

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Aprendizaje de Tecnología Energética y Transmisión de calor mediante visualización interactiva de datos

Autor: Pilar Leña Martínez

Tutor: Rocío González Falcón

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Aprendizaje de Tecnología Energética y Transmisión de calor mediante visualización interactiva de datos

Autor:

Pilar Leña Martínez

Tutor:

Rocío González Falcón

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Aprendizaje de Tecnología Energética y Transmisión de calor mediante visualización interactiva de datos

Autor: Pilar Leña Martínez

Tutor: Rocío González Falcón

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

En este trabajo se desarrolla un estudio paramétrico de una caldera de vapor que se centrará en el análisis del rendimiento y de las pérdidas por los gases de escape. Sus principales variables son el tipo de combustible, la temperatura de los gases de escape, el volumen de oxígeno, el volumen de dióxido de carbono y las pérdidas convectivo-radiantes.

En primer lugar, se contextualizará que es una caldera de vapor, su importancia en la industria y como se clasifican, y se explicarán los métodos de cálculo de la eficiencia de la caldera.

Seguidamente se analizarán las variables de estudio y como varían. Después, se planteará y resolverá el problema de estudio del trabajo.

Por último, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los resultados, mediante el uso de gráficos y diagramas.

Abstract

In this paper, a parametric study of a steam boiler is developed, which will focus on the analysis of the efficiency and exhaust gas losses. Its main variables are fuel type, flue gas temperature, oxygen volume, carbon dioxide volume and convective-radiant losses.

First of all, it will be contextualised what a steam boiler is, its importance in industry and how they are classified, and the methods of calculating boiler efficiency will be explained.

Next, the study variables and how they vary will be analysed. Then, the study problem of the paper will be posed and solved.

Finally, a detailed analysis of the results will be carried out, using graphs and diagrams.

Índice

Resumen	8
Abstract	9
Índice	10
Índice de Tablas	11
Índice de Figuras	12
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivo</i>	2
2 Ámbito teórico	3
2.1 <i>Clasificación de las calderas</i>	3
2.1.1 Construcción	3
2.1.2 Tipo de combustible	4
2.2 <i>Eficiencia de las calderas</i>	4
2.2.1 Método directo	5
2.2.2 Método indirecto	5
3 Enunciado del problema	7
3.1 <i>VARIABLES del problema</i>	7
3.1.1 Tipo de combustible	7
3.1.2 Temperatura de los gases	7
3.1.3 Volumen de CO ₂ y O ₂	10
3.1.4 Pérdidas por transmisión	18
4 Resolución del problema	11
4.1 <i>Ecuaciones utilizadas</i>	11
4.1.1 Balance de masa	11
4.1.2 Balance de energía	12
4.2 <i>Proceso iterativo</i>	13
5 Análisis de resultados	16
5.1 <i>Escenario 1</i>	16
5.2 <i>Escenario 2</i>	22
5.3 <i>Escenario 3</i> https://we.tl/t-7qZOxbJXkb	27
5.4 <i>Escenario 4</i>	33
5.5 <i>Análisis del efecto de las variables en el rendimiento de la caldera</i>	38
6 Conclusiones	40
Referencias	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de combustibles	7
Tabla 2 Variación de temperatura de los gases	8
Tabla 3 Calores específicos de los gases	10
Tabla 4 Valores de variación de VCO ₂ y VO ₂ para Fueloil 1	11
Tabla 5 Valores de variación de VCO ₂ y VO ₂ para Fueloil 2	13
Tabla 6 Valores de variación de VCO ₂ y VO ₂ para Gasóleo C	14
Tabla 7 Valores de variación de VCO ₂ y VO ₂ para Gas Natural	16
Tabla 8 Valores de variación de VCO ₂ y VO ₂ para Propano	17
Tabla 9 Variación pérdidas por transmisión	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Evolución de cobertura de la demanda eléctrica en España en 2022	1
Ilustración 2 Balance de masa y energía	4
Ilustración 3 Diagrama de Ostwald Fueloil 1	10
Ilustración 4 Diagrama de Ostwald Fueloil 2	12
Ilustración 5 Diagrama de Ostwald Gasóleo C	13
Ilustración 6 Diagrama de Ostwald Gas Natural	15
Ilustración 7 Diagrama de Ostwald Propano	16
Ilustración 8 Tabla paramétrica EES Fueloil 1, $P_{cr}=0$, $V_{CO_2}=0,05$, $VO_2 =0,07591$	14
Ilustración 9 Tabla de Excel de recogida de datos de rendimiento para $V_{CO_2}=0,05$, $VO_2 =0,07591$	15
Ilustración 10 Diagrama de Sankey Fueloil 1 $T=150^{\circ}C$	20
Ilustración 11 Diagrama de Sankey Fueloil 1 $T=253,4^{\circ}C$	21
Ilustración 12 Diagrama de Sankey Fueloil 1 $T= 350^{\circ}C$	21
Ilustración 13 Diagrama de Sankey Gasoleo C $VO_2=0.03591$	26
Ilustración 14 Diagrama de Sankey Gasoleo C $VO_2=0.05165$	26
Ilustración 15 Diagrama de Sankey Gasoleo C $VO_2=0.0779$	27
Ilustración 16 Diagrama de Sankey Gas Natural $V_{CO_2}=0.03$	31
Ilustración 17 Diagrama de Sankey Gas Natural $V_{CO_2}=0.05182$	32
Ilustración 18 Diagrama de Sankey Gas Natural $V_{CO_2}=0.09$	32
Ilustración 19 Diagrama de Sankey Propano $P_{cr}=0$	37
Ilustración 20 Diagrama de Sankey Propano $P_{cr}=0,2273$	37
Ilustración 21 Diagrama de Sankey Propano $P_{cr}=0,5$	38

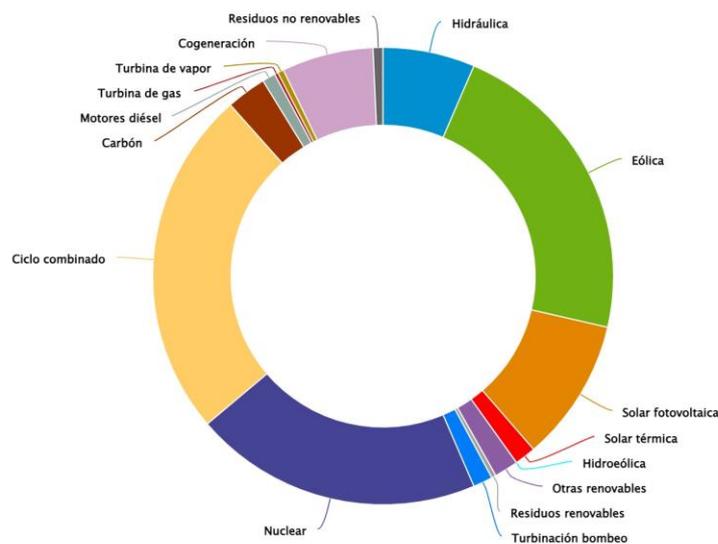
1 INTRODUCCIÓN

Las calderas son dispositivos que encargados de la producción vapor a presiones superiores a atmosférica mediante la transferencia de energía de un combustible al agua, dicho vapor se usa en una amplia gama de aplicaciones en procesos industriales, generación de energía eléctrica, o calefacción y climatización.

La aparición de las calderas está ligada a la Revolución Industrial, desde entonces han sufrido transformaciones y actualizaciones tecnológicas, evolucionando para adaptarse a las demandas cambiantes de la sociedad y la industria.

En la actualidad las calderas son parte de numerosos procesos para la obtención de energía eléctrica, generalmente el vapor obtenido mediante la transferencia de energía de la combustión es utilizado para impulsar turbinas de vapor, encargadas de mover generadores eléctricos para la producción de energía.

En el siguiente gráfico se puede observar la evolución de la cobertura de la demanda eléctrica de España durante el año 2022:



Fuente: ree.es

Ilustración 1 Evolución de cobertura de la demanda eléctrica en España en 2022

La caldera convencional forma gran parte de los procesos que se encuentran en el gráfico: Ciclo combinado, nuclear, turbinas de vapor, cogeneración, carbón etc.

Por tanto, es importante una buena optimización de las calderas para garantizar la mayor eficiencia energética posible en estos procesos.

1.1 Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo la realización de un estudio paramétrico de una caldera industrial, se busca identificar las condiciones de óptimas funcionamiento y conseguir por tanto la máxima eficiencia energética posible. Este trabajo se centrará en el estudio del rendimiento y las pérdidas por los gases de la caldera, enfocándolo de la siguiente manera:

- Identificación y elección de las variables y variación de estas
- Método de resolución elegido
- Análisis y representación de los resultados.

2 ÁMBITO TEÓRICO

La caldera es un recipiente estanco en el cual se produce una transferencia de energía térmica mediante el calentamiento de un fluido, pudiéndose dar el cambio de fase de este. Esta energía térmica se origina mediante la combustión de un combustible líquido.

Dentro de la diversidad de calderas, es posible encontrar una variedad de fluidos de trabajo utilizados, siendo el agua el más común dado que es un medio útil y barato para transferir calor. Siendo el fluido de estudio utilizado en este trabajo.

En una caldera para que tenga lugar el proceso de combustión es necesaria la presencia de tres elementos: combustible, comburente y una fuente de ignición. Además, para que la combustión sea eficiente se tiene que cuidar que las proporciones de combustible sean las adecuadas y se mezclen correctamente.

Las partes de una caldera varían según el tipo, pero de forma general constan de las siguientes partes:

- Quemador
- Hogar
- Tubos de intercambio
- Carcasa
- Chimenea
- Economizador

2.1 Clasificación de las calderas

Las calderas se pueden clasificar de distintas maneras según varios criterios como su diseño, tipo de funcionamiento, aplicaciones etc... A continuación, se desarrollarán algunas de las clasificaciones consideradas las más relevantes para este proyecto:

2.1.1 Construcción

Las calderas de vapor se pueden clasificar en calderas pirotubulares o acuotubulares, según la posición de los gases y el agua:

2.1.1.1 Calderas pirotubulares

En este tipo de calderas los gases circulan a través de los tubos que están dispuestos en el interior de una cámara de agua. La manera en la que se configuran da lugar a limitaciones en su diseño y utilización. También se encuentran limitadas por la presión de trabajo, al aumentar la presión aumenta la tensión a la que se ven sometidas las chapas de la carcasa aumentando la curvatura de esta, al despresurizar la caldera las chapas vuelven a la forma original lo que puede provocar grietas por fatiga, obligando a que el espesor de la carcasa sea demasiado grande. La máxima producción de estas calderas es de 27 t/h, cuando es necesaria una producción mayor se utilizan varias calderas.

2.1.1.2 Calderas acuotubulares

En estas calderas el agua es la que circula por el interior de los tubos mientras los gases circulan por el exterior de los tubos. Por lo tanto, la presión de trabajo de estas calderas puede ser más elevada que en las pirotubulares. Este tipo de calderas suelen considerarse más apropiadas para el uso industrial ya que permite altos rendimientos de vapor, presiones altas y vapor recalentado. La producción de una caldera acuotubular puede variar entre 3 y 3500 t/h.

2.1.2 Tipo de combustible

El combustible utilizado para la transferencia de calor en las calderas depende normalmente de cual tiene la tarifa mas atractiva, aun así, se pueden dividir los tipos de combustible en los siguientes grupos:

2.1.2.1 Carbón

Es la categoría de combustibles sólido que contienen una cantidad de carbono considerable en su composición. Dentro de esta categoría se distinguen varios tipos de carbón, los cuales se vinculan a las distintas etapas de formación y variaciones de concentración de carbono.

2.1.2.2 Líquidos derivados del petróleo

En esta categoría los combustibles son líquidos derivados directa o indirectamente del petróleo crudo, siendo el petróleo es una mezcla que se encuentra en la tierra. Se pueden diferenciar varios grupos, entre ellos gasolinas, gasoiles o fueloiles.

2.1.2.3 Gas

Este tipo de combustibles es el mas sencillo de quemar con un exceso de aire bajo, así mismo se pueden dividir en: gas natural, producido bajo tierra, y gas licuado de petróleo, producidos al refinar petróleo y almacenado bajo presión.

2.1.2.4 Combustible a partir de residuos

Las calderas pueden ser alimentadas con residuos como puede ser la biomasa o aceite sucio, no siendo esto común ya que es complicado que reúnan los requisitos de emisiones necesarios.

2.2 Eficiencia de las calderas

La eficiencia o rendimiento de una caldera mide la capacidad que tiene esta de transformar la energía contenida en el combustible en energía útil. Cuanto mayor sea el porcentaje de eficiencia mas eficaz es la caldera en conseguir la salida deseada con la mínima cantidad de esfuerzo y/o residuos y combustible.

Para el cálculo del rendimiento el primer paso es plantear un balance de materia y energía a los fluidos, calores y pérdidas del sistema de estudio:

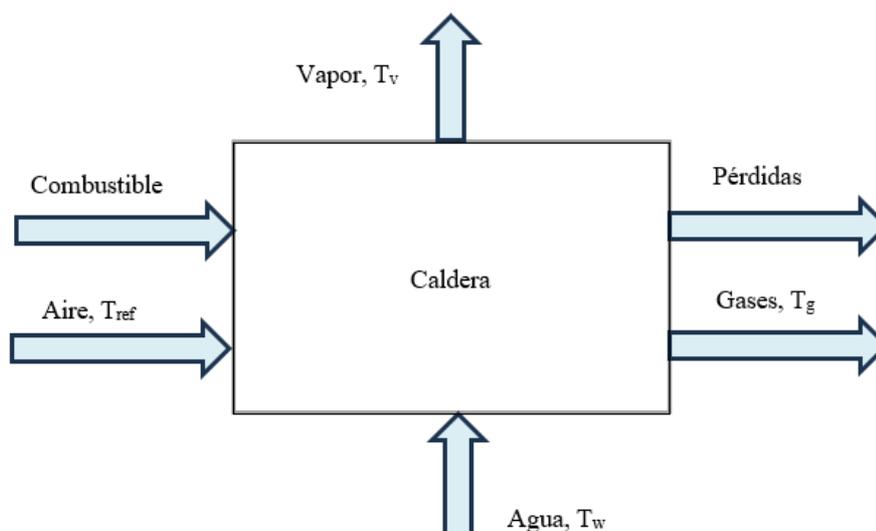


Ilustración 2 Balance de masa y energía

Los balances constan de tres entradas: combustible, aire a temperatura de referencia o ambiente y agua. Y de dos salidas: gases y vapor.

Para el balance de masa se plantean las siguientes ecuaciones:

$$m_{cble} + m_{aire} = m_{gases}$$

$$m_{vapor} = m_{agua}$$

Para el balance de energía la ecuación será la siguiente:

$$m_{cble} * PCI + m_{aire} * cp_{aire} * T_{ref} = m_{vapor} * (h_{vapor} - h_{agua}) + m_{gases} * cp_{gases} * T_{gases} + P$$

Siendo, PCI el poder calorífico superior del combustible utilizado, cp_{aire} el calor específico del aire a la temperatura de entrada, h_{vapor} h_{agua} las entalpías del vapor y el agua a sus respectivas temperaturas, cp_{gases} el calor específico del aire a la temperatura de salida de los gases y P las pérdidas.

Existen dos métodos distintos de calcular el rendimiento de la caldera, el método directo y el método indirecto:

2.2.1 Método directo

En este método el rendimiento se calcula como la división entre la cantidad de vapor sobrecalentado que se genera entre la cantidad total de calor generada por el combustible:

$$\eta = \frac{m_v * (h_{vapor} - h_{agua})}{m_{gases} * PCI}$$

2.2.2 Método indirecto

En este método el rendimiento de la caldera es calculado a partir de todas las pérdidas de la caldera, calculándose como:

$$\eta = 100 - P_{totales}$$

Se definen las pérdidas totales de la caldera como la suma de las siguientes pérdidas:

2.2.2.1 Pérdidas por inquemados sólidos

Durante el proceso de combustión, no todo el combustible se quema totalmente y se produce un residuo en forma de cenizas que contiene partículas de carbono no quemadas:

$$P_{IS} = 8100 * 4.178 * Cr \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

2.2.2.2 Pérdidas por inquemados gaseosos

Surgen a causa de la combustión incompleta del carbono, dando lugar a altas concentraciones de CO el mayor indicador de mala combustión:

$$P_{IG} = 5600 * 4.178 * b \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

2.2.2.3 Pérdidas por los gases secos

La alta temperatura de salida de los gases provoca una pérdida de energía en forma de calor:

$$P_{GS} = n_{gs} * c_{pgs} * (T_g - T_{ref}) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

2.2.2.4 Pérdidas por los gases húmedos

El vapor de agua contenido en los gases de escape libera energía en forma de calor a causa de enfriarse y condensarse:

$$P_{H_2O} = n_{H_2O} * c_{pH_2O} * (T_g - T_{ref}) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

2.2.2.5 Pérdidas convectivo-radiantes

El calor es transferido al ambiente a través de las paredes de la caldera en forma de radiación y convección:

$$P_{CR} = U * A * m_{cble} * (T_g - T_{ref}) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

3 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

En este proyecto se plantea un estudio paramétrico de la eficiencia de una caldera mediante la resolución de un ejercicio basado en el ejercicio 2 de la colección de problemas de Generación de Energía Técnica del Máster de industriales [1].

Se llevará a cabo un estudio del rendimiento y las pérdidas de los gases de una caldera de vapor que produce 1.1 kg/s de vapor saturado a 170°C a partir de agua a 20°C donde no existe carbono sin reaccionar ($CR^*=0$). La composición del combustible, la temperatura de salida de los gases, volumen parcial de CO_2 y O_2 y pérdidas por transmisión son las variables paramétricas del problema.

3.1 Variables del problema

3.1.1 Tipo de combustible

En la resolución de este problema se estudiará la influencia de cinco combustibles distintos, dos líquidos (Fueloil 1 y 2) y tres gaseosos cuya composición y características necesarias se recogen en la siguiente tabla:

Combustible	Composición en base húmeda (%)							PCI (kcal/kg)
	C	H	S	O	N	W	P	
Fueloil 1	84,6	9,7	2,7	0	1	1,5	0,5	9600
Fueloil 2	83,7	9,2	3,6	0	1	2	0,5	9400
Gasoleo C	86	11,1	0,8	0	1	1	0,1	10300
Gas Natural	72,8	22,7	0	0	4,5	0	0	11205
Propano	80,8	17,9	0	0	1,3	0	0	11189

Tabla 1 Tipos de combustibles

3.1.2 Temperatura de los gases

Se establece un rango de temperatura de los gases de 150°C a 350°C, dentro del mismo se estudiarán 30 puntos, siendo las temperaturas de estudio las establecidas en la Tabla 2:

Punto	Temperatura [°C]
1	150
2	156,9
3	163,8
4	170,7

5	177,6
6	184,5
7	191,4
8	198,3
9	205,2
10	212,1
11	219
12	225,9
13	232,8
14	239,7
15	246,6
16	253,4
17	260,3
18	267,2
19	274,1
20	281
21	287,9
22	294,8
23	301,7
24	308,6
25	315,5
26	322,4
27	329,3
28	336,2
29	343,1
30	350

Tabla 2 Variación de temperatura de los gases

Dado que en la resolución del problema se necesitará el calor específico de los gases y el calor específico del agua para cada una de las temperaturas de estudio. Se ha decidido que se utilizaran los calores específicos molares medios recogidos en las Tablas de Generación [2]. El calor específico de los gases se estima igual al calor específico del aire, así mismo, interpolando en los valores de las tablas y gráficas de generación se recaban los siguientes datos:

Punto	C_p gases [kJ/kmol °C]	C_p H ₂ O [kJ/kmol °C]
1	29,08	33,94
2	29,09	33,96
3	29,1	33,98
4	29,11	34,01
5	29,12	34,04
6	29,12	34,07
7	29,13	34,08
8	29,14	34,11
9	29,15	34,15
10	29,16	34,17
11	29,17	34,2
12	29,18	34,23
13	29,19	34,26
14	29,2	34,28
15	29,21	34,32
16	29,23	34,35
17	29,23	34,38
18	29,25	34,4
19	29,26	34,44
20	29,27	34,47
21	29,28	34,5
22	29,29	34,52

23	29,3	34,56
24	29,32	34,59
25	29,33	34,62
26	29,35	34,66
27	29,36	34,7
28	29,37	34,73
29	29,39	34,76
30	29,41	34,8

Tabla 3 Calores específicos de los gases

3.1.3 Volumen de CO₂ y O₂

Con ayuda de los diagramas de Ostwald de cada combustible [3] se han determinado de los rangos de variación del volumen parcial de CO₂ y O₂ con el objetivo de asegurar que la zona en la que se trabaja es válida.

Se ha escogido un área de trabajo amplia para estudiar el comportamiento del rendimiento y las pérdidas fuera de los valores normales de trabajo.

3.1.3.1 Fueloil 1

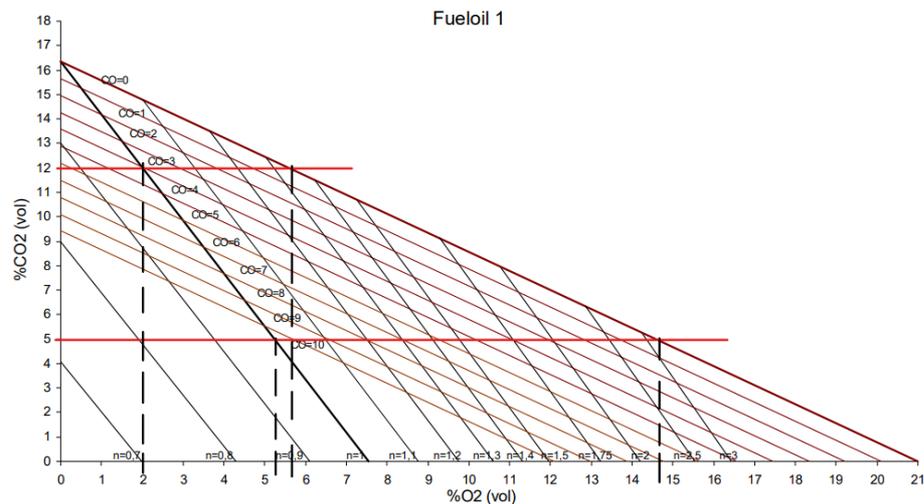


Ilustración 3 Diagrama de Ostwald Fueloil 1

Como se puede observar en la Ilustración 3, el área de estudio será la delimitada por las líneas rojas y la línea $n=1$.

Para el VCO₂ se escogen 12 puntos de estudio entre el 5% y el 12%, siendo estos los recogidos en la Tabla 4.

En la Ilustración 3 se puede visualizar que, para mantenernos dentro del área delimitada, los valores de VO₂ dependen de los valores de VCO₂, por lo que hay un rango de variación VO₂ distinto para cada valor de VCO₂.

Se establecen mediante el gráfico los valores de VO₂ para VCO₂=12% (VO₂=2% y VO₂=5%) y VCO₂=5% (VO₂=5,5% y VO₂=14,5%) que aseguran trabajar dentro del área delimitada. Mediante la unión de estos puntos se obtienen las ecuaciones de las rectas que delimitan el área de trabajo a la izquierda y derecha.

$$\frac{VO_2(x) - 0.02}{0.05 - 0.02} = \frac{VCO_2(x) - 0.12}{0.05 - 0.12}$$

$$\frac{VO_2(y) - 0.055}{0.145 - 0.055} = \frac{VCO_2(y) - 0.12}{0.05 - 0.12}$$

Con estas ecuaciones se puede obtener el primer y último valor del rango de VO₂ para cada valor de VCO₂, recogidos en la Tabla 4 Valores de variación de VCO₂ y VO₂ para Fueloil 1.

VCO ₂	VO ₂											
5	5	5,864	6,727	7,591	8,455	9,318	10,18	11,05	11,91	12,77	13,64	14,5
5,636	5,182	5,955	6,727	7,5	8,272	9,045	9,817	10,59	11,36	12,13	12,91	13,68
6,273	4,864	5,591	6,318	7,045	7,772	8,499	9,225	9,952	10,68	11,41	12,13	12,86
6,909	4,545	5,227	5,91	6,592	7,274	7,956	8,639	9,321	10	10,69	11,37	12,05
7,545	4,227	4,864	5,5	6,137	6,774	7,41	8,047	8,683	9,32	9,957	10,59	11,23
8,182	3,909	4,5	5,091	5,682	6,273	6,864	7,455	8,046	8,637	9,228	9,819	10,41
8,818	3,591	4,136	4,682	5,227	5,773	6,318	6,864	7,409	7,955	8,5	9,046	9,591
9,455	3,273	3,773	4,273	4,773	5,273	5,773	6,273	6,773	7,273	7,773	8,273	8,773
10,09	2,955	3,41	3,864	4,319	4,773	5,228	5,682	6,137	6,591	7,046	7,5	7,955
10,73	2,636	3,045	3,454	3,863	4,272	4,681	5,091	5,5	5,909	6,318	6,727	7,136
11,36	2,318	2,682	3,045	3,409	3,773	4,136	4,5	4,863	5,227	5,591	5,954	6,318
12	2	2,318	2,636	2,955	3,273	3,591	3,909	4,227	4,545	4,864	5,182	5,5

Tabla 4 Valores de variación de VCO₂ y VO₂ para Fueloil 1

3.1.3.2 Fueloil 2

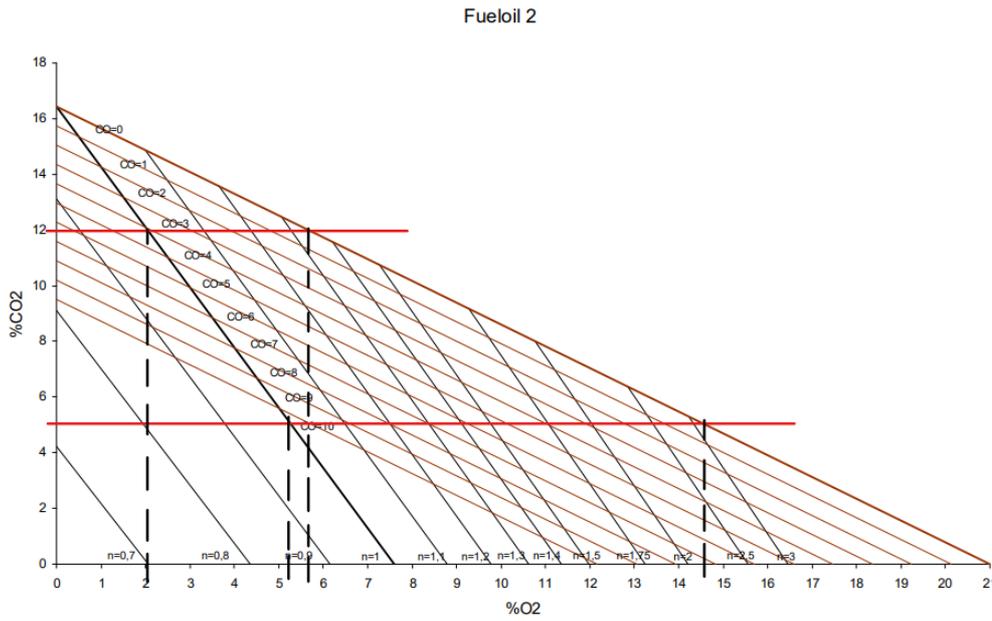


Ilustración 4 Diagrama de Ostwald Fueloil 2

Análogamente a lo realizado anteriormente, como se puede observar en la Ilustración 4, el área de estudio será la delimitada por las líneas rojas y la línea n=1.

Para el VCO₂ se escogen 12 puntos de estudio entre el 5% y el 12%, siendo estos los recogidos en la Tabla 5.

En la Ilustración 4 se puede visualizar que, para mantenernos dentro del área delimitada, los valores de VO₂ dependen de los valores de VCO₂, por lo que hay un rango de variación VO₂ distinto para cada valor de VCO₂.

Se establecen mediante el gráfico los valores de VO₂ para VCO₂=12% (VO₂=2,3% y VO₂=5,5%) y VCO₂=5% (VO₂=5,5% y VO₂=14,5%) que aseguran trabajar dentro del área delimitada. Mediante la unión de estos puntos se obtienen las ecuaciones de las rectas que delimitan el área de trabajo a la izquierda y derecha.

$$\frac{VO_2(x) - 0.023}{0.055 - 0.023} = \frac{VCO_2(x) - 0.12}{0.05 - 0.12}$$

$$\frac{VO_2(y) - 0.055}{0.145 - 0.055} = \frac{VCO_2(y) - 0.12}{0.05 - 0.12}$$

Con estas ecuaciones se puede obtener el primer y último valor del rango de VO₂ para cada valor de VCO₂, recogidos en la Tabla 5:

VCO2	VO2											
5	5,5	6,318	7,136	7,955	8,773	9,591	10,41	11,23	12,05	12,86	13,68	14,5
5,636	5,209	5,979	6,749	7,519	8,289	9,059	9,83	10,6	11,37	12,14	12,91	13,68
6,273	4,918	5,64	6,362	7,084	7,806	8,528	9,25	9,972	10,69	11,42	12,14	12,86

6,909	4,627	5,302	5,977	6,651	7,326	8,001	8,676	9,351	10,03	10,7	11,38	12,05
7,545	4,336	4,963	5,589	6,216	6,843	7,47	8,096	8,723	9,35	9,977	10,6	11,23
8,182	4,045	4,624	5,202	5,781	6,36	6,938	7,517	8,095	8,674	9,253	9,831	10,41
8,818	3,755	4,286	4,816	5,347	5,877	6,408	6,938	7,469	7,999	8,53	9,06	9,591
9,455	3,464	3,947	4,429	4,912	5,395	5,877	6,36	6,842	7,325	7,808	8,29	8,773
10,09	3,173	3,608	4,042	4,477	4,912	5,347	5,781	6,216	6,651	7,086	7,52	7,955
10,73	2,882	3,269	3,655	4,042	4,429	4,816	5,202	5,589	5,976	6,363	6,749	7,136
11,36	2,591	2,93	3,269	3,607	3,946	4,285	4,624	4,963	5,302	5,64	5,979	6,318
12	2,3	2,591	2,882	3,173	3,464	3,755	4,045	4,336	4,627	4,918	5,209	5,5

Tabla 5 Valores de variación de VCO₂ y VO₂ para Fueloil 2

3.1.3.3 Gasoleo C

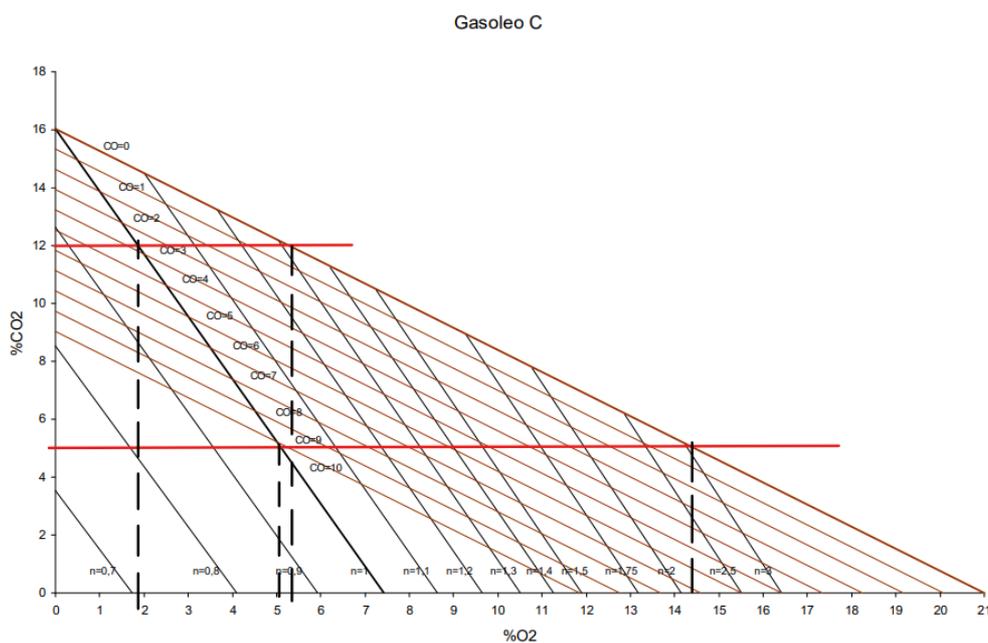


Ilustración 5 Diagrama de Ostwald Gasóleo C

En la Ilustración 5 se observa que el área de estudio será la delimitada por las líneas rojas y la línea $n=1$.

Para el VCO₂ se escogen 12 puntos de estudio entre el 5% y el 12%, siendo estos los recogidos en la Tabla 6.

En la Ilustración 5 se puede visualizar que, para mantenernos dentro del área delimitada, los valores de VO₂ dependen de los valores de VCO₂, por lo que hay un rango de variación VO₂ distinto para cada valor de VCO₂.

Se establecen mediante el gráfico los valores de VO₂ para VCO₂=12% (VO₂=2% y VO₂=5,5%) y VCO₂=5% (VO₂=5,5% y VO₂=14%) que aseguran trabajar dentro del área delimitada. Mediante la unión de estos puntos se obtienen las ecuaciones de las rectas que delimitan el área de trabajo a la izquierda y derecha

$$\frac{VO_2(x) - 0.02}{0.055 - 0.02} = \frac{VCO_2(x) - 0.12}{0.05 - 0.12}$$

$$\frac{VO_2(y) - 0.055}{0.14 - 0.055} = \frac{VCO_2(y) - 0.12}{0.05 - 0.12}$$

Con estas ecuaciones se puede obtener el primer y último valor del rango de VO₂ para cada valor de VCO₂, recogidos en la Tabla 6.

VCO2	VO2											
5	5,5	6,273	7,045	7,818	8,591	9,364	10,14	10,91	11,68	12,45	13,23	14
5,636	5,182	5,914	6,645	7,377	8,109	8,84	9,572	10,3	11,04	11,77	12,5	13,23
6,273	4,864	5,554	6,243	6,933	7,623	8,312	9,002	9,691	10,38	11,07	11,76	12,45
6,909	4,545	5,194	5,842	6,491	7,14	7,788	8,437	9,085	9,734	10,38	11,03	11,68
7,545	4,227	4,835	5,442	6,05	6,657	7,265	7,872	8,48	9,087	9,695	10,3	10,91
8,182	3,909	4,475	5,042	5,608	6,175	6,741	7,308	7,874	8,441	9,007	9,574	10,14
8,818	3,591	4,116	4,641	5,165	5,69	6,215	6,74	7,265	7,79	8,314	8,839	9,364
9,455	3,273	3,756	4,24	4,723	5,207	5,69	6,174	6,657	7,141	7,624	8,108	8,591
10,09	2,955	3,397	3,839	4,281	4,723	5,165	5,608	6,05	6,492	6,934	7,376	7,818
10,73	2,636	3,037	3,438	3,838	4,239	4,64	5,041	5,442	5,843	6,243	6,644	7,045
11,36	2,318	2,678	3,037	3,397	3,756	4,116	4,475	4,835	5,194	5,554	5,913	6,273
12	2	2,318	2,636	2,955	3,273	3,591	3,909	4,227	4,545	4,864	5,182	5,5

Tabla 6 Valores de variación de VCO₂ y VO₂ para Gasóleo C

3.1.3.4 Gas Natural

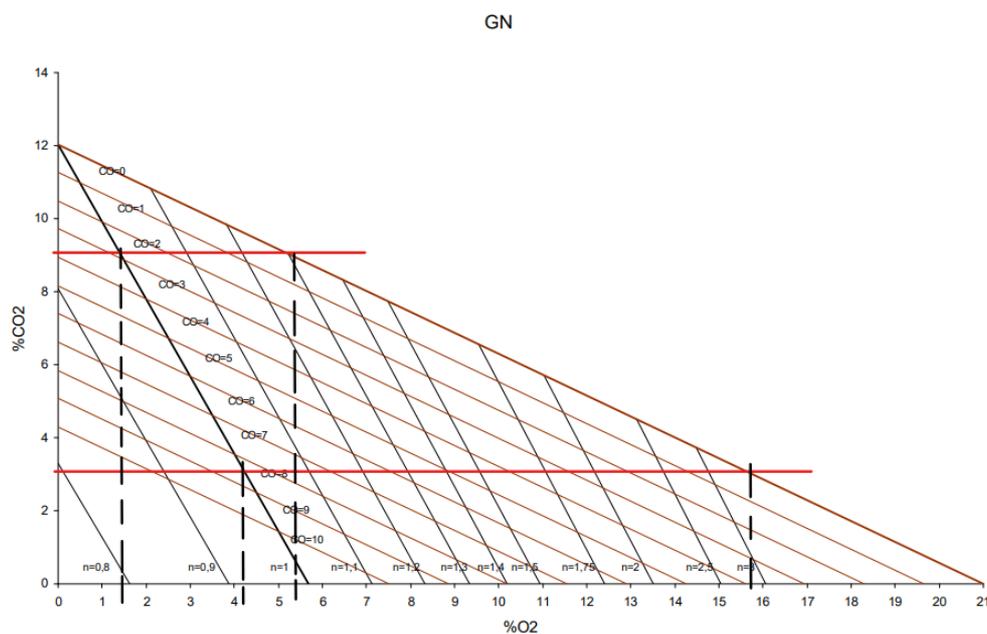


Ilustración 6 Diagrama de Ostwald Gas Natural

Como se puede observar en la Ilustración 6, el área de estudio será la delimitada por las líneas rojas y la línea $n=1$.

Para el VCO_2 se escogen 12 puntos de estudio entre el 3% y el 9%, siendo estos los recogidos en la Tabla 7:

En la Diagrama de Ostwald Gas Natural se puede visualizar que, para mantenernos dentro del área delimitada, los valores de VO_2 dependen de los valores de VCO_2 , por lo que hay un rango de variación VO_2 distinto para cada valor de VCO_2 .

Se establecen mediante el gráfico los valores de VO_2 para $VCO_2=9\%$ ($VO_2=1,5\%$ y $VO_2=5\%$) y $VCO_2=3\%$ ($VO_2=4,5\%$ y $VO_2=15,5\%$) que aseguran trabajar dentro del área delimitada. Mediante la unión de estos puntos se obtienen las ecuaciones de las rectas que delimitan el área de trabajo a la izquierda y derecha.

$$\frac{VO_2(x) - 0.015}{0.05 - 0.015} = \frac{VCO_2(x) - 0.09}{0.03 - 0.09}$$

$$\frac{VO_2(y) - 0.045}{0.155 - 0.045} = \frac{VCO_2(y) - 0.09}{0.03 - 0.09}$$

Con estas ecuaciones se puede obtener el primer y último valor del rango de VO_2 para cada valor de VCO_2 , recogidos en la Tabla 7.

VCO2	VO2											
3	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5
3,545	4,227	5,165	6,104	7,042	7,981	8,919	9,858	10,8	11,73	12,67	13,61	14,55
4,091	3,955	4,831	5,707	6,583	7,459	8,335	9,21	10,09	10,96	11,84	12,71	13,59

4,636	3,682	4,496	5,311	6,125	6,939	7,754	8,568	9,383	10,2	11,01	11,83	12,64
5,182	3,409	4,161	4,913	5,665	6,417	7,169	7,92	8,672	9,424	10,18	10,93	11,68
5,727	3,136	3,826	4,517	5,207	5,897	6,588	7,278	7,969	8,659	9,349	10,04	10,73
6,273	2,864	3,492	4,12	4,748	5,376	6,004	6,633	7,261	7,889	8,517	9,145	9,773
6,818	2,591	3,157	3,723	4,289	4,855	5,421	5,988	6,554	7,12	7,686	8,252	8,818
7,364	2,318	2,822	3,326	3,831	4,335	4,839	5,343	5,847	6,351	6,856	7,36	7,864
7,909	2,045	2,487	2,929	3,372	3,814	4,256	4,698	5,14	5,582	6,025	6,467	6,909
8,455	1,773	2,153	2,533	2,914	3,294	3,674	4,054	4,434	4,814	5,195	5,575	5,955
9	1,5	1,818	2,136	2,455	2,773	3,091	3,409	3,727	4,045	4,364	4,682	5

Tabla 7 Valores de variación de VCO₂ y VO₂ para Gas Natural

3.1.3.5 Propano

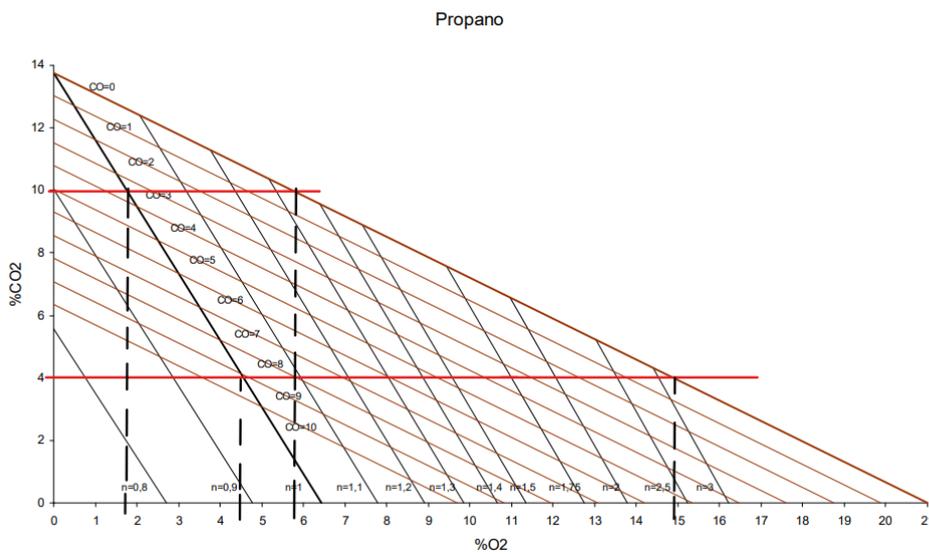


Ilustración 7 Diagrama de Ostwald Propano

Como se puede observar en la Ilustración 7, el área de estudio será la delimitada por las líneas rojas y la línea n=1.

Para el VCO₂ se escogen 12 puntos de estudio entre el 4% y el 10%, siendo estos los recogidos en la Tabla 8.

En la Ilustración 7 se puede visualizar que, para mantenernos dentro del área delimitada, los valores de VO₂ dependen de los valores de VCO₂, por lo que hay un rango de variación VO₂ distinto para cada valor de VCO₂.

Se establecen mediante el gráfico los valores de VO₂ para VCO₂=10% (VO₂=2% y VO₂=5,5%) y VCO₂=4% (VO₂=5% y VO₂=14,5%) que aseguran trabajar dentro del área delimitada. Mediante la unión de estos puntos se obtienen las ecuaciones de las rectas que delimitan el área de trabajo a la izquierda y derecha.

$$\frac{VO_2(x) - 0.02}{0.055 - 0.02} = \frac{VCO_2(x) - 0.1}{0.04 - 0.1}$$

$$\frac{VO_2(y) - 0.05}{0.145 - 0.05} = \frac{VCO_2(y) - 0.04}{0.04 - 0.1}$$

Con estas ecuaciones se puede obtener el primer y último valor del rango de VO₂ para cada valor de VCO₂, recogidos en la Tabla 8

VCO2	VO2											
4	5	5,864	6,727	7,591	8,455	9,318	10,18	11,05	11,91	12,77	13,64	14,5
4,545	4,727	5,541	6,355	7,169	7,983	8,797	9,61	10,42	11,24	12,05	12,87	13,68
5,091	4,455	5,219	5,983	6,747	7,511	8,275	9,04	9,804	10,57	11,33	12,1	12,86
5,636	4,182	4,897	5,613	6,328	7,043	7,758	8,474	9,189	9,904	10,62	11,33	12,05
6,182	3,909	4,575	5,24	5,906	6,571	7,237	7,902	8,568	9,233	9,899	10,56	11,23
6,727	3,636	4,252	4,868	5,483	6,099	6,715	7,331	7,947	8,563	9,178	9,794	10,41
7,273	3,364	3,93	4,496	5,062	5,628	6,194	6,761	7,327	7,893	8,459	9,025	9,591
7,818	3,091	3,608	4,124	4,641	5,157	5,674	6,19	6,707	7,223	7,74	8,256	8,773
8,364	2,818	3,285	3,752	4,219	4,686	5,153	5,62	6,087	6,554	7,021	7,488	7,955
8,909	2,545	2,962	3,38	3,797	4,214	4,632	5,049	5,467	5,884	6,301	6,719	7,136
9,455	2,273	2,641	3,008	3,376	3,744	4,112	4,479	4,847	5,215	5,583	5,95	6,318
10	2	2,318	2,636	2,955	3,273	3,591	3,909	4,227	4,545	4,864	5,182	5,5

Tabla 8 Valores de variación de VCO₂ y VO₂ para Propano

3.1.4 Pérdidas por transmisión

Las pérdidas por transmisión se plantean como un porcentaje del calor transferido que variará del 0% al 50%, dentro de este rango se cogen 12 puntos, siendo los valores de estudio los siguientes:

Punto	PCR (%)
1	0
2	4,545
3	9,091
4	13,64
5	18,18
6	22,73
7	27,27
8	31,82
9	36,36
10	40,91
11	45,45
12	50

Tabla 9 Variación pérdidas por transmisión

4 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se va a describir la resolución del problema planteado en el apartado anterior. Para esta resolución se ha hecho uso del programa informático EES (Engineering Equation Solver) que ha facilitado el proceso iterativo llevado a cabo y se ha planteado un sistema de ecuaciones de masa y energéticas con las bases de lo repasado el apartado 2.2.

4.1 Ecuaciones utilizadas

4.1.1 Balance de masa

Para la resolución del balance de masa se han utilizado las siguientes ecuaciones:

$$C' = C * (1 - W)$$

$$H' = H * (1 - W)$$

$$O' = O * (1 - W)$$

$$P' = P * (1 - W)$$

$$S' = S * (1 - W)$$

$$N' = N * (1 - W)$$

$$W' = W + \frac{9}{8} * O'$$

$$Hd = H' - \frac{O'}{8}$$

$$C' = a + b + Cr$$

$$V_{CO2} = \frac{a}{ngs}$$

$$V_{O2} = \frac{(n - 1) * O_T + \frac{b}{12} + \frac{Cr}{12}}{ngs}$$

$$Cr = P' * \frac{Cr'}{1 - Cr'}$$

$$O_T = \frac{C'}{12} + \frac{Hd}{4} + \frac{S'}{32}$$

$$ngs = \frac{a}{12} + \frac{b}{12} + \frac{S'}{32} + (n - 1) * O_T + \frac{b}{12} + \frac{79}{21} * n * O_T + \frac{N'}{14}$$

C, H, O, P, S, N: Porcentaje en base seca de cada componente de cada combustible.

C', H', O', P', S', N': Porcentaje en base húmeda de cada componente de cada combustible.

a: kilogramos de carbono en humo de CO₂ por kilogramos de combustible.

b: kilogramos de carbono en humo de CO por kilogramos de combustibles

Cr: kilogramos de carbono en residuo por kilogramo de combustible

Cr': kilogramos de carbono sin quemar

P': kilogramos de cenizas

V_{CO2}: volumen parcial de CO₂ presente en los humos, kmol/kg cble

V_{O2}: volumen parcial de O₂ presente en los humos, kmol/kg cble

ngs: Volumen de humos secos, kmol/kg cble

O_T: Oxígeno teórico para la combustión completa, kg O₂/ kg cble

n: coeficiente de exceso de aire introducido

4.1.2 Balance de energía

$$Q_T = \dot{m}_v * (h(T_v, P_{amb}) - h(T_w, P_{amb}))$$

$$Q_{INTRO} = \dot{m}_{cble} * PCI$$

$$Q_{INTRO} = Q_T + Q_G + Pérdidas$$

$$Q_G = (ngs * c_{pgases} + n_{H_2O} * c_{pH_2O}) * (T_{gases} - T_{ref}) * \dot{m}_{cble}$$

$$Pérdidas = P_{CR} * Q_T + \dot{m}_{cble} * (P_{IG} + P_{IS})$$

$$P_{IS} = 8100 * 4.178 * Cr$$

$$P_{IG} = 5600 * 4.178 * b$$

$$\eta_{caldera} = \frac{Q_T}{Q_{INTRO}} * 100$$

Q_T: Calor transferido, kJ

\dot{m}_v : Gasto másico de vapor, kg/s

h(T_v, P_{amb}): entalpía a la temperatura del vapor y a presión ambiente, kJ/kg

h(T_w, P_{amb}): entalpía a la temperatura del agua y a presión ambiente, kJ/kg

Q_{INTRO}: Calor introducido, kJ

\dot{m}_{cble} : Gasto másico de combustible, kg/s

PCI: Poder calorífico inferior del combustible, kJ/kg

Q_G: Calor de los gases, kJ

Pérdidas: Sumatorio de las pérdidas de la caldera, kJ

c_{pgases}: calor específico molar medio de los gases a la temperatura de los gases de salida, kJ/kmol°C

$c_{\text{H}_2\text{O}}$: calor específico molar medio del agua a la temperatura de los gases de salida, kJ/kmol°C

T_{gases} : temperatura de los gases de salida, °C

T_{ref} : Temperatura de referencia, °C

P_{CR} : Pérdidas por transmisión, como porcentaje del calor útil.

P_{IS} : Pérdidas por inquemados sólidos, kJ/kg

P_{IG} : Pérdidas por inquemados gaseosos, kJ/kg

η_{caldera} : rendimiento de la caldera, porcentaje

4.2 Proceso iterativo

Para completar el estudio paramétrico se ha tenido que llevar a cabo la resolución de un proceso iterativo con las variables descritas en el apartado 3.1 con ayuda del programa Engineering Equation Solver (EES) programa que calcula la solución de problemas con multitud de ecuaciones algebraicas.

Dado que el objetivo principal de este trabajo es el estudio del rendimiento de la caldera, se ha resuelto el problema centrándose en esta variable de la siguiente manera:

Primero se han creado diferentes archivos para cada combustible, teniendo un total de cinco archivos. En cada uno de ellos se han escrito las ecuaciones expuestas en el apartado 4.1, dejando como incógnita las variables temperatura de los gases (incluye los calores específicos ya que dependen de dicha temperatura) y las pérdidas por transmisión.

Tras ello se ha hecho uso de la herramienta tabla paramétrica, se han creado 12 tablas diferentes cada una para un valor distinto de las pérdidas por transmisión (valores especificados en el apartado 3.1.4) y con 30 filas cada una para cada valor de las temperaturas de los gases con sus correspondientes calores específicos (valores especificados en el apartado 3.1.2).

Una vez creadas estas tablas, se ha introducido el primer valor de V_{CO_2} y se ha variado 12 veces V_{O_2} resolviendo las 12 tablas tal y como aparece en la Ilustración 8 se obtienen 360 valores de rendimiento de la caldera, esto se repite para los 12 valores de V_{CO_2} . Obteniéndose así 4320 valores de rendimiento de la caldera por combustible.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1..30	Tg	cpgs	cph2o	Pcr	Qgases	$\eta_{caldera}$					
Run 1	150	29,08	33,94	0	182,3	0,9193					
Run 2	156,9	29,09	33,96	0	193,1	0,9162					
Run 3	163,8	29,1	33,98	0	203,9	0,9131					
Run 4	170,7	29,11	34,01	0	214,9	0,9099					
Run 5	177,6	29,12	34,04	0	225,9	0,9068					
Run 6	184,5	29,12	34,07	0	236,9	0,9038					
Run 7	191,4	29,13	34,08	0	248,1	0,9006					
Run 8	198,3	29,14	34,11	0	259,4	0,8975					
Run 9	205,2	29,15	34,15	0	270,8	0,8944					
Run 10	212,1	29,16	34,17	0	282,2	0,8913					
Run 11	219	29,17	34,2	0	293,8	0,8882					
Run 12	225,9	29,18	34,23	0	305,4	0,8851					
Run 13	232,8	29,19	34,26	0	317,2	0,8819					
Run 14	239,7	29,2	34,28	0	329	0,8788					
Run 15	246,6	29,21	34,32	0	340,9	0,8757					
Run 16	253,4	29,23	34,35	0	353	0,8725					
Run 17	260,3	29,23	34,38	0	365	0,8694					
Run 18	267,2	29,25	34,4	0	377,3	0,8662					
Run 19	274,1	29,26	34,44	0	389,7	0,8631					
Run 20	281	29,27	34,47	0	402,1	0,8599					
Run 21	287,9	29,28	34,5	0	414,6	0,8568					
Run 22	294,8	29,29	34,52	0	427,2	0,8537					
Run 23	301,7	29,3	34,56	0	439,9	0,8505					
Run 24	308,6	29,32	34,59	0	452,9	0,8473					
Run 25	315,5	29,33	34,62	0	465,8	0,8442					
Run 26	322,4	29,35	34,66	0	479	0,841					
Run 27	329,3	29,36	34,7	0	492,2	0,8378					
Run 28	336,2	29,37	34,73	0	505,5	0,8346					
Run 29	343,1	29,39	34,76	0	519	0,8314					
Run 30	350	29,41	34,8	0	532,7	0,8282					

Ilustración 8 Tabla paramétrica EES Fueloil 1, Pcr=0, VCO2=0,05, VO2 =0,07591

El proceso descrito se repite cinco veces una para cada combustible, resultando en 21600 datos de rendimiento de caldera.

Todos estos datos han sido recogidos en archivos de Excel, uno para cada combustible. En una primera pestaña aparecen las características principales del combustible, diagrama de Ostwald y las variaciones de las variables. En una segunda pestaña se han recogido los datos necesarios para los escenarios planteados en los siguientes apartados. Y finalmente una pestaña para cada valor de VCO₂, en cada una de estas pestañas se recogen 12 tablas una para cada valor de VO₂ como en la Ilustración 9, en ellas de izquierda a derecha aumentan las pérdidas por transmisión y de arriba abajo aumenta la temperatura de los gases.

0,07591											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,6437	0,6158	0,5901	0,5665	0,5447	0,5245	0,5058	0,4884	0,4721	0,4568	0,4426	0,4292
0,6407	0,6128	0,5873	0,5638	0,5421	0,522	0,5034	0,486	0,4699	0,4547	0,4405	0,4271
0,6376	0,6099	0,5845	0,5611	0,5395	0,5195	0,501	0,4837	0,4676	0,4525	0,4384	0,4251
0,6346	0,607	0,5817	0,5584	0,537	0,517	0,4986	0,4814	0,4654	0,4503	0,4363	0,423
0,6315	0,6041	0,5789	0,5557	0,5344	0,5146	0,4962	0,4791	0,4631	0,4482	0,4342	0,421
0,6285	0,6011	0,5761	0,553	0,5318	0,5121	0,4938	0,4768	0,4609	0,446	0,4321	0,419
0,6254	0,5982	0,5733	0,5503	0,5292	0,5096	0,4914	0,4744	0,4586	0,4438	0,43	0,4169
0,6223	0,5953	0,5705	0,5476	0,5266	0,5071	0,489	0,4721	0,4564	0,4416	0,4279	0,4149
0,6193	0,5923	0,5676	0,5449	0,524	0,5046	0,4866	0,4698	0,4541	0,4395	0,4257	0,4128
0,6162	0,5894	0,5648	0,5422	0,5214	0,5021	0,4842	0,4674	0,4519	0,4373	0,4236	0,4108
0,6131	0,5864	0,562	0,5395	0,5188	0,4996	0,4817	0,4651	0,4496	0,4351	0,4215	0,4087
0,61	0,5835	0,5592	0,5368	0,5162	0,497	0,4793	0,4628	0,4474	0,4329	0,4194	0,4067
0,6069	0,5806	0,5564	0,5341	0,5136	0,4945	0,4769	0,4604	0,4451	0,4307	0,4173	0,4046
0,6039	0,5776	0,5535	0,5314	0,511	0,492	0,4745	0,4581	0,4428	0,4285	0,4152	0,4026
0,6008	0,5747	0,5507	0,5287	0,5084	0,4895	0,472	0,4557	0,4406	0,4263	0,413	0,4005
0,5976	0,5717	0,5478	0,5259	0,5057	0,487	0,4696	0,4534	0,4383	0,4241	0,4109	0,3984
0,5946	0,5687	0,545	0,5232	0,5031	0,4845	0,4672	0,4511	0,436	0,422	0,4088	0,3964
0,5915	0,5657	0,5422	0,5205	0,5005	0,4819	0,4647	0,4487	0,4338	0,4197	0,4066	0,3943
0,5884	0,5628	0,5393	0,5177	0,4979	0,4794	0,4623	0,4463	0,4315	0,4175	0,4045	0,3922
0,5853	0,5598	0,5365	0,515	0,4952	0,4769	0,4599	0,444	0,4292	0,4153	0,4024	0,3902
0,5822	0,5568	0,5336	0,5123	0,4926	0,4743	0,4574	0,4416	0,4269	0,4131	0,4002	0,3881
0,5791	0,5539	0,5308	0,5096	0,49	0,4718	0,455	0,4393	0,4247	0,4109	0,3981	0,386
0,5759	0,5509	0,528	0,5068	0,4873	0,4693	0,4525	0,4369	0,4224	0,4087	0,396	0,384
0,5728	0,5479	0,5251	0,504	0,4847	0,4667	0,4501	0,4345	0,4201	0,4065	0,3938	0,3819
0,5697	0,5449	0,5222	0,5013	0,482	0,4642	0,4476	0,4322	0,4178	0,4043	0,3917	0,3798
0,5665	0,5419	0,5193	0,4985	0,4794	0,4616	0,4451	0,4298	0,4155	0,402	0,3895	0,3777
0,5634	0,5389	0,5165	0,4958	0,4767	0,4591	0,4427	0,4274	0,4132	0,3998	0,3874	0,3756
0,5603	0,5359	0,5136	0,493	0,4741	0,4565	0,4402	0,425	0,4109	0,3976	0,3852	0,3735
0,5571	0,5329	0,5107	0,4902	0,4714	0,4539	0,4377	0,4226	0,4086	0,3954	0,383	0,3714
0,5539	0,5299	0,5078	0,4874	0,4687	0,4513	0,4352	0,4202	0,4062	0,3931	0,3808	0,3693

Ilustración 9 Tabla de Excel de recogida de datos de rendimiento para $VCO_2=0,05$, $VO_2=0,07591$

Una vez con estos datos recogidos y haciendo uso de los archivos creados anteriormente se han calculado las pérdidas de los gases de combustión únicamente para cuatro escenarios que serán descritos en los siguientes apartados, toda esta información es recogida en una pestaña denominada “Pérdidas” incluida en cada uno de los cinco archivos de Excel para cada combustible. El volumen de los datos obtenidos asciende a 1836 valores por combustible, es decir, un total de 9180 valores.

Por último, se han recogido los valores de calor introducido, masa de combustible y pérdidas por inquemados gaseosos para la representación de los diagramas de Sankey del siguiente apartado mediante el uso de la página web SankeyMATIC, dando lugar a 234 valores adicionales.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la información recogida en el apartado anterior, se plantean diferentes escenarios para el análisis de los datos obtenidos mediante la representación gráfica de los mismos.

Se representarán tres gráficos, rendimiento, pérdidas por los gases de escape y diagrama de Sankey.

En diagrama de Sankey es una representación gráfica que permitirá observar el flujo de energía a través del sistema de estudio. Una buena representación permite una fácil comprensión de cómo se utiliza el flujo de energía del sistema.

5.1 Escenario 1

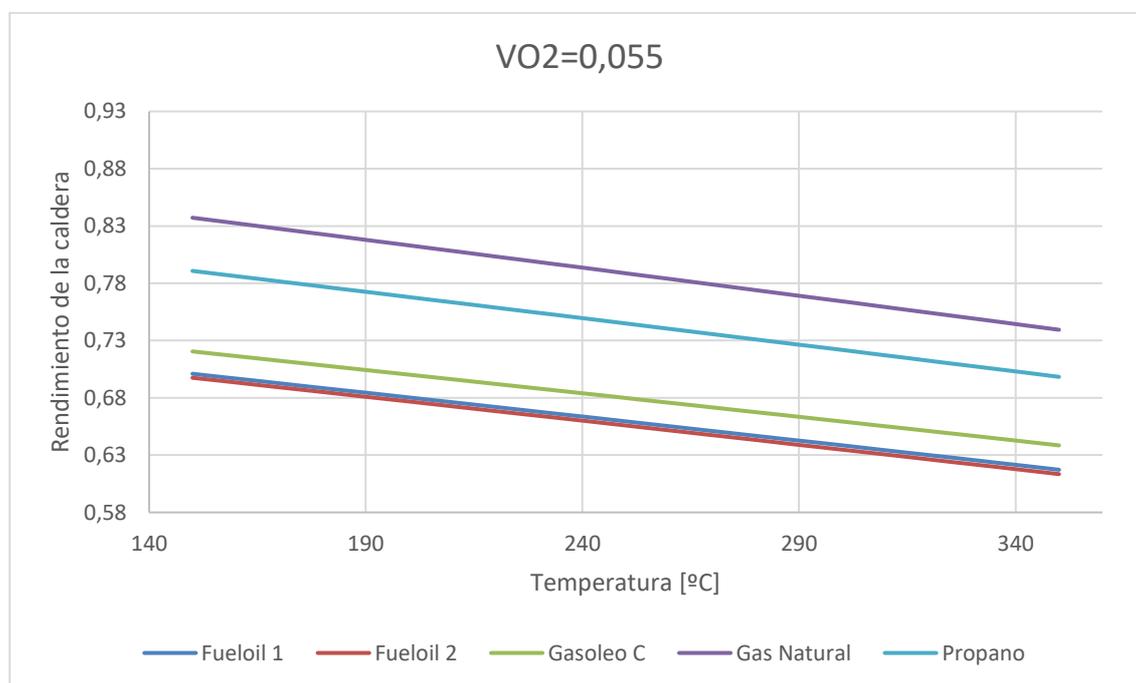
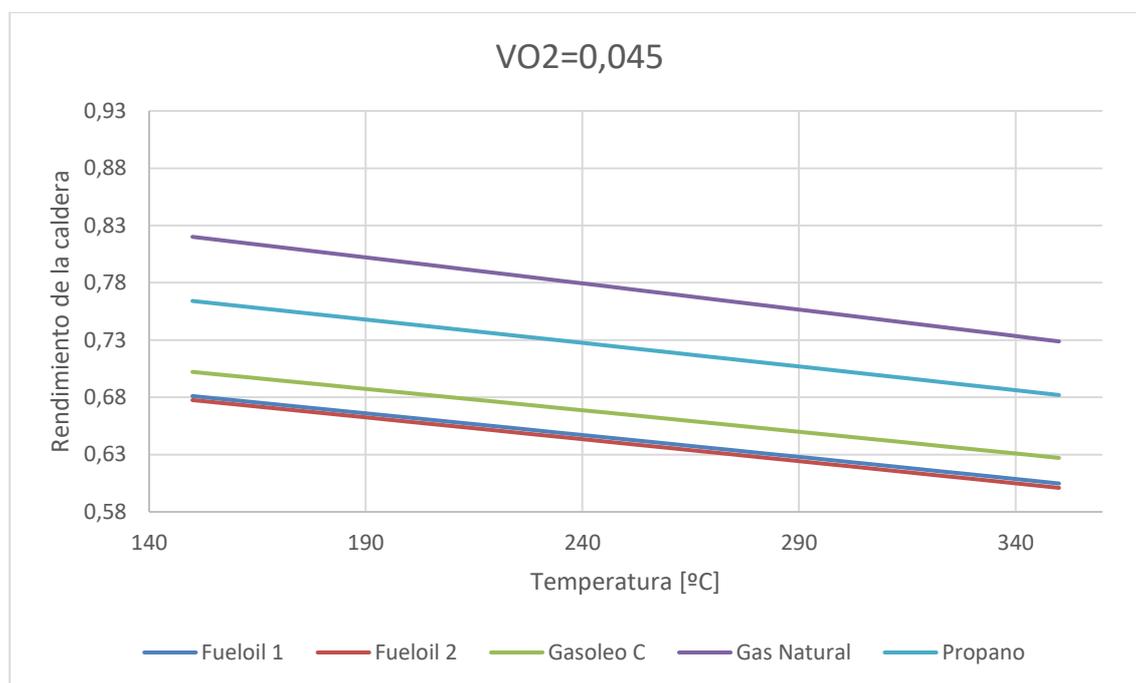
En el primer escenario se ha decidido estudiar la influencia de la temperatura de los gases.

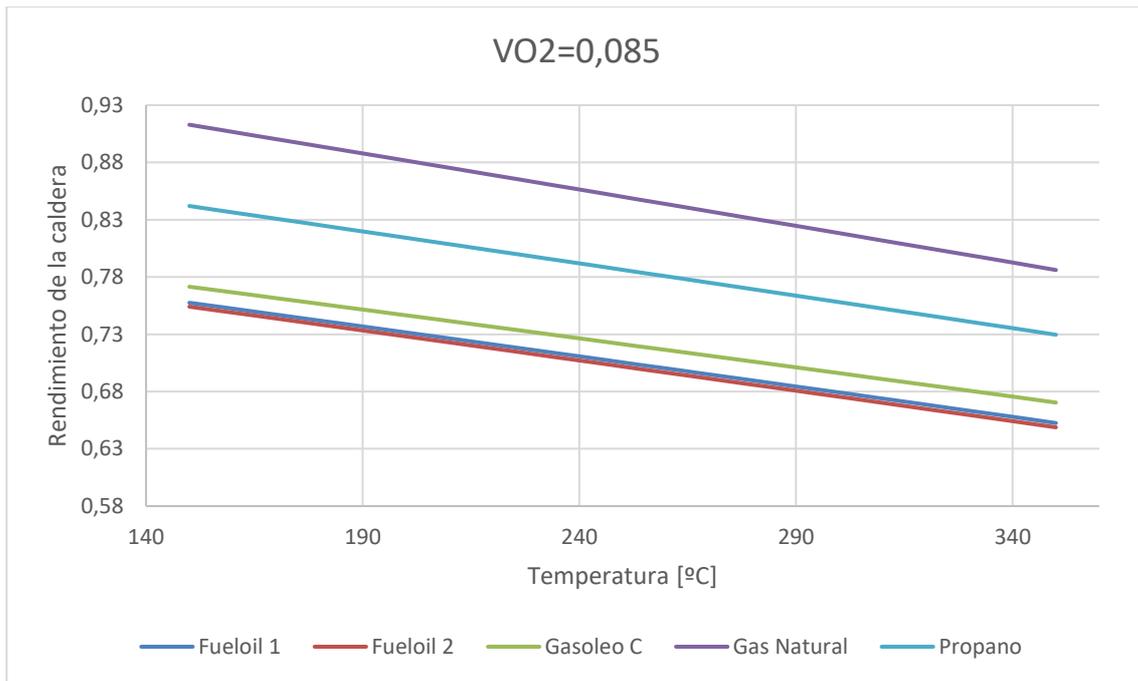
Para ello se han hecho 2 tríos de gráficas, rendimiento y pérdidas por los gases de la caldera en ellas se representan los cinco combustibles estudiados, además se ha representado el diagrama de Sankey de uno de los combustibles.

En todas las gráficas se ha establecido que las pérdidas por transmisión sean cero, además se han escogido valores próximos de V_{CO_2} y VO_2 presentes en todos los rangos de variación de los combustibles. Las temperaturas variarán en todo el rango definido en el apartado 3.1.2. En la siguiente tabla se recogen los valores usados:

Combustible	Gráfica 1		Gráfica 2		Gráfica 3	
	V_{CO_2} [%]	VO_2 [%]	V_{CO_2} [%]	VO_2 [%]	V_{CO_2} [%]	VO_2 [%]
Fueloil 1	6,909	4,545	6,909	5,91	6,909	8,639
Fueloil 2	6,909	4,627	6,909	5,977	6,909	8,676
Gasoleo C	6,909	4,545	6,909	5,842	6,909	8,437
Gas Natural	6,818	4,289	6,818	5,421	6,818	8,818
Propano	6,727	4,252	6,727	6,099	6,727	8,563

- Estudio y representación del rendimiento de la caldera





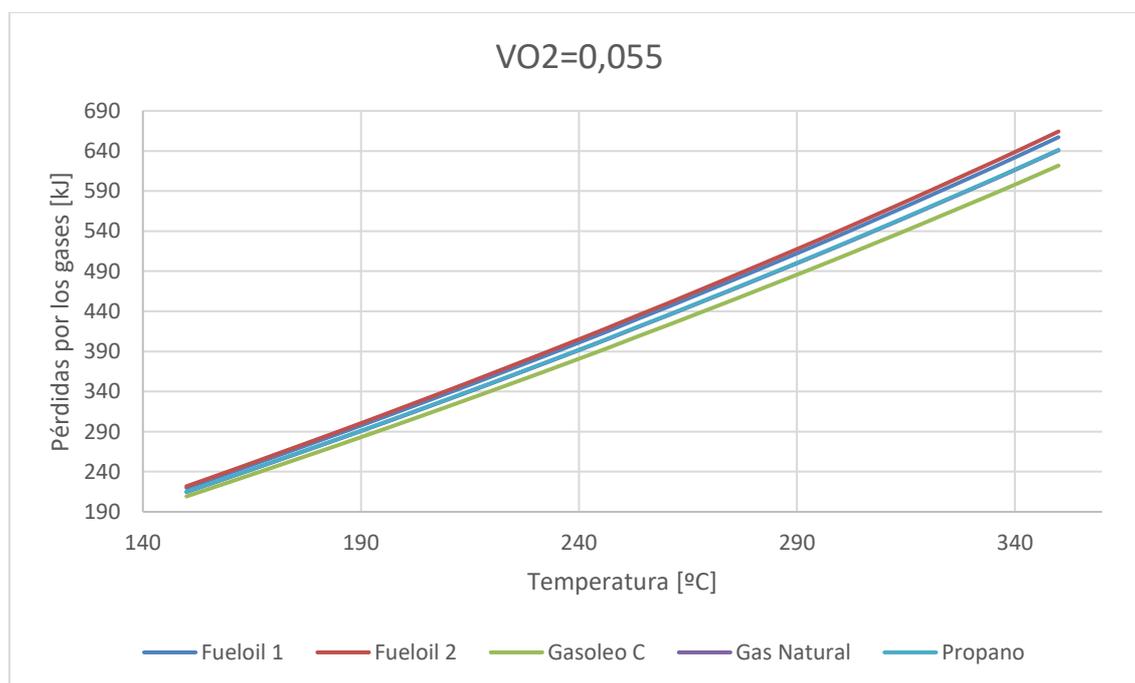
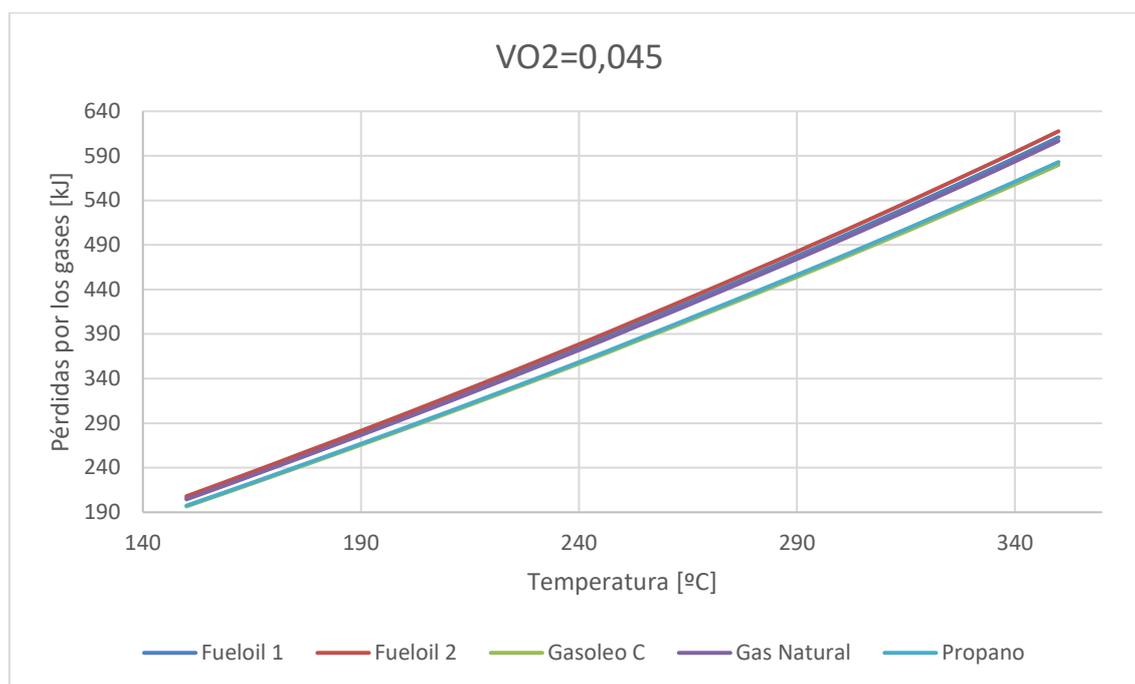
Como podemos observar en este conjunto de gráficas el rendimiento de la caldera va disminuyendo de manera lineal con el aumento de la temperatura.

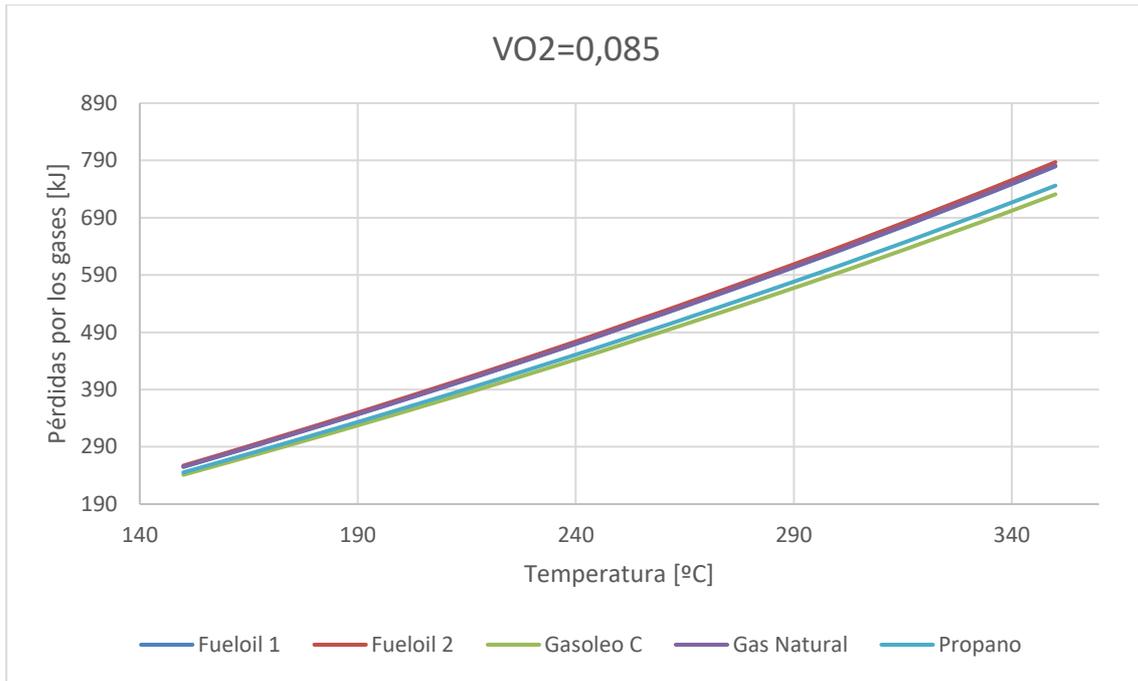
Entendiendo que el rendimiento de una caldera se define como su capacidad de transformar calor de la combustión en calor útil, podríamos pensar que tendría que causar el efecto contrario, sin embargo, tal y como hemos estudiado en los primeros apartados aparecen las pérdidas por los gases de escape.

Las pérdidas por los gases de escape se ven agravadas a raíz del aumento de temperatura ya que los gases retienen mas energía térmica, esta pérdida de energía afecta el calor útil total de la caldera.

Por tanto, al elegir los parámetros de las calderas hay que tener en cuenta la temperatura de trabajo no sobre pasando el límite en el que las pérdidas por los gases disminuyan el rendimiento de manera pronunciada.

- Estudio y representación de las pérdidas por los gases de combustión





Las pérdidas por los gases de escape aumentan muy rápidamente con el aumento de la temperatura llegándose a triplicar los valores iniciales.

Esta gráfica nos indica claramente como de crucial es la optimización de la caldera para garantizar un buen funcionamiento.

- Diagrama de Sankey

Se representará el diagrama de Sankey de solo uno de los combustibles, en este caso el Fueloil 1, para 3 valores de temperatura a VCO₂=0.06909, VO₂=0.04545 y pérdidas igual a 0:

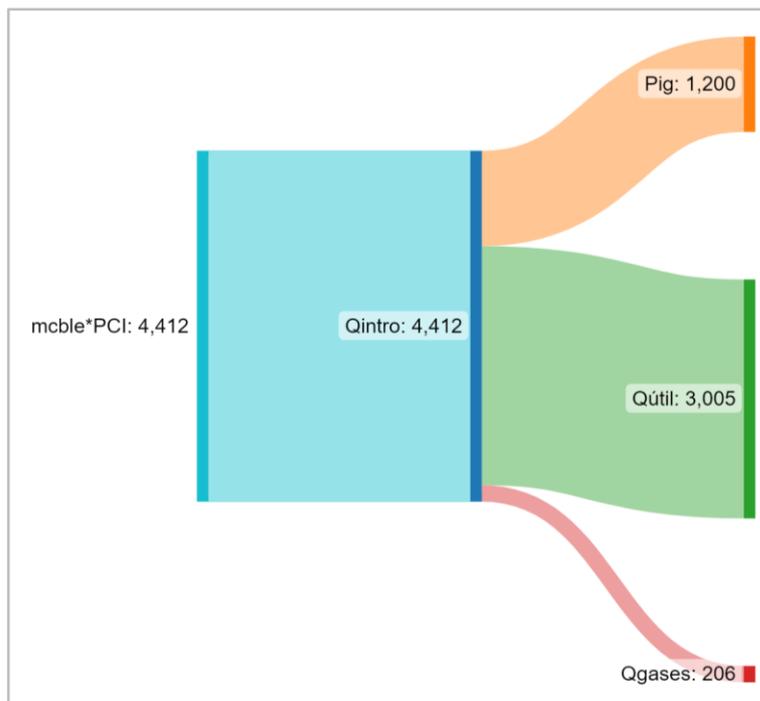


Ilustración 10 Diagrama de Sankey Fueloil 1 T=150°C

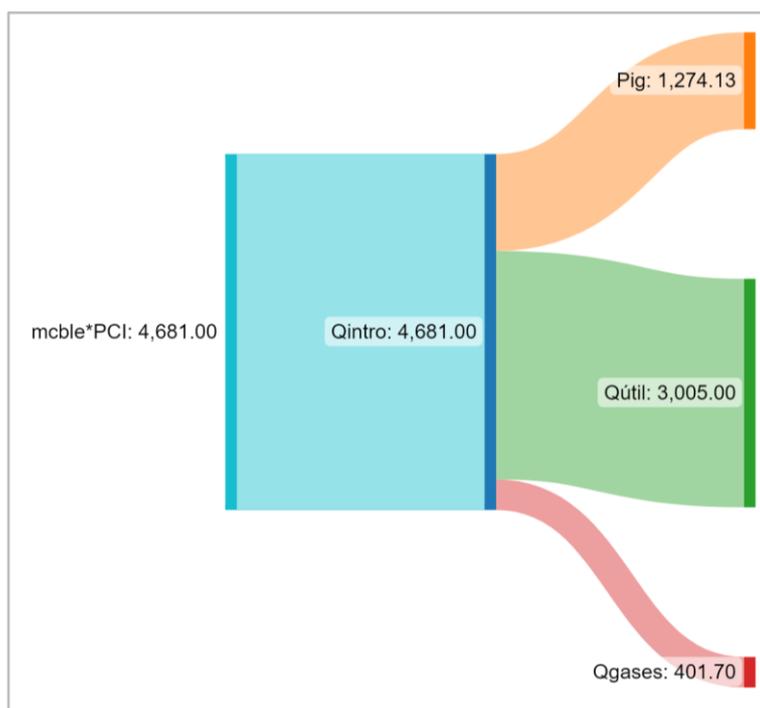


Ilustración 11 Diagrama de Sankey Fueloil 1 T=253,4°C

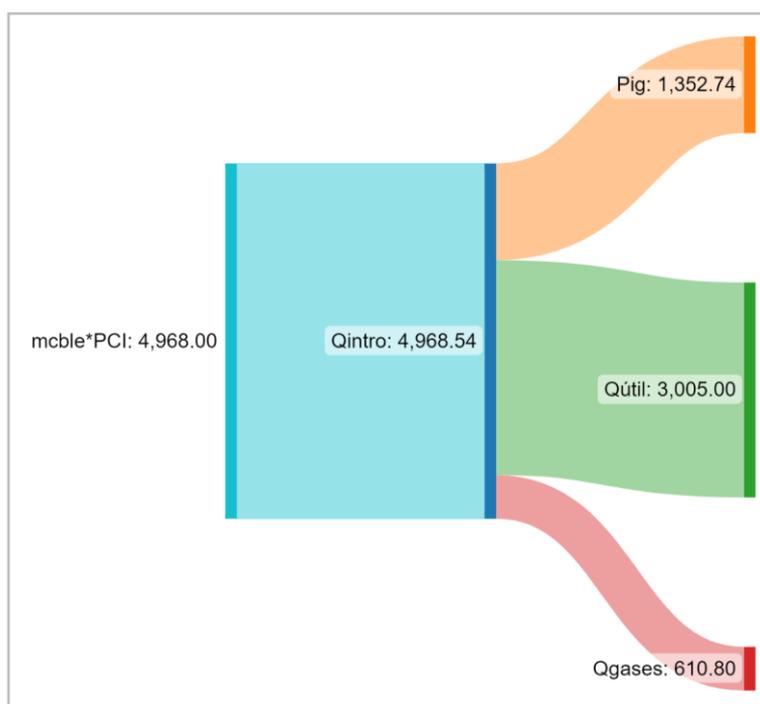


Ilustración 12 Diagrama de Sankey Fueloil 1 T= 350°C

En estos gráficos podemos observar las entradas y salidas de energía de la caldera, todas en kW. En la parte izquierda se encuentra la entrada de la caldera es decir el calor introducido, mientras que a la derecha están todas las salidas, pérdidas por los gases, calor útil y pérdidas por inquemados.

En esta representación se puede observar de manera visual todo lo planteado en los gráficos anteriores. El aumento de la temperatura consigue aumentar el calor introducido, sin embargo, la energía útil se mantiene

constante y las pérdidas por los gases y por los inquemados van aumentando.

5.2 Escenario 2

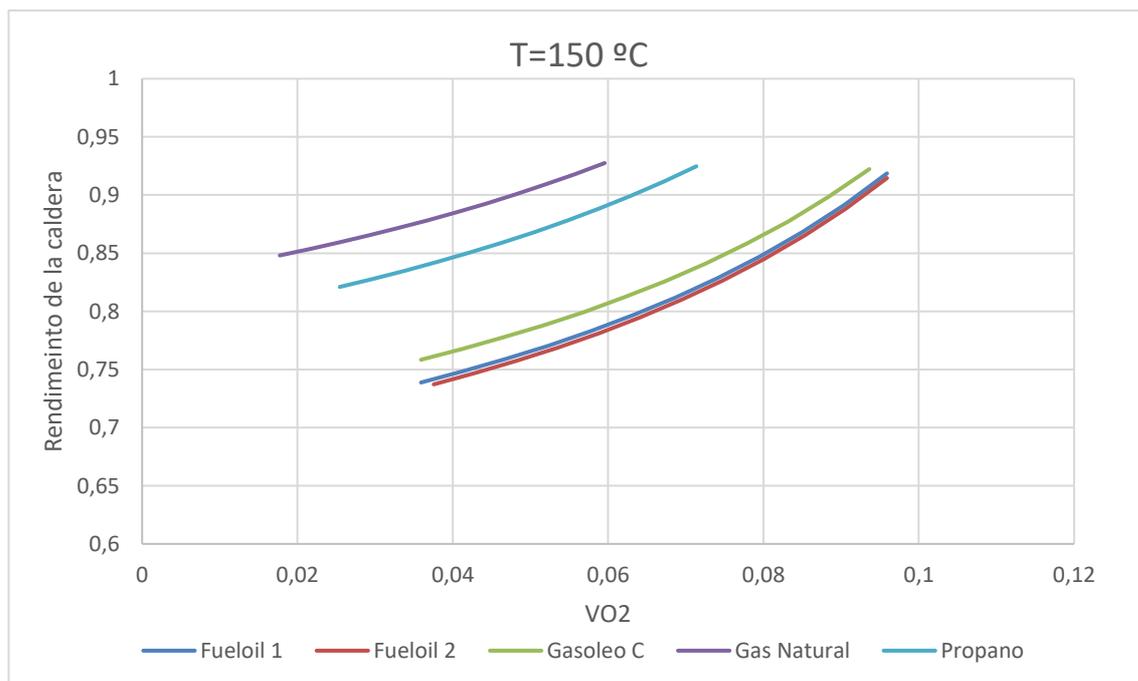
En el segundo escenario se va a analizar la influencia de la variación del porcentaje de VO₂.

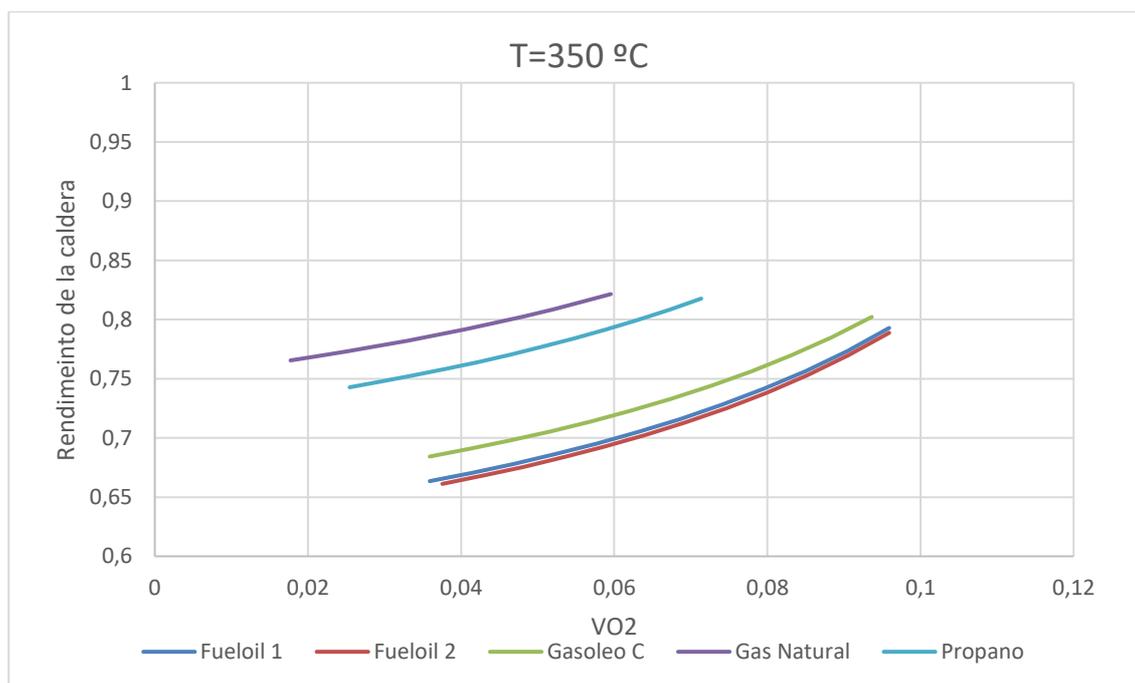
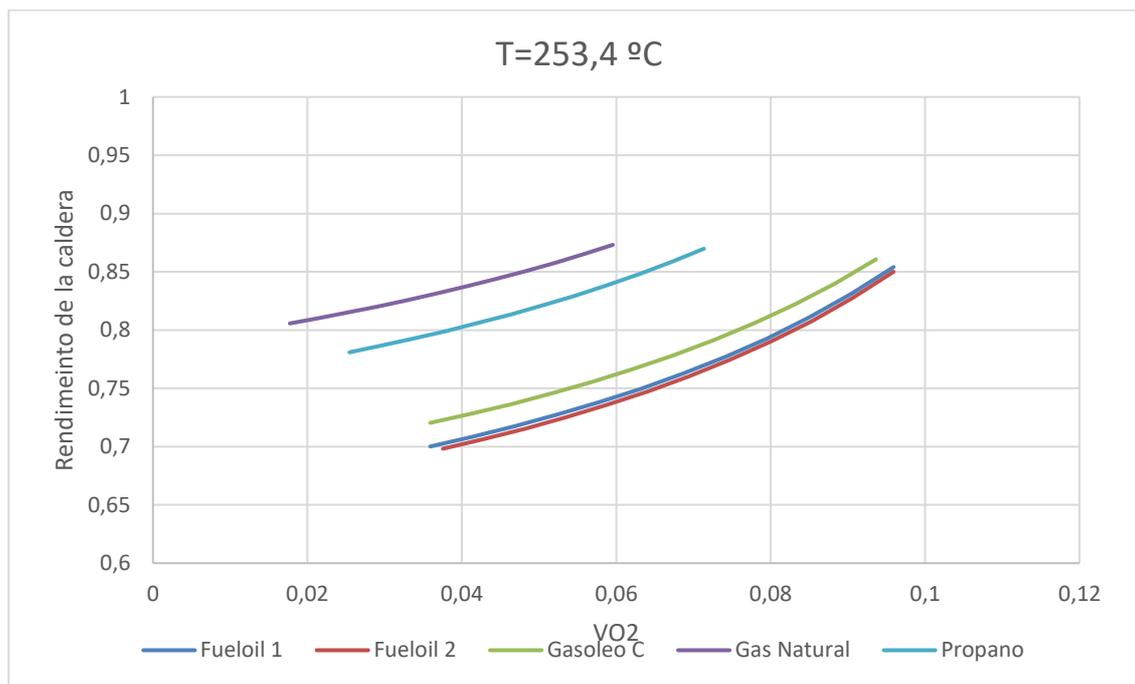
Análogamente al apartado anterior, se han hecho 2 tríos de gráficas, siendo estas el rendimiento y las pérdidas por los gases de la caldera, además se ha representado el diagrama de Sankey de uno de los combustibles.

En este caso se ha escogido un valor fijo de VCO₂ dentro del rango de variación de todos los combustibles, las pérdidas convectivas se han considerado cero y se han elegido tres temperaturas fijas. En la siguiente tabla resume los valores utilizados:

Combustible	Gráfica 1		Gráfica 2		Gráfica 3	
	VCO ₂ [%]	T ^a [°C]	VCO ₂ [%]	T ^a [°C]	VCO ₂ [%]	T ^a [°C]
Fueloil 1	8,818	150	8,818	253,4	8,818	350
Fueloil 2	8,818	150	8,818	253,4	8,818	350
Gasoleo C	8,818	150	8,818	253,4	8,818	350
Gas Natural	8,455	150	8,455	253,4	8,455	350
Propano	8,909	150	8,909	253,4	8,909	350

- Estudio y representación del rendimiento de la caldera





En este conjunto de gráficas se puede comprobar que al aumentar el volumen de O₂ aumenta el rendimiento ligeramente.

Este aumento de rendimiento no tiene una relación totalmente directa o lineal, en las calderas se debe procurar que exista un nivel de oxígeno adecuado, y no aumentarlo en exceso ya que cuando se sobrepasan ciertos límites puede lograr el efecto contrario.

Para lograr el nivel óptimo de volumen de O₂ hay que tener en cuenta diversos factores.

En primer lugar, el oxígeno se utiliza para la combustión del combustible por lo que es necesario asegurarse de que el volumen de O₂ es el mínimo necesario para que se dé la combustión total del combustible, por tanto, un

exceso de O_2 no aporta beneficios significativos.

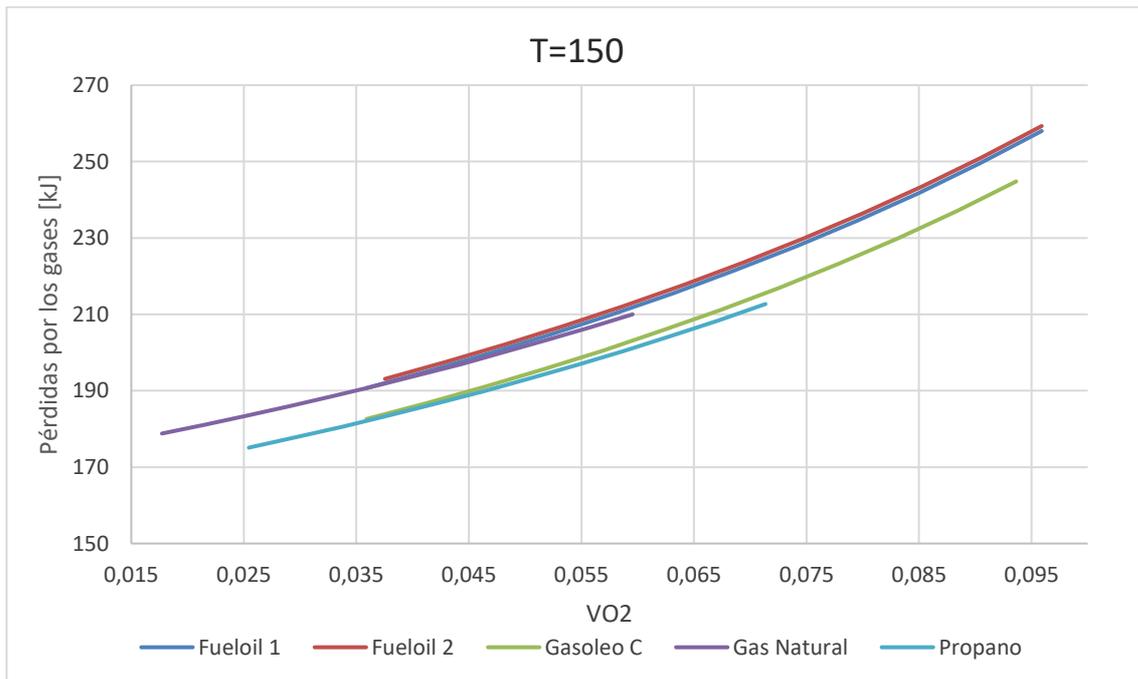
Además, debe existir un equilibrio entre el volumen de O_2 y CO_2 dentro de la caldera para conseguir una combustión eficiente.

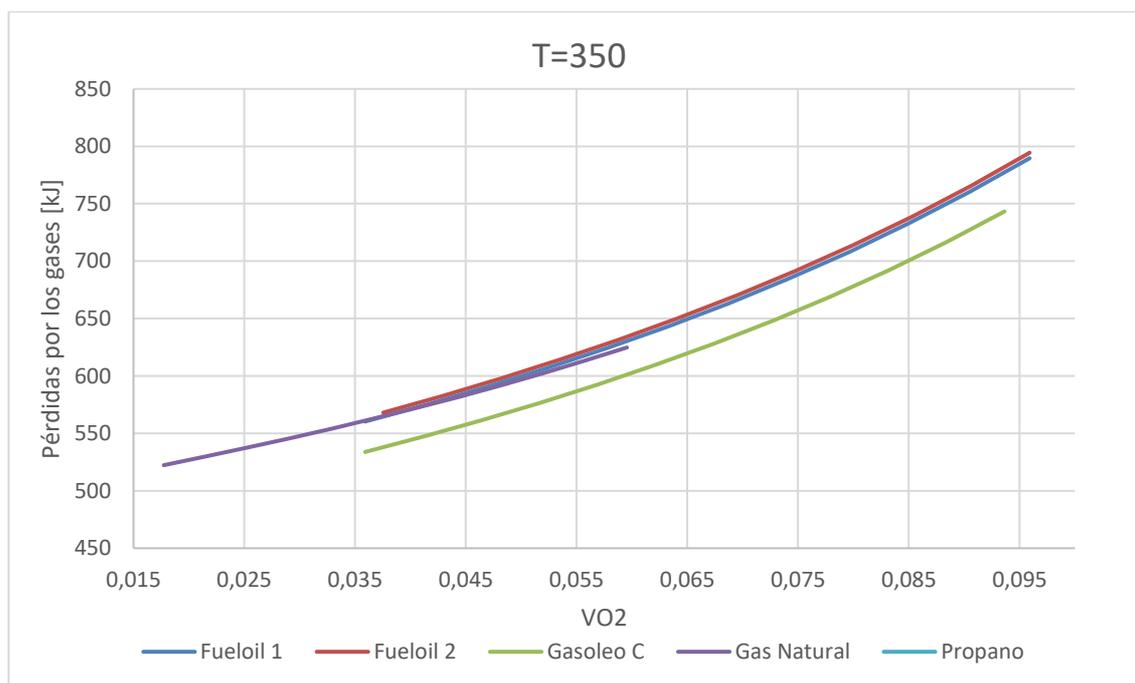
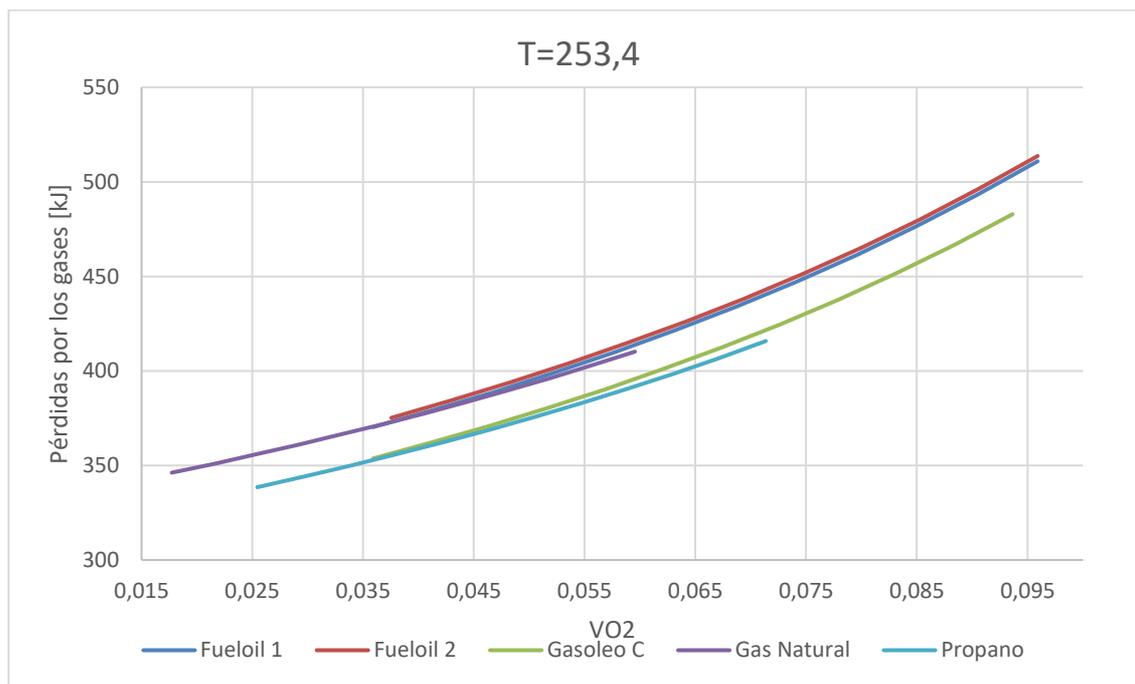
Un aumento de O_2 también puede repercutir en una disminución de la temperatura de los gases de escape lo cual puede desembocar en una pérdida de rendimiento ya que la transferencia de energía es menos efectiva.

Por último, un exceso de oxígeno puede dar lugar a la formación de óxidos de nitrógeno.

La mezcla de aire y combustible por tanto debe ser óptima para un buen funcionamiento de la caldera.

- Estudio y representación de las pérdidas por los gases de combustión





En el conjunto de gráficas podemos observar un aumento de las pérdidas de los gases de escape con el aumento del volumen de oxígeno.

El aumento de las pérdidas de los gases se puede deber a diversos que se pueden relacionar con la eficiencia de la combustión y la transferencia del calor.

Tal y como se ha explicado en la gráfica anterior, un exceso de oxígeno puede suponer una combustión incompleta, y que aparezcan subproductos como el CO, estos productos forman parte de los gases de escape y provocan pérdidas de energía. La formación de los óxidos de nitrógeno también contribuye a la formación de pérdidas.

Se puede observar también un aumento significativo de las pérdidas de escape con el aumento de la temperatura de los gases.

- Diagrama de Sankey

En este caso se representarán los diagramas de Sankey del combustible Gasoleo C a 150 °C, $V_{CO_2}=0.08818$ y con 3 valores de VO_2 distintos:

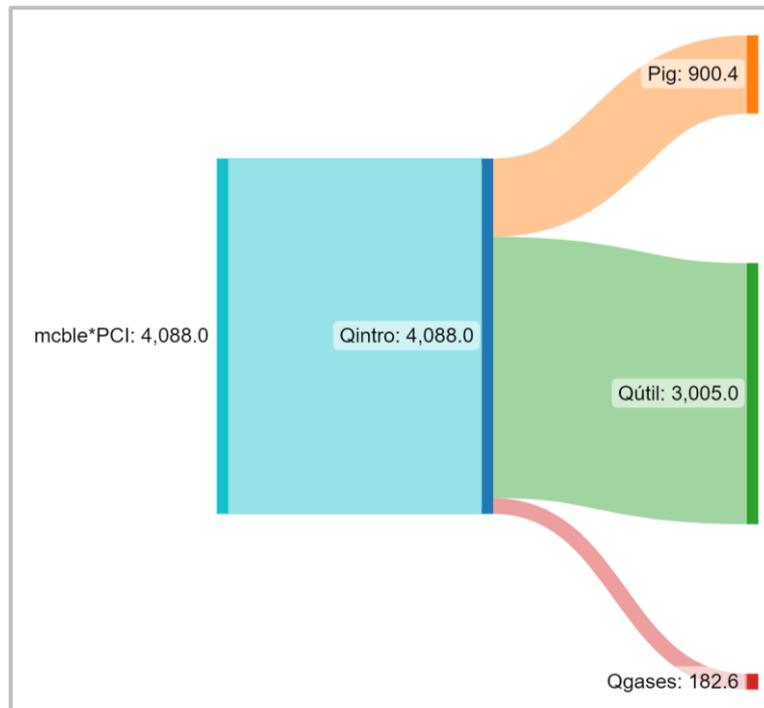


Ilustración 13 Diagrama de Sankey Gasoleo C $VO_2=0.03591$

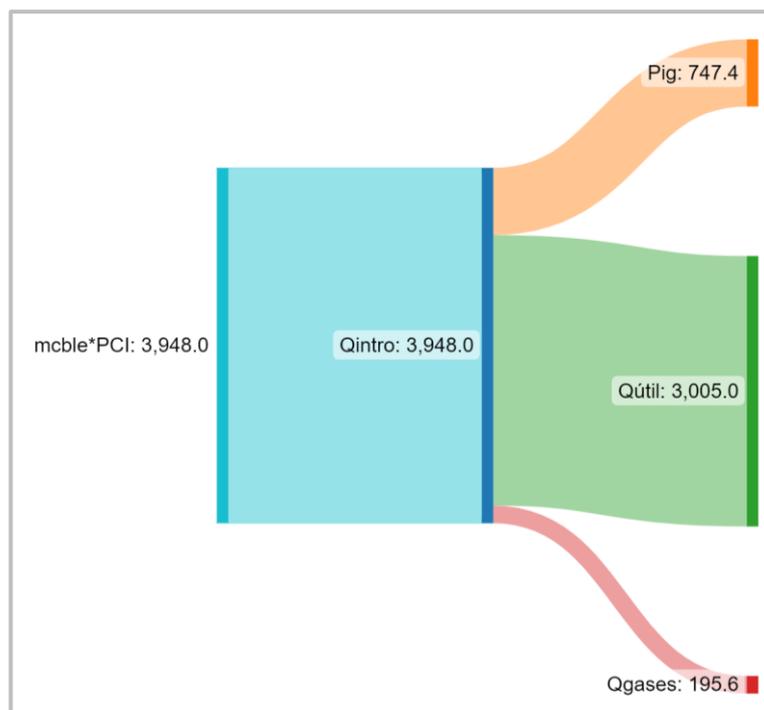


Ilustración 14 Diagrama de Sankey Gasoleo C $VO_2=0.05165$

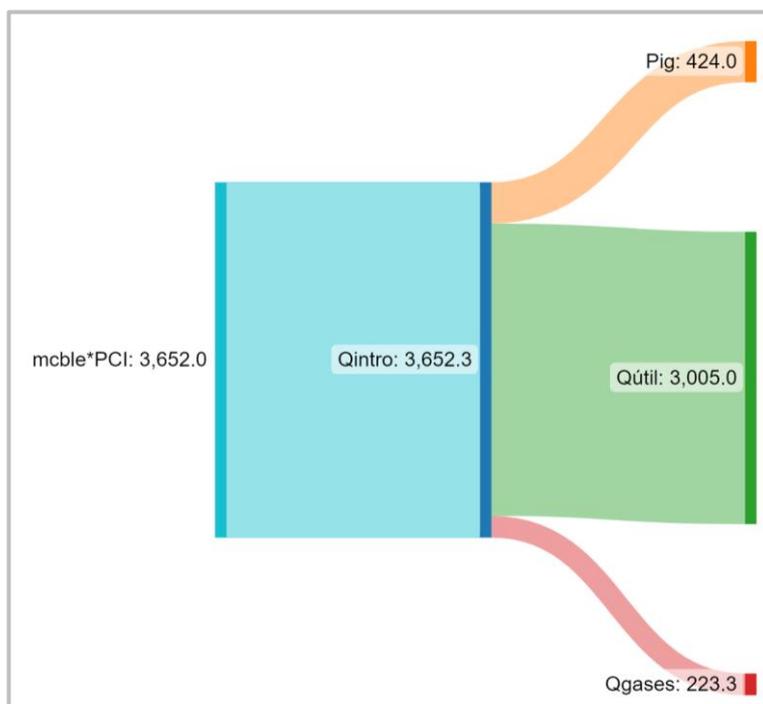


Ilustración 15 Diagrama de Sankey Gasoleo C $VO_2=0.0779$

Los diagramas de Sankey muestran una imagen de lo que ocurre en la caldera.

Se puede observar que al aumentar el volumen de oxígeno van disminuyendo las pérdidas por inquemados, pero aumentan las pérdidas por los gases de escape. Esto se debe que, pese a que hay una mejora en la eficiencia de combustión de la caldera, hay más energía que se convierte en calor y aumentan las pérdidas de los gases de escape.

5.3 Escenario 3

En este escenario se va a analizar la influencia de la variación de volumen de CO_2 .

Tal y como se ha hecho en los apartados anteriores se van a representar dos tríos de gráficas, rendimiento y pérdidas por los gases de la caldera, así como el diagrama de Sankey de uno de los combustibles.

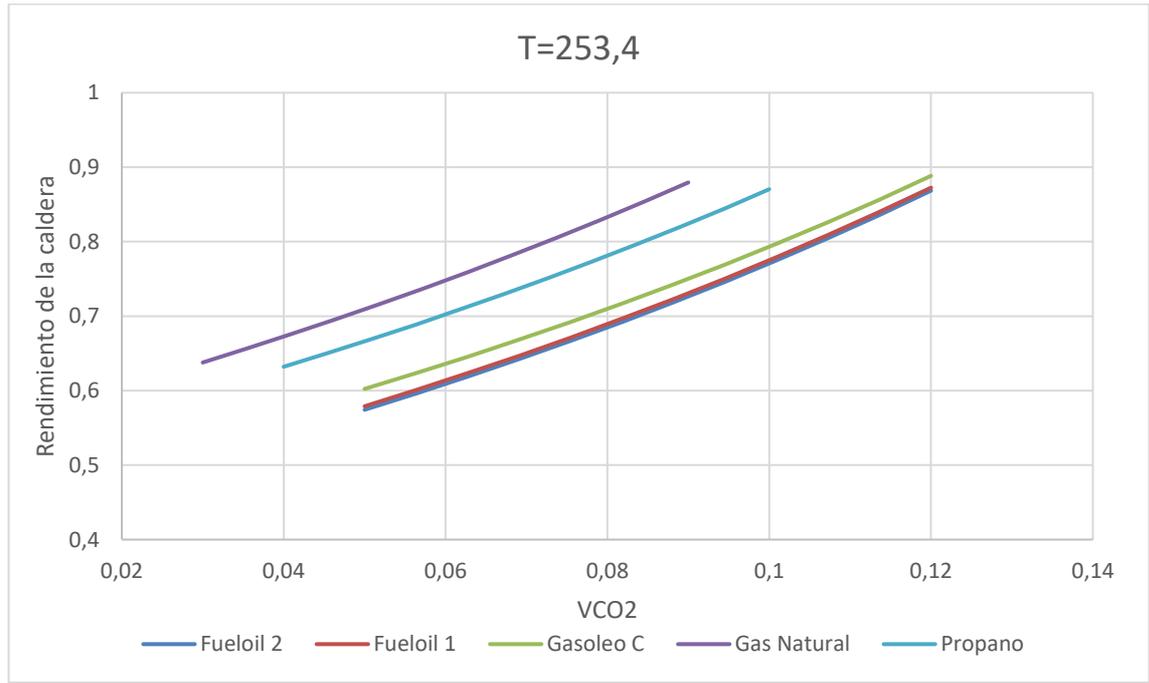
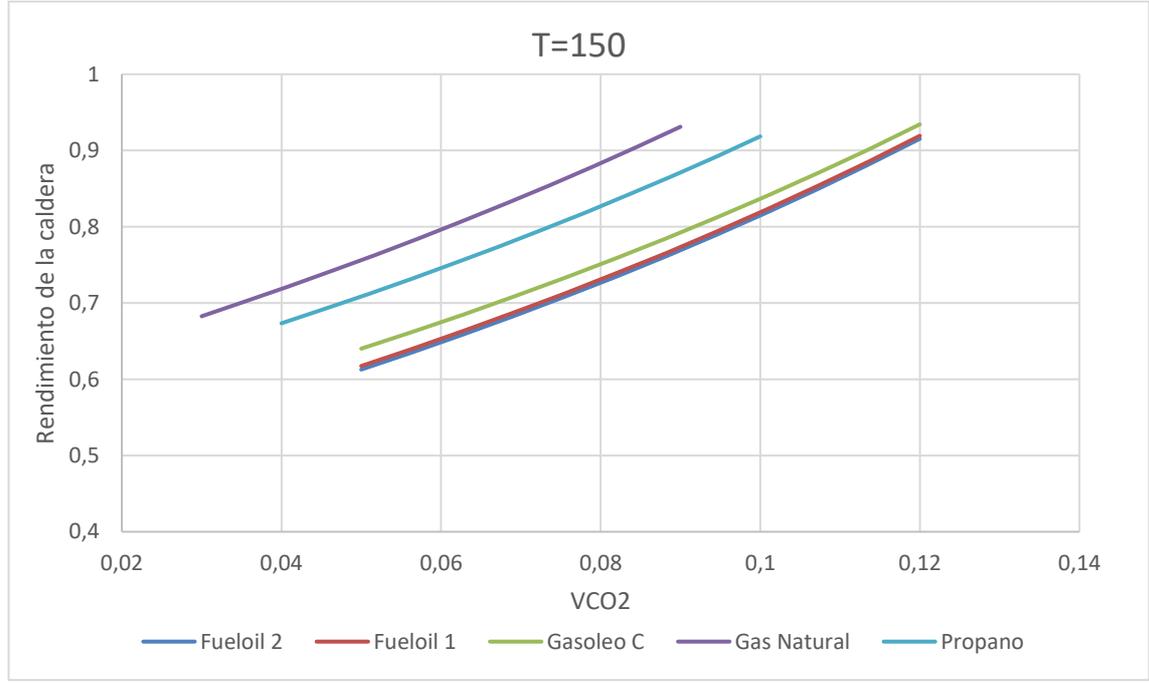
Se van a mantener las pérdidas convectivas igual a 0, se han escogido valores de VO_2 presentes en todos los combustibles y muy próximos entre sí para que el volumen de VO_2 sea prácticamente constante y por último se han escogido tres temperaturas fijas.

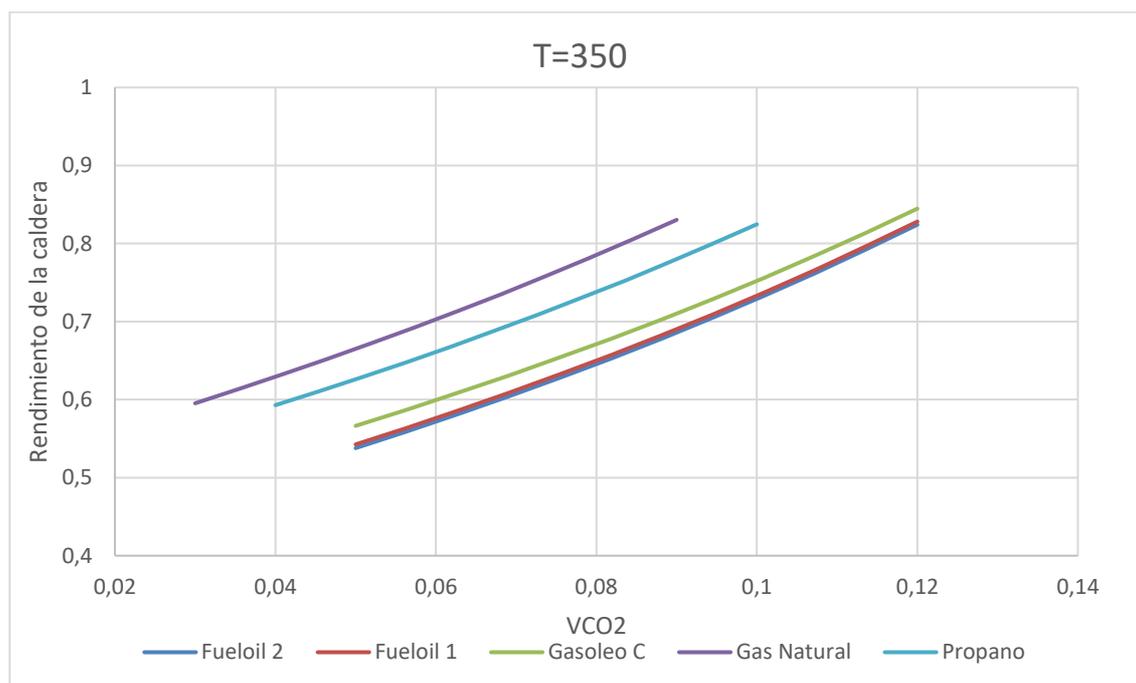
La siguiente tabla recoge todo lo mencionado anteriormente:

	Gráfica 1		Gráfica 2		Gráfica 3	
Combustible	VO_2 [%]	T^a [°C]	VO_2 [%]	T^a [°C]	VO_2 [%]	T^a [°C]
Fueloil 1	5,5	150	5,5	253,4	5,5	350
Fueloil 2	5,5	150	5,5	253,4	5,5	350
Gasoleo C	5,5	150	5,5	253,4	5,5	350

Gas Natural	5,5	150	5,5	253,4	5,5	350
Propano	5,5	150	5,5	253,4	5,5	350

- Estudio y representación del rendimiento de la caldera





Analizando el conjunto de gráficas se puede ver que el rendimiento de la caldera aumenta con el aumento del volumen de dióxido de carbono.

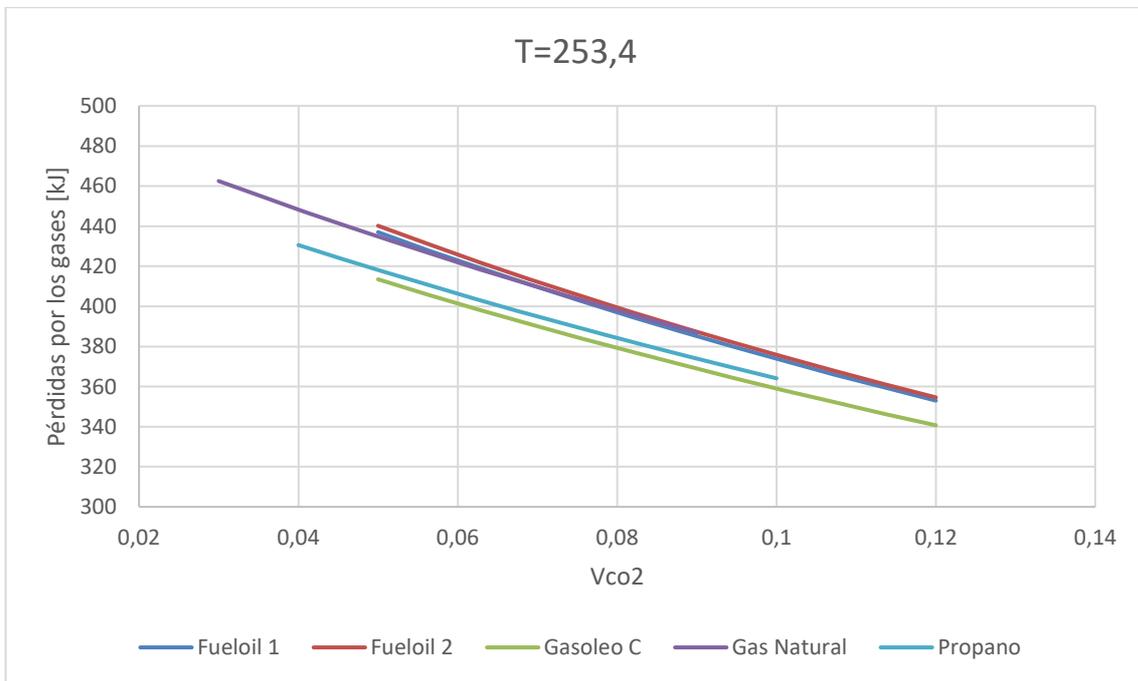
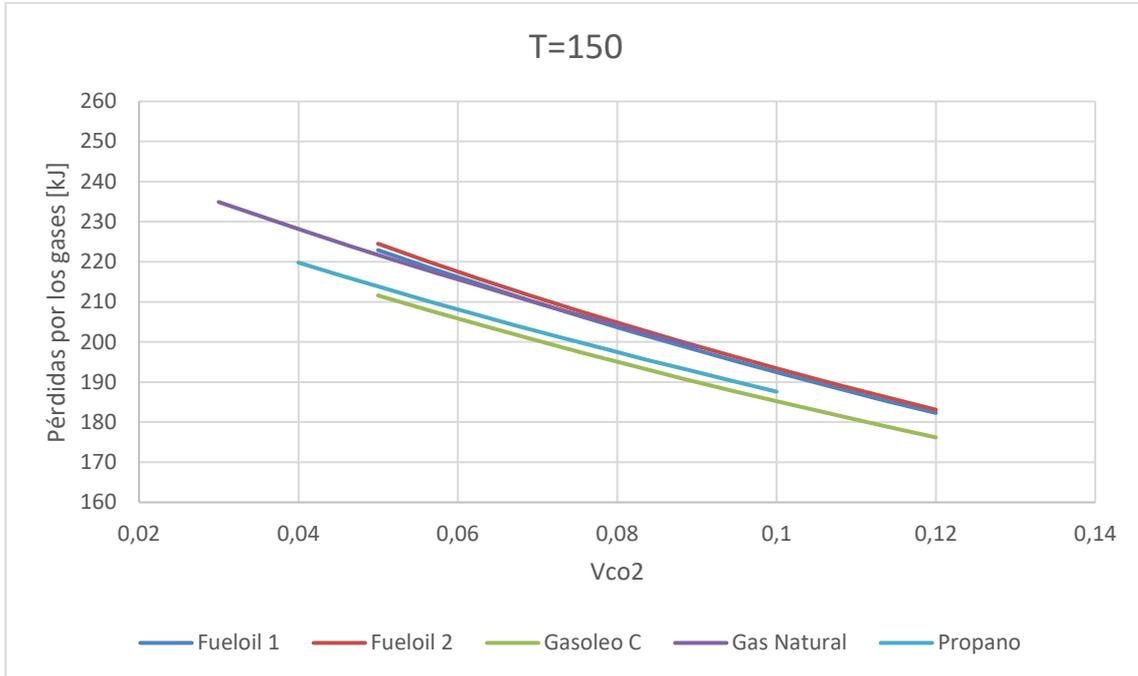
Un aumento del volumen de dióxido de carbono indica que la combustión de la caldera es más eficiente, es decir, una parte mayor del calor que produce el combustible es convertida en calor útil.

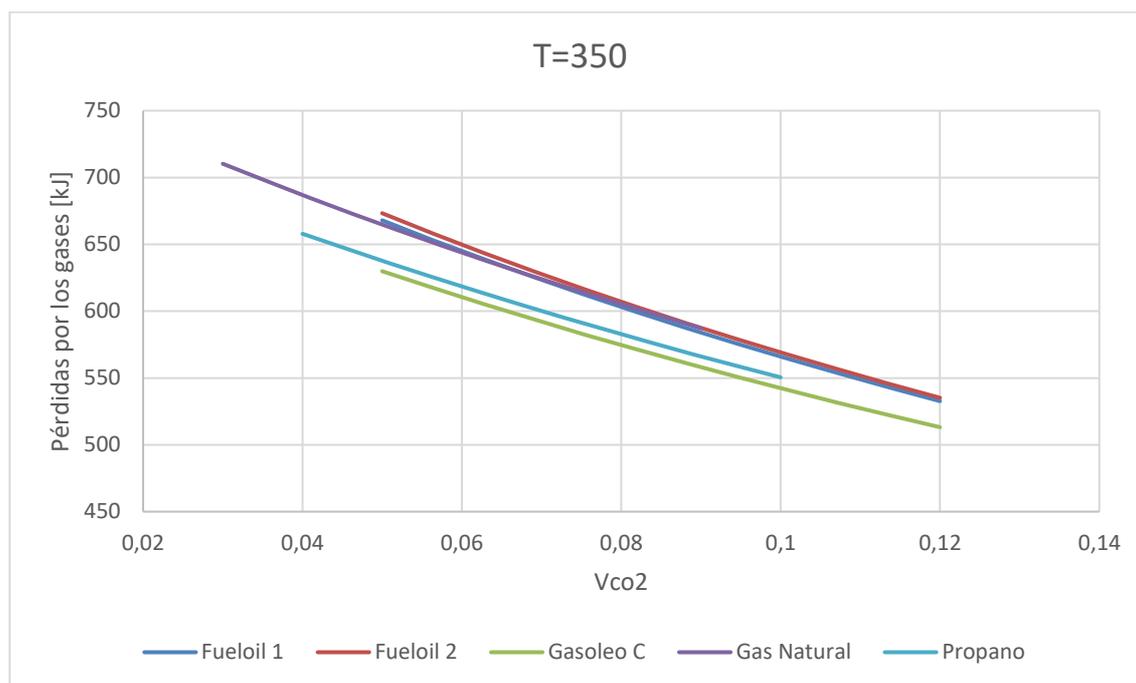
El aumento de CO_2 indica una combustión más completa, lo que se traduce como menos pérdidas por productos de la combustión inquemados como el CO . La pérdida de calor latente de la caldera es menor y el rendimiento mayor.

Además, una combustión más eficiente provoca que se reduzca la emisión de contaminantes como los óxidos de nitrógeno que son perjudiciales para el medio ambiente.

En este caso el aumento del contenido de CO_2 supone un aumento del rendimiento de la caldera, aunque esto no siempre es así ya que se puede ver influenciada por otros factores como las pérdidas por convección y radiación, que en este caso se consideran nulas.

- Estudio y representación de las pérdidas por los gases de combustión





En estas gráficas se puede comprobar que las pérdidas por los gases de escape de la caldera disminuyen con el aumento del volumen de dióxido de carbono.

Como se ha explicado en el apartado anterior, un aumento del volumen de CO_2 indica una combustión más eficiente y, como resultado una disminución de las pérdidas de calor por los gases de escape. El calor generado se aprovecha de una manera más eficiente y, por tanto, se pierde menos energía por los gases de escape.

- Diagrama de Sankey

En este escenario se va a representar los diagramas de Sankey del combustible Gas Natural, para 3 VCO_2 valores de distintos:

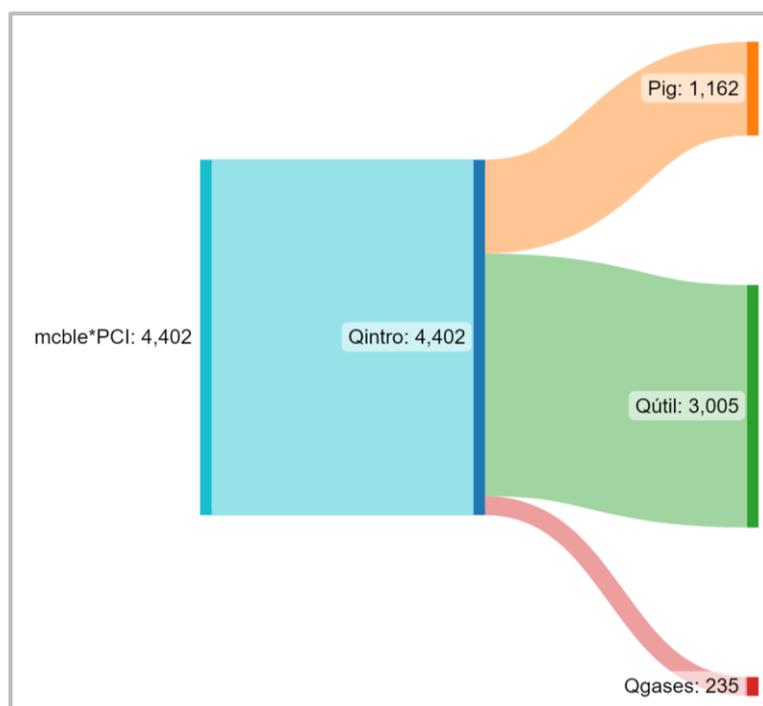


Ilustración 16 Diagrama de Sankey Gas Natural $\text{VCO}_2=0.03$

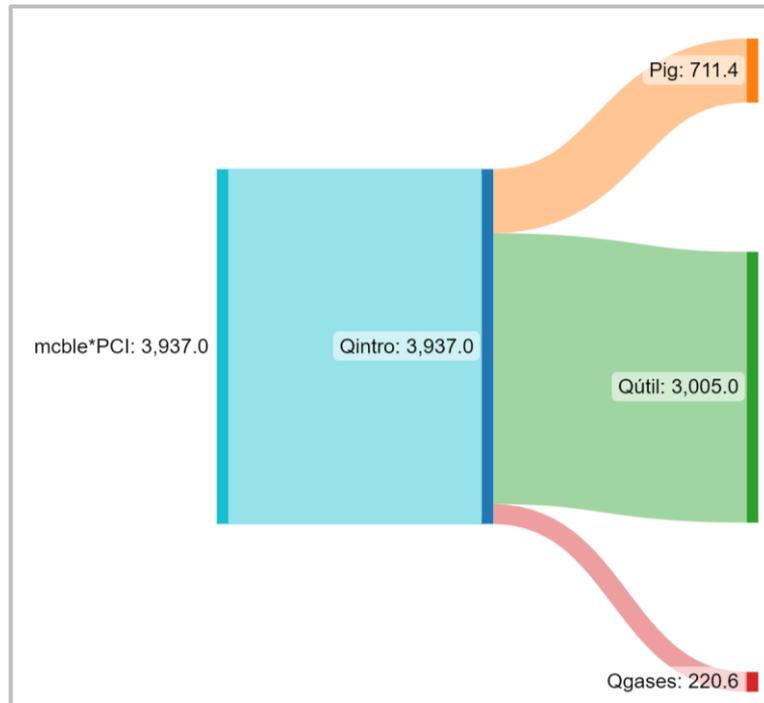


Ilustración 17 Diagrama de Sankey Gas Natural $V_{CO_2}=0.05182$

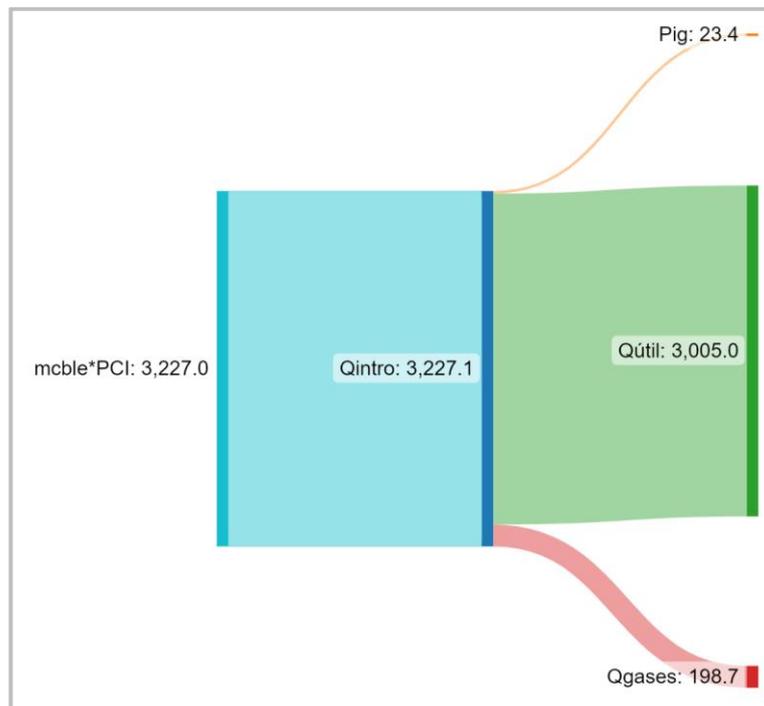


Ilustración 18 Diagrama de Sankey Gas Natural $V_{CO_2}=0.09$

Los diagramas de Sankey aportan una imagen visual a lo que sucede en la caldera cuando aumenta el volumen de dióxido de carbono.

Como se ha explicado con anterioridad, se observa que al aumentar el volumen de CO_2 las pérdidas por inquemados disminuyen notablemente, igual que las pérdidas por los gases aunque de una manera menos pronunciada.

Estas disminuciones de las pérdidas afirman que la combustión de la caldera es mas eficiente con el aumento

del volumen de CO₂, ya que se consigue el mismo calor útil con una reducción del calor introducido a la caldera.

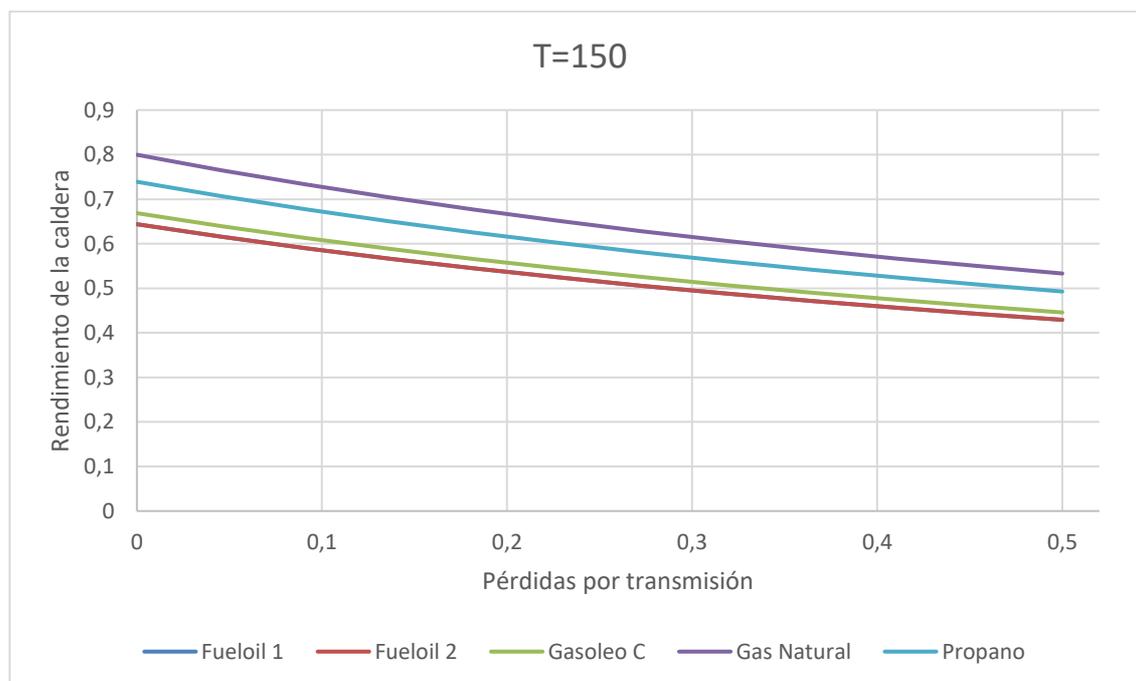
5.4 Escenario 4

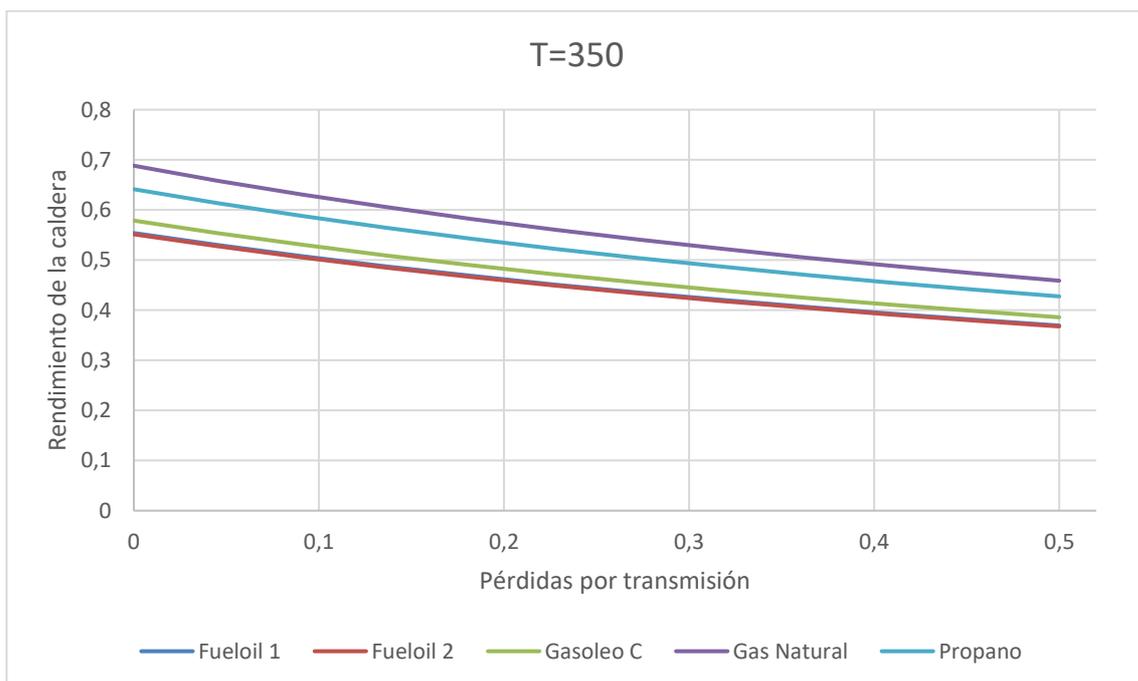
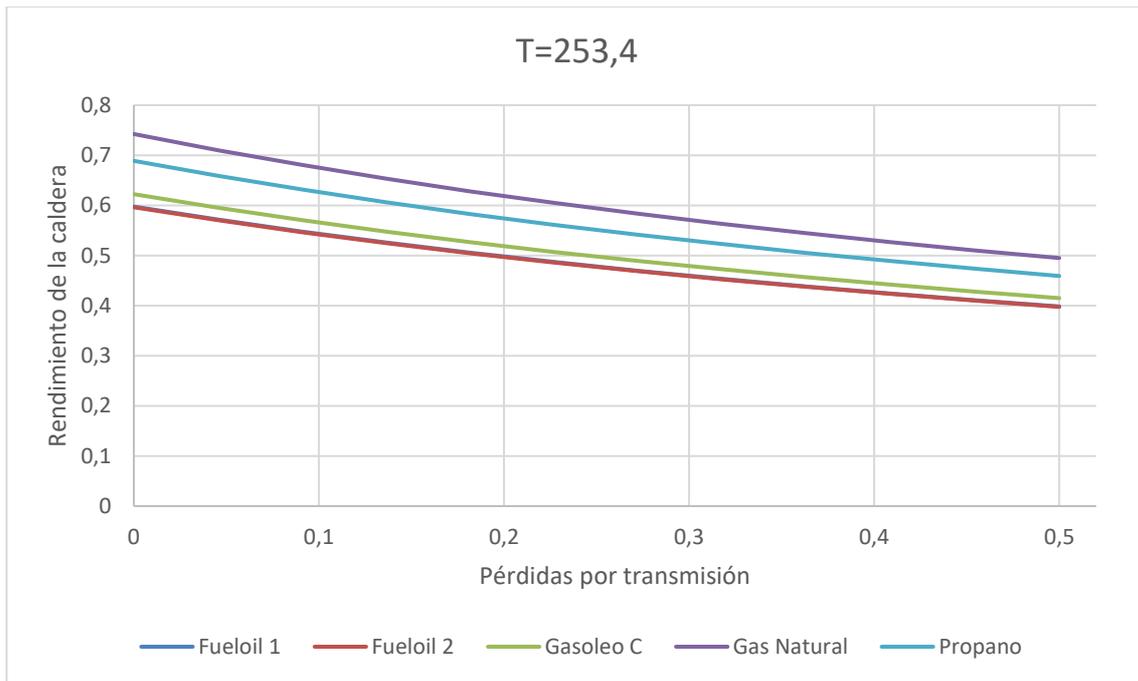
En este caso se estudiará la influencia de las pérdidas de transmisión.

Como anteriormente, para ello se crearán 2 tríos de gráficas, rendimiento y pérdidas de gases de la caldera, así como el diagrama de Sankey de uno de los combustibles. Se fijará un valor de VCO₂ existente en todos los combustibles y será aproximadamente un 5%, análogamente se hará con VO₂ recogido junto a las temperaturas en la siguiente tabla:

Combustible	Gráfica 1		Gráfica 2		Gráfica 3	
	VO ₂ [%]	T ^a [°C]	VO ₂ [%]	T ^a [°C]	VO ₂ [%]	T ^a [°C]
Fueloil 1	7,591	150	7,591	253,4	7,591	350
Fueloil 2	7,955	150	7,955	253,4	7,955	350
Gasoleo C	7,818	150	7,818	253,4	7,818	350
Gas Natural	7,92	150	7,92	253,4	7,92	350
Propano	7,511	150	7,511	253,4	7,511	350

- Estudio y representación del rendimiento de la caldera





Ante el aumento de las pérdidas convectivas implica una disminución en el rendimiento de la caldera como se puede observar en el conjunto de gráficas.

Estas pérdidas representan una fuga de calor que no se aprovecha por lo cual la eficiencia de la caldera se ve afectada.

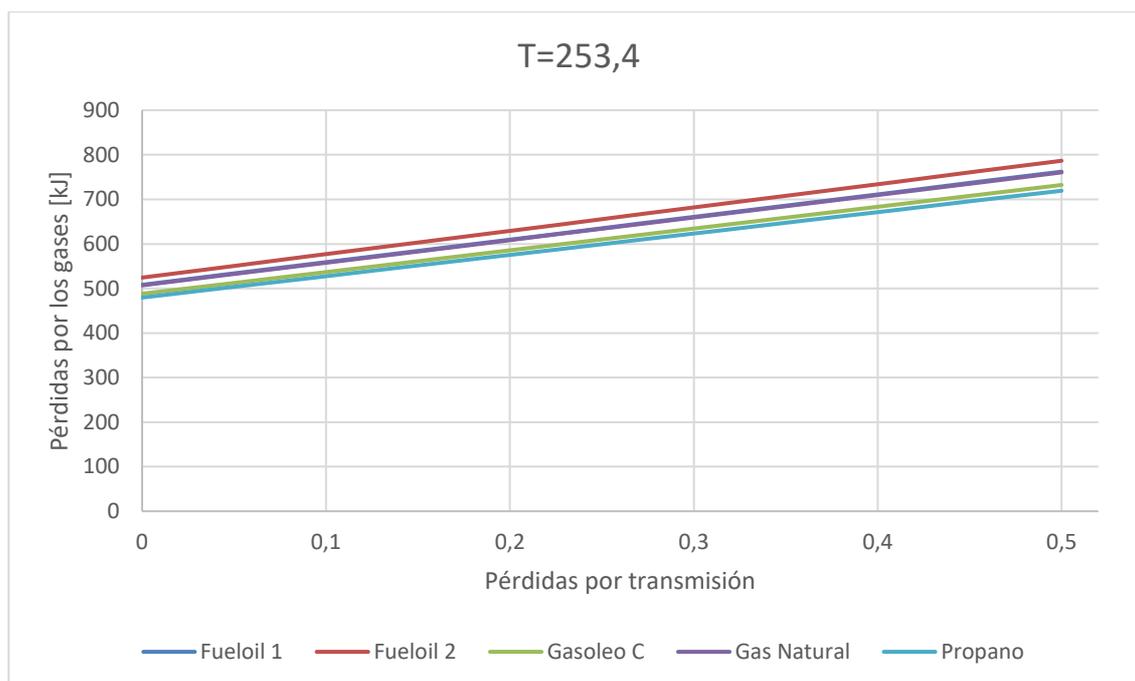
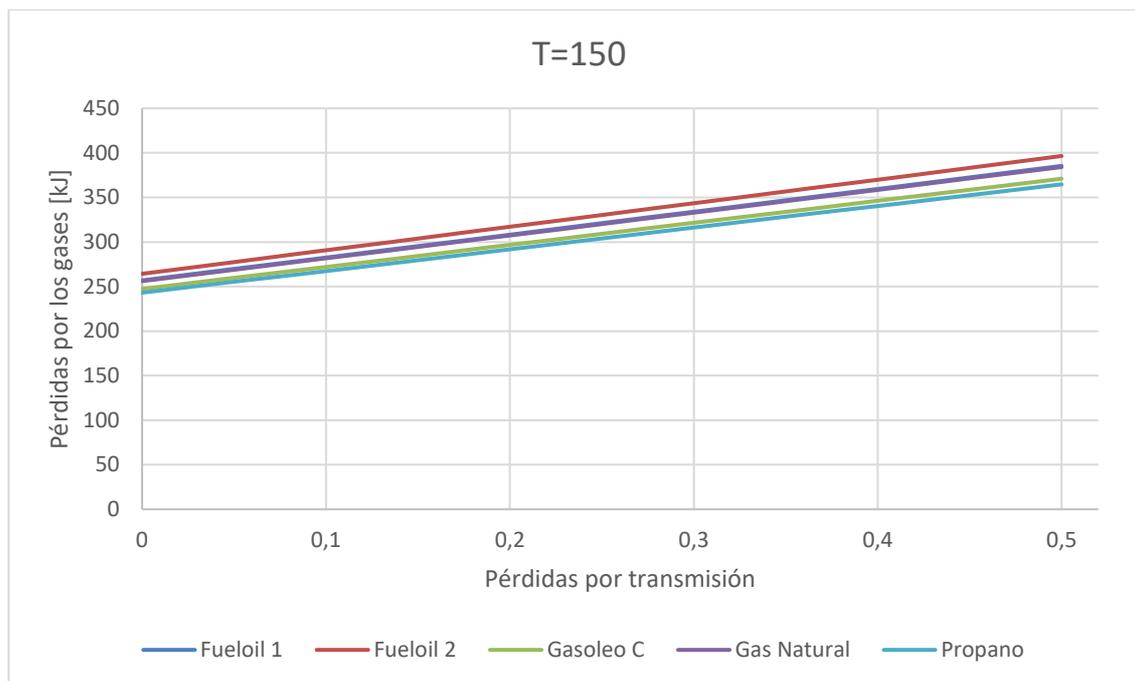
Parte del calor de la caldera se pierde a través de las paredes de la caldera a causa de la convección, el calor se transfiere desde áreas mas calientes a áreas mas frías a través de un fluido. Esta pérdida de calor supone una pérdida de calor útil para transformar el agua en vapor.

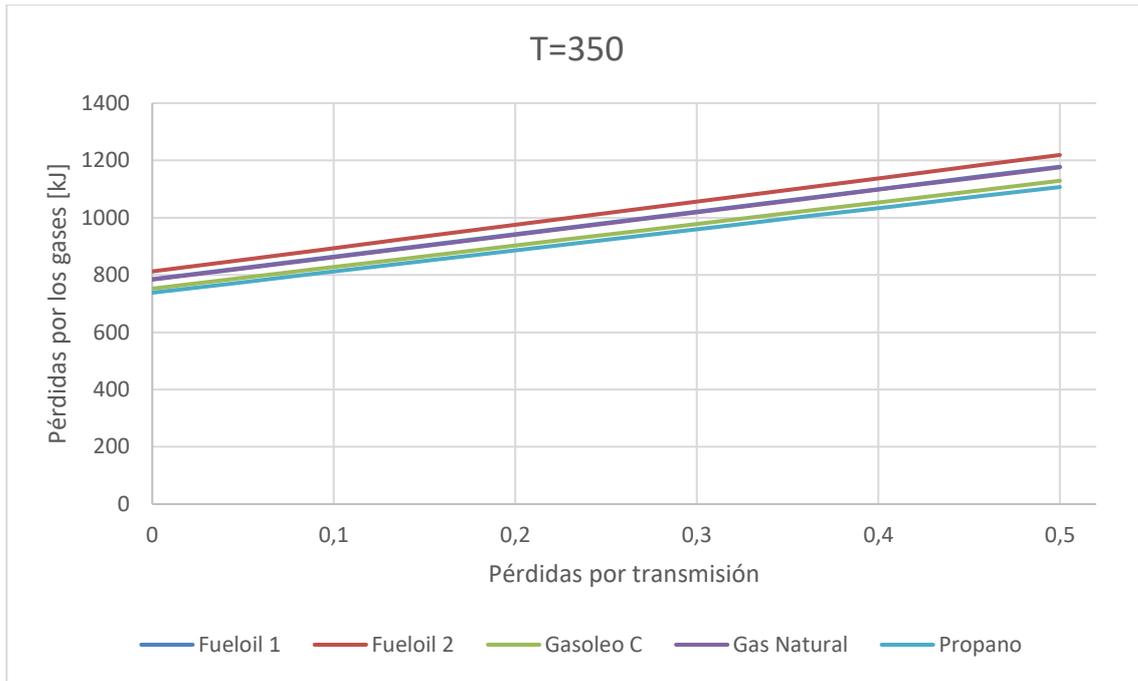
Existe también una pérdida de calor debido al efecto de la radiación, parte del calor se irradia en forma de

radiación electromagnética.

Hay diversas maneras para mitigar esta pérdida de energía en forma de calor mediante un buen diseño de la caldera. Es importante que las calderas cuenten con un buen revestimiento térmico para limitar la pérdida de calor a través de las superficies hacia el entorno, así como un revestimiento refractario para reducir la radiación del calor. También influye la temperatura de trabajo, evitar las temperaturas excesivamente altas reduce estas pérdidas.

- Estudio y representación de las pérdidas por los gases de combustión





Las gráficas muestran un aumento de las pérdidas por los gases de escape al aumentar las pérdidas convectivo-radiantes.

Parte del calor generado no se transfiere de forma eficiente, se transmite menos calor al agua y/o vapor por lo que se reduce la energía útil disponible, lo que puede aumentar el calor que se pierde a través de los gases.

Ante esto se puede necesitar un aumento del flujo de aire para mantener el rendimiento de la caldera lo que implica un aumento en la velocidad de los gases de salida, lo que puede aumentar las pérdidas convectivas ya que se arrastra el calor antes de que pueda ser transferido.

- Diagrama de Sankey

En esta ocasión se representarán los diagramas de Sankey del Propano, para $V_{CO_2}=0.05091$ $V_{O_2}=0.07511$ y $T=150$ °C:

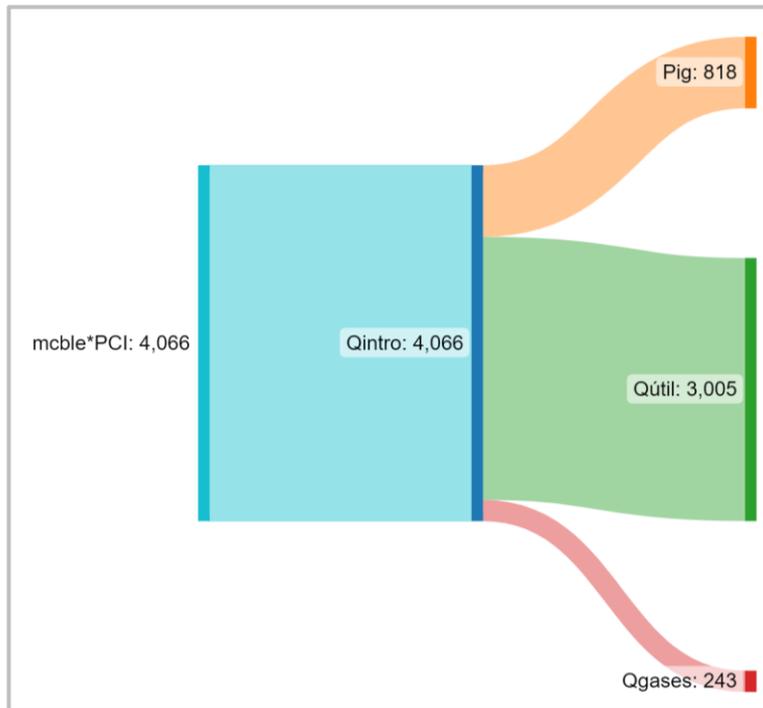


Ilustración 19 Diagrama de Sankey Propano Pcr=0

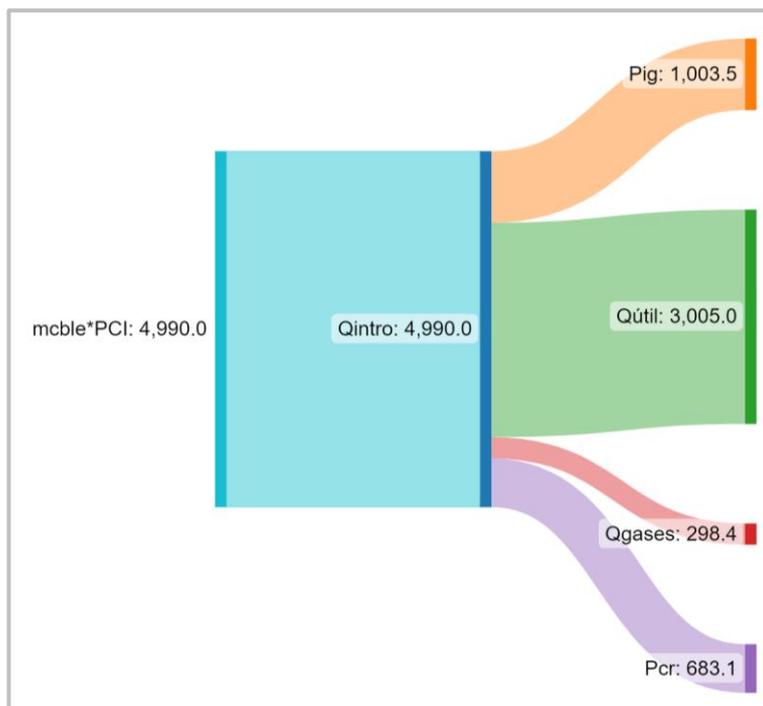


Ilustración 20 Diagrama de Sankey Propano Pcr=0,2273

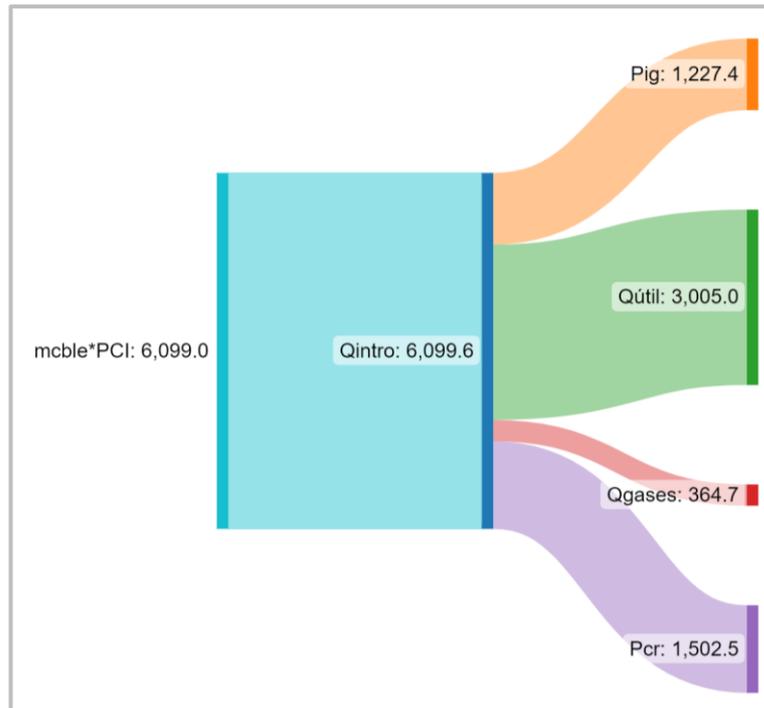


Ilustración 21 Diagrama de Sankey Propano Pcr=0,5

Estos diagramas de Sankey muestran de una manera visual los cambios en los flujos de entrada y salida de la caldera.

En esta ocasión además de los flujos de entrada y salida presentes en los escenarios anteriores podemos ver la aparición del flujo de salida correspondiente a las pérdidas convectivo-radiantes.

Se puede observar que el aumento de las pérdidas convectivo-radiantes supone también un aumento de las pérdidas por inquemados y por los gases de escape.

5.5 Análisis del efecto de las variables en el rendimiento de la caldera

Haciendo un análisis de los cuatro escenarios planteados se puede observar que todos los combustibles tienen un comportamiento parecido ante la variación de los parámetros.

Se puede comprobar observando las diferentes gráficas tanto de rendimiento como de pérdidas por los gases, que el comportamiento del Fueloil 1 y 2 es prácticamente idéntico, llegándose a solapar la representación de ambos en diversas ocasiones.

Un suceso que se hace especialmente notable mediante las representaciones gráficas son los diferentes rangos de variación de volumen de oxígeno y dióxido de carbono en los que trabajan los distintos combustibles. Esto se comprueba observando el desplazamiento entre las líneas de los combustibles.

Mediante estas representaciones gráficas se puede identificar qué combustible consigue una eficiencia de la caldera mayor, pudiéndose ordenar de mayor eficiencia a menor de la siguiente manera: Gas Natural, Propano, Gasóleo C, Fueloil 1 y 2.

El efecto de la temperatura en el rendimiento de la caldera se puede considerar casi lineal, la variación del rango de la temperatura supone una pérdida común a todos los combustibles de alrededor del 12% del rendimiento de

la caldera.

Las curvas de efecto del volumen del oxígeno varían dependiendo del combustible, la pérdida de eficiencia para todo el rango de variación del Gas Natural y Propano puede considerarse del 10%, mientras que supone aproximadamente un 20% para el resto de los combustibles.

El aumento de rendimiento es de un 30% con la variación total del volumen de dióxido de carbono para todos los combustibles.

Dado que las pérdidas convectivo-radiantes se consideran como un porcentaje del calor útil, y la eficiencia se calcula como el calor útil entre el calor introducido, el rendimiento de la caldera es proporcional a las estas pérdidas, cayendo un 50% con el rango de variación.

6 CONCLUSIONES

Este trabajo se concluye recalcando la importancia de una buena optimización de la caldera, mediante la búsqueda del equilibrio adecuado de las diferentes variables con el objetivo de lograr un rendimiento óptimo y sostenible.

Ante los resultados obtenidos en los apartados anteriores se confirma la necesidad de encontrar la temperatura óptima de funcionamiento de la caldera para garantizar una operación eficiente.

Un balance adecuado tanto del volumen de dióxido de carbono como de oxígeno durante la combustión es esencial, siendo el ajuste preciso de las proporciones crucial.

Optimizar el diseño y el aislamiento de las calderas y las superficies radiantes, puede ayudar en gran medida a la reducción de las pérdidas convectivo-radiantes que representan gran parte de la energía desperdiciada

Dado que las variables no son totalmente independientes unas de otras, buscar un equilibrio entre todas es el objetivo principal de la optimización. Además, esta optimización tiene mas beneficios a parte de los económicos, ya que contribuye a la sostenibilidad ambiental. Una buena optimización permite reducir las emisiones de gases y el efecto invernadero.

Conseguir el rendimiento óptimo de la caldera es un proceso constante que requiere continuas comprobaciones, y mantenimiento regular, siendo el análisis paramétrico una herramienta muy importante para su desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] D. d. I. E. Grupo termotecnia, «Problemas Generación de Energía Térmica,» Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [2] D. d. I. Energética, «Tablas Y Graficos Generacion,» Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [3] D. d. i. e. David Velázquez Alonso, «GRÁFICOS Y TABLAS AUDITORÍAS ENERGÉTICAS INDUSTRIAS,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2008.
- [4] S. Sarco, «The boiler house,» [En línea]. Available: <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/introduction>.
- [5] REE, «Informe del sistema eléctrico, Evoulución de la demanda,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico/demanda/evolucion-demanda>.
- [6] Endesa, «La evolución de los tipos de caldera desde su invención,» [En línea]. Available: <https://www.endesax.com/es/es/historias/2021/tipos-calderas>.
- [7] R. V. FILKOSKIa, «STEAM SYSTEM OPTIMIZATION OF AN INDUSTRIAL,» The Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, 2023.
- [8] J. I. S. Martínez, GUIA DE REFERENCIA TECNICA. Calderas y accesorios, 2018.
- [9] B. o. E. Efficiency, «Energy Performance Assessment of Boilers,» [En línea]. Available: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/93221/TFM-1396-ARJONA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [10] I. J. o. S. Energy, «Energy efficiency in steam using industries in Greece,» [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1737066>.
- [11] S. S. a. D.M.Adhyaru, «Boiler efficiency analysis using direct method,» 2011. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6153313>.
- [12] G. F. M. M.-T. S. S. E. L. S. Alfonso Aranda-Usón*, «Energy consumption analysis of Spanish food and drink, textile, chemical,» [En línea]. Available: <http://www.elsevier.com/locate/energy>.
- [13] G. M. I. Luis. A. Molina Igartua, Manual de Eficiencia Energética Térmica en la Industria- Tomos I y II, Bilbao: CADEM (Grupo EVE), 1993.
- [14] G. d. T. -. D. Ingeniería, «Transparencias Generación de Energía Térmica,» Universidad de Sevilla, Sevilla.

ANEXOS

Dado el peso de los anexos se deja un link de descarga:

<https://we.tl/t-7qZOxbJXkb>