua fría, 5°C) y EE (energía eléctrica).

V2.Demandas energéticas

V3. Equipos

62

potencialmente instalables y las columnas indican las utilidades disponibles. El coeficiente de producción en negrita muestra el flujo que define la capacidad del equipo. Coeficientes positivos indican que la utilidad es producida, y coeficientes negativos indican un consumo de dicha utilidad.

CI_i es el coste de inversión del equipo de la tecnología I , obtenido a partir de precios de catálogo y multiplicado por un factor ($= 1,15$) que considera transporte, instalación, etc. Para las condiciones actuales de España, se ha considerado adecuado un factor de amortización y mantenimiento, fam , igual a 0,20/año (Carvalho, 2008). Para cada uno de los periodos horarios (576) se dispone de los datos de demanda energética y precios de la electricidad comprada y vendida.

Tabla V.1. Matriz de coeficientes técnicos de producción y datos de las tecnologías.

	Coeficientes técnicos de producción							Equipo	
	CG	VA	WC	WR	AA	WF	EE	Inversión CI 10³€	Potencia Nominal PNOM (MW)
MGWH	2,45		0,96	0,20			1	435	0,58
CGWH	1,08		1					30	0,53
ICWH			1	1				6,5	0,40
FAWH			1,50	2,50		1	0,01	200	0,49
FMWR				1,23		1	0,23	175	0,42
ICWR				1	1			25	0,10

V4. Tarifas de gas y electricidad

Para el caso del gas natural en España, el consumidor elige la tarifa más adecuada en función del volumen de consumo y presión de abastecimiento. Para la compra de gas natural, se ha considerado la tarifa 2.4 (RMITC 7575, 2007). En este estudio se ha considerado un coste constante de $C_g=0,025$ €/kWh, después de añadir tasas y distribuir los costes fijos a lo largo del consumo anual estimado.

Las tarifas de electricidad se componen de dos términos: el término de potencia (que depende de la capacidad contratada), y el término de energía (que depende del consumo). La complejidad del problema radica

en que las necesidades energéticas son distintas cada día y cada hora, a lo que hay que añadir que la tarifa de la electricidad comprada varía en función de su discriminación horaria. Se ha elegido la tarifa general 1.1 de alta tensión y corta utilización, establecida en el Real Decreto 1634/2006 (publicado en el BOE 312 de 30/12/2006). El término de potencia es 2,272 (€/mes)/kW y el de energía 0,078 €/kWh.

Respecto a la tarifa de suministro, se ha adoptado la discriminación horaria del tipo 2, que diferencia dos periodos, por un lado 4 horas punta al día con un incremento de precio del 40% (en invierno, de 9-13h; y en verano, de 10-14h) y en las 20 horas restantes, llano y valle, no hay recargo ni descuento. El precio final considerado, incluidos impuestos, es $C_{ec} = 0,095$ €/kWh en horas valle/llano y 0,130 €/kWh en horas punta.

El precio de venta de electricidad se ha obtenido a través del RD 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Considerándose el grupo a.1 (cogeneración), subgrupo a.1.1 (gas natural), y $P \leq 10$ MW, el precio es $C_{ev} = 0,0077$ €/kWh.

V5.Evaluación ambiental

La optimización ambiental se ha realizado de acuerdo a las emisiones de CO₂, puesto que representan el 77% de las emisiones antropogénicas globales de GEI en 2004 (siendo el CO₂ el gas considerado como principal responsable del cambio climático) (Rogner et al., 2007).

Cambios en el estilo de vida y comportamiento pueden contribuir a la mitigación del cambio climático en todos los sectores, como por ejemplo, el uso de tecnologías que resultan en una reducción considerable de los impactos ambientales. En este sentido, se pueden alcanzar reducciones significativas en las emisiones de CO₂ asociadas al uso de energía en los edificios, a través del empleo de tecnologías ya conocidas, como por ejemplo la trigeneración que permite alcanzar un ahorro significativo de energía primaria.

Las estrategias de diseño para edificios eficientes desde un punto de vista energético deben incluir una selección de sistemas que aprovechen al máximo los recursos y que operen de forma óptima. En este trabajo,

se han seleccionado las emisiones de CO₂ para cuantificar las cargas ambientales puesto que el calentamiento global y el cambio climático asociado se considera una seria amenaza a medio y largo plazo, con consecuencias a escala global (IPCC, 2007).

De acuerdo con Levine et al. (2007), las emisiones totales de CO₂ asociadas al uso de energía en edificios ascienden a 8,6 Gt/año (electricidad, calefacción, refrigeración, etc.), que casi triplica el valor de las emisiones derivadas de la combustión directa de combustibles fósiles (3 Gt/año). Como la electricidad puede obtenerse también a partir de combustibles con menor proporción de carbono que la encontrada en los combustibles actuales, las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de electricidad en edificios también pueden ser reducidas por el lado de la producción. La mitigación del cambio climático en el sector de edificios incluye una gran cantidad de medidas, por tanto es útil comparar el potencial de mitigación con las emisiones de CO₂.

Las tecnologías “limpias” que generan electricidad a partir de energías renovables o menos contaminantes, como el gas natural, aumentan su peso en el “mix” tecnológico del sector eléctrico español, y tanto el gobierno como el sector eléctrico prevén que su cuota de producción aumente en los próximos años. Las estrategias de cambio climático incluyen la elección de la energía primaria disponible así como la mejora de la eficiencia de las tecnologías empleadas para calefacción y refrigeración; los sistemas de co- y tri- generación se refieren en el informe de Mitigación del Cambio Climático como opciones para la mitigación de emisiones de GEI en edificios (Levine et al., 2007).

SimaPro (PRé Consultants, 2008), una herramienta especializada de ACV, se ha utilizado en este trabajo para calcular el impacto asociado a la producción de cada equipo perteneciente a la superestructura, ya que incluye varias bases de datos de inventario con miles de procesos, además de los métodos más importantes de evaluación de impacto.

El problema a resolver consiste en la selección de la combinación de tecnologías, en cuanto a tipo y potencia instalada, capaz de atender a todas las demandas energéticas planteadas por el hospital así como en establecer el régimen de operación de los equipos instalados para cada uno de los intervalos de tiempo definidos.

Para alcanzar este objetivo, se ha construido un modelo de optimización basado en programación lineal entera, cuya resolución permite conocer el valor de todos los flujos energéticos, la configuración del sistema (equipos que constituyen el sistema y cómo se conectan entre sí) y el modo de operación más conveniente.

El modelo representa la superestructura, considerando todas las opciones de configuración y operación, así como también las circunstancias particulares de demanda, tarifas, etc. La solución del modelo ha evaluado el sistema atendiendo a los parámetros ambientales previamente elegidos.

Función objetivo

La primera función objetivo considerada ha sido la minimización de las emisiones totales de CO₂ (CO_{2 tot}), que incluye las emisiones totales fijas de los equipos (CO_{2 fij}) y las emisiones anuales totales de operación (CO_{2 ope}).

$$\text{Min CO}_2 \text{ tot} = \text{CO}_2 \text{ fij} + \text{CO}_2 \text{ ope} \quad (1)$$

El impacto anual fijo de los equipos (PU_{fij}) es,

$$\text{CO}_2 \text{ fij} = \text{fam}_e \cdot \sum_i \text{NIN}(i) \cdot \text{CO}_2 \text{I}(i) \quad (2)$$

donde NIN(*i*) y CO₂I(*i*) son, respectivamente, el número de equipos instalados y el impacto ambiental asociado a la producción de cada equipo de la tecnología *i*, considerando un factor de amortización ambiental, fam_e, igual a 0,10/año, que representa la distribución del impacto ambiental global asociado a la construcción del equipo a lo largo de la vida útil del sistema (Carvalho, 2008). Considerando que el año ha sido dividido en *d* días tipo, que a su vez han sido divididos en *h* horas, (*d*, *h*) representa la *h*-ésima hora del *d*-ésimo día. El impacto anual asociado a la operación (CO_{2 ope}) del sistema se expresa como,

$$\text{CO}_2 \text{ ope} = \sum_d \sum_h [\text{EM}_g \cdot \text{N}_g(d,h) + \text{EM}_e \cdot \text{E}_p(d,h) - \text{EM}_e \cdot \text{E}_s(d,h)] \quad (3)$$

donde N_g es el consumo de gas natural, y E_c y E_v son, respectivamente, la cantidad de electricidad comprada y vendida. EM_e·E_s(*d*,*h*) es el impacto evitado a través de la venta de electricidad producida por el módulo de cogeneración (utilizando combustible con menor impacto asociado). De este modo el concepto de emisiones evitadas se presenta

como la diferencia entre el impacto generado por el modulo de cogeneración y el impacto generado a través de la compra de electricidad de la red.

Además la operación del sistema está sujeta a los límites de capacidad, restricciones de producción, y ecuaciones de balance de los equipos y del sistema en conjunto.

Tal y como se ha indicado anteriormente, se ha introducido una segunda función objetivo en el modelo, para comparar los resultados obtenidos con el óptimo económico del sistema de trigeneración instalado, en términos de coste anual total C_{tot} (en €/año). Para ello se han minimizado los costes de los equipos y del combustible así como la compraventa de servicios energéticos. En este caso, las ecuaciones (1) – (3) se expresan como:

$$\text{Min } C_{tot} = C_{fij} + C_{ope} \quad (4)$$

$$C_{fij} = fam \cdot \sum_i NIN(i) \cdot CI(i) \quad (5)$$

$$C_{ope} = \sum_d \sum_h [C_g \cdot N_g(d,h) + C_{ec} \cdot E_p(d,h) - C_{ev} \cdot E_s(d,h)] \quad (6)$$

La solución del modelo se ha obtenido evaluando el sistema atendiendo a las dos funciones objetivo a la vez (decisión multiobjetivo), buscando un compromiso entre el objetivo económico (minimización del coste anual) y el objetivo ambiental (minimización de cargas ambientales). Más detalles sobre la solución óptima en Carvalho, 2011.