



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE  
AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE  
UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN.**

**Autor:**

**Peral Andrés, Juan**

**Tutores:**

**Andrés Chicote, Manuel**

Departamento de Ingeniería Energética y  
Fluidomecánica

**Fernández Cheliz, Diego**

Departamento de Ingeniería Energética y  
Fluidomecánica.

**Valladolid, junio 2022.**



## RESUMEN

El consumo de la energía primaria en los edificios en Europa representa, dependiendo de las condiciones climáticas, hasta un 25-40 %. El agua caliente sanitaria (ACS) y la calefacción de espacios contribuyen de manera directa a este consumo de energía. Una de las fuentes más comunes y utilizadas para la generación de calor en estas aplicaciones es el gas natural. Con dicho combustible, las calderas de condensación pueden superar el rendimiento energético del 100% sobre el poder calorífico inferior (PCI) siempre y cuando las condiciones de funcionamiento permitan la condensación del vapor de agua contenido en los gases de escape. Como consecuencia, la optimización de los parámetros de funcionamiento de las calderas de condensación son clave para disminuir el consumo de combustible sin comprometer las necesidades de calentamiento del agua. El presente trabajo plantea un estudio apoyado en un montaje experimental que analiza los parámetros de funcionamiento de una caldera de condensación cuyo combustible utilizado es gas natural. El objetivo es desarrollar un modelo teórico que relacione la masa de agua condensada y el rendimiento energético de la caldera con otras variables como: la altitud sobre el nivel del mar, el exceso de aire fijado y la temperatura de salida de los humos. De esta manera, y a partir de un estudio estadístico de la varianza o ANOVA, se determina cuánto, y de qué forma están relacionados estos parámetros con lo mencionado con anterioridad.

Palabras clave: caldera de condensación, exceso de aire, altitud sobre el nivel del mar, rendimiento energético, agua condensada, calefacción de espacios, Agua Caliente Sanitaria.

## **ABSTRACT.**

In Europe, primary energy consumption in buildings accounts for up to 25-40 %, depending on the climate conditions. Domestic Hot Water (DHW) and space heating contribute directly to this energy consumption. One of the most used and common sources for heat generation in this appliances is natural gas. With this fuel, condensing boilers can surpass the 100% energy performance over the low calorific value (LCV) if the operating conditions enable the water vapor contained in the exhaust gases to condensate. Consequently, the optimization of the operating parameters of the boilers is a key factor in decreasing fuel consumption without compromising water heating needs. The present work presents an experimental approach to the operating parameters of a condensing boiler that works with natural gas. The aim is to develop a theoretical model that relates the amount of condensed water and the energy performance to the height above the seal level, the excess of air set by the maintenance staff and the exhaust gases temperature of the condensing boiler. This approach will let us establish how much and in which way the parameters we have mentioned before are related to it, using a statistical analysis of the variance or ANOVA.

Key words: condensing boiler, excess air, height above the sea, energy performance, condensed water, space heating, Domestic Hot Water.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, me gustaría dedicar este trabajo a mi familia. Especialmente a mis padres y a mis hermanos, que durante todos estos años me han ayudado a llegar hasta este momento.

También me gustaría aprovechar este espacio para agradecer al Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica y al resto del personal del Laboratorio de Calor y Frío de la EII. A lo largo de los años siempre habéis sabido motivar y buscar la continua mejora para satisfacer las necesidades de los alumnos.

Especialmente a Eloy Velasco y a mis tutores Manuel Andrés y Diego Fernández, por haber confiado en mí para realizar este trabajo desde el primer día, por la paciencia y por el tiempo dedicado desde ese mismo momento hasta el día de hoy.



# ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
I.1	MOTIVACIÓN DEL TRABAJO .....	1
I.2	ANTECEDENTES .....	2
I.3	OBJETIVOS.....	7
<b>II.</b>	<b>FUNDAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>9</b>
II.1	COMBUSTIÓN EN COMBUSTIBLES GASEOSOS .....	9
II.2	PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS .....	12
II.2.1	PROPIEDADES FÍSICAS .....	12
II.2.2	PROPIEDADES QUÍMICAS .....	13
II.3	TIPOS DE COMBUSTIÓN .....	15
II.4	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS COMBUSTIBLES .....	16
II.4.1	AIRE MÍNIMO PARA LA COMBUSTIÓN ( $V_a$ ) .....	16
II.4.2	COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE ( $n$ ) .....	17
II.4.3	PODER FUMÍGENO ( $V_h$ ) .....	17
II.5	EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN .....	18
II.5.1	PÉRDIDAS DE CALOR EN HUMOS ( $P_s$ ) .....	19
II.5.2	PÉRDIDAS DE CALOR EN LOS INQUEMADOS DE LAS CENIZAS .....	19
II.5.3	PÉRDIDAS POR INQUEMADOS EN LOS GASES ( $P_i$ ) .....	19
II.6	COMPOSICIÓN DE LOS HUMOS (EMISIONES DE GASES) .....	20
II.6.1	ÓXIDOS DE NITRÓGENO ( $NO_x$ ) .....	20
II.6.2	MONÓXIDO DE CARBONO (CO).....	22
II.7	CONCEPTOS PSICROMÉTRICOS.....	22
II.8	INTERCAMBIADORES DE CALOR: DIFERENCIA MEDIA LOGARÍTMICA DE TEMPERATURAS ( $\Delta T_{DMLT}$ ) .....	26
II.9	DESCRIPCIÓN .....	29
II.9.1	INTRODUCCIÓN A LAS CALDERAS: CARACTERÍSTICAS Y DATOS FUNDAMENTALES ..	29
II.9.2	TIPOS DE CALDERAS.....	31
II.9.3	CALDERAS ESTÁNDAR.....	32
II.9.4	CALDERAS DE BAJA TEMPERATURA .....	32
II.9.5	CALDERAS DE CONDENSACIÓN .....	32
II.9.6	COMPONENTES CALDERAS DE CONDENSACIÓN .....	33
II.10	FUNCIONAMIENTO CALDERAS DE CONDENSACIÓN .....	36
II.10.1	INSTALACIONES.....	38
II.10.2	SISTEMAS DE BAJA TEMPERATURA.....	38
II.10.3	CALEFACCIÓN CON RADIADORES.....	39
II.10.4	CIRCUITO CALEFACCIÓN Y ACS.....	40
II.10.5	CIRCUITO DE ACS.....	40
II.10.6	CIRCUITO DE CALEFACCIÓN .....	41
<b>III.</b>	<b>MONTAJE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>43</b>
III.1	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS MEDIDOS, MATERIALES Y MÉTODO .....	43
III.2	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS .....	45

<b>IV.</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>47</b>
IV.1	CÁLCULO DE LA T <sup>a</sup> DE ROCÍO DE LOS HUMOS.....	47
IV.2	CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE SALIDA DE HUMOS .....	52
IV.3	CÁLCULO CALOR TOTAL INTERCAMBIADO .....	56
IV.4	CÁLCULO DEL AGUA CONDENSADA Y CALOR RECUPERADO .....	57
IV.5	CÁLCULO DEL RENDIMIENTO .....	62
IV.6	CONCLUSIONES.....	64
<b>V.</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
V.1	PLANTEAMIENTO ANÁLISIS ORTOGONAL .....	68
V.2	PLANTEAMIENTO ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) .....	70
V.3	ANOVA RENDIMIENTO .....	70
V.4	ANOVA AGUA CONDENSADA .....	73
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO .....</b>	<b>79</b>
VI.1	CONCLUSIONES.....	79
<b>VII.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>81</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>85</b>



# INDICE DE TABLAS

TABLA I-1. NIVELES DE EMISIONES DE DISTINTOS COMBUSTIBLES FÓSILES.....	6
TABLA II-1. COMPOSICIÓN DEL AIRE .....	10
TABLA II-2. DENSIDAD RELATIVA DE LOS GASES COMBUSTIBLES.....	13
TABLA II-3. TEMPERATURAS DE IGNICIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA .....	13
TABLA II-4. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DE ALGUNOS COMBUSTIBLES .....	14
TABLA II-5. CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES .....	15
TABLA II-6. AIRE NECESARIO DE COMBUSTIÓN POR UNIDAD DE ENERGÍA PARA ALGUNOS COMBUSTIBLES .....	17
TABLA II-7. VOLUMEN DE HUMOS PRODUCIDO DURANTE LA COMBUSTIÓN DE ALGUNOS COMBUSTIBLES .....	18
TABLA II-8. CONCENTRACIÓN LÍMITE DE NOX PARA CADA CLASE .....	22
TABLA II-9. UMBRALES DE EMISIONES DE REFERENCIA DE CO MARCADOS POR LA NORMA UNE EN 15378 PARA INSTALACIONES IN SITU .....	22
TABLA II-10. RANGOS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA EN LOS QUE SE UTILIZA CADA CALDERA [29] .....	31
TABLA II-11. RENDIMIENTOS MÍNIMOS DE CADA CALDERA [27] .....	33
TABLA III-1. PARÁMETROS MEDIDOS DE LA CALDERA DE CONDENACIÓN EXPERIMENTAL PARA UN DÍA NORMAL.....	44
TABLA IV-1. VALORES DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES TOMADOS COMO REFERENCIA EN EL EJEMPLO.....	50
TABLA IV-2. PARÁMETROS CALCULADOS PARA OBTENER LA TEMPERATURA DE ROCÍO DE DIVERSOS COMBUSTIBLES .....	51
TABLA IV-3. PARÁMETROS CALCULADOS PARA OBTENER LA TEMPERATURA DE ROCÍO DE VARIOS COMBUSTIBLES. ....	51
TABLA IV-4. CALORES ESPECÍFICOS DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS .....	54
TABLA IV-5. ENTALPÍAS DE FORMACIÓN DE LOS COMPUESTOS QUE INTERVIENEN EN NUESTRAS REACCIONES QUÍMICAS .....	54
TABLA IV-6. CÁLCULO DE LA ENTALPÍA DE COMBUSTIÓN DEL COMBUSTIBLE Y DE LA POTENCIA TÉRMICA LIBERADA.....	55
TABLA IV-7. CÁLCULO DEL FLUJO MÁSIKO .....	55
TABLA IV-8. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA .....	55
TABLA IV-9. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS CALIENTES Y FRÍOS EN EL MÉTODO DMLT .....	57
TABLA IV-10. CALOR INTERCAMBIADO POR LOS FLUIDOS CALOPORTADORES Y FLUJO MÁSIKO DEL FLUIDO FRÍO.....	57
TABLA IV-11. CÁLCULO DEL AGUA CONDENSADA EN EL MODELO .....	60

TABLA IV-12. CÁLCULO CALOR RECUPERADO EN LA CALDERA DE CONDENSACIÓN .....	60
TABLA V-1. ANÁLISIS PARA N=1,1 Y A.S.N.M=0M .....	68
TABLA V-2. ANÁLISIS PARA N=1,1 Y A.S.N.M=200M.....	68
TABLA V-3. ANÁLISIS PARA N=1,1 Y A.S.N.M=400M.....	68
TABLA V-4. ANÁLISIS PARA N=1,1 Y A.S.N.M=600M.....	69
TABLA V-5. ANÁLISIS PARA N=1,1 Y A.S.N.M=843M.....	69
TABLA V-6. ANÁLISIS PARA N=1,1 Y A.S.N.M=1000M.....	69
TABLA V-7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL RENDIMIENTO.....	70
TABLA V-8. PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA RENDIMIENTO POR EXCESO DE AIRE (N) ...	72
TABLA V-9. PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA RENDIMIENTO POR T <sup>a</sup> DE HUMOS .....	72
TABLA V-10. PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA RENDIMIENTO POR A.S.N.M .....	72
TABLA V-11. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA MASA DE AGUA CONDENSADA .....	74
TABLA V-12. PRUEBA DE MÚLTIPLE RANGOS PARA MASA DE AGUA CONDENSADA POR EXCESO DE AIRE (N) .....	75
TABLA V-13. PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA MASA DE AGUA CONDENSADA POR T <sup>a</sup> DE HUMOS.....	76
TABLA V-14. PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA MASA DE AGUA CONDENSADA POR A.S.N.M .....	76
TABLA VI-1. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MODELO TEÓRICO Y EL ESTUDIO EXPERIMENTAL .....	79
TABLA VIII-1. ANÁLISIS PARA N=1,15 Y A.S.N.M= 0M.....	114
TABLA VIII-2. ANÁLISIS PARA N=1,15 Y A.S.N.M=200M.....	115
TABLA VIII-3. ANÁLISIS PARA N=1,15 Y A.S.N.M=400M.....	115
TABLA VIII-4. ANÁLISIS PARA N=1,15 Y A.S.N.M=600M.....	115
TABLA VIII-5. ANÁLISIS PARA N=1,15 Y A.S.N.M=843M.....	116
TABLA VIII-6. ANÁLISIS PARA N=1,15 Y A.S.N.M=1000M.....	116
TABLA VIII-7. ANÁLISIS PARA N=1,2 Y A.S.N.M=0M .....	116
TABLA VIII-8. ANÁLISIS PARA N=1,2 Y A.S.N.M=200M.....	117
TABLA VIII-9. ANÁLISIS PARA N=1,2 Y A.S.N.M=400M.....	117
TABLA VIII-10. ANÁLISIS PARA N=1,2 Y A.S.N.M=600M.....	117
TABLA VIII-11. ANÁLISIS PARA N=1,2 Y A.S.N.M=843M.....	118
TABLA VIII-12. ANÁLISIS PARA N=1,2 Y A.S.N.M=1000M.....	118
TABLA VIII-13. ANÁLISIS PARA N=1,25 Y A.S.N.M=0M.....	118
TABLA VIII-14. ANÁLISIS PARA N=1,25 Y A.S.N.M=200M.....	119
TABLA VIII-15. ANÁLISIS PARA N=1,25 Y A.S.N.M=400M.....	119

TABLA VIII-16. ANÁLISIS PARA N=1,25 Y A.S.N.M=600M .....	119
TABLA VIII-17. ANÁLISIS PARA N=1,25 Y A.S.N.M=843M .....	120
TABLA VIII-18. ANÁLISIS PARA N=1,25 Y A.S.N.M=1000M .....	120
TABLA VIII-19. ANÁLISIS PARA N=1,3 Y A.S.N.M=0M .....	120
TABLA VIII-20. ANÁLISIS PARA N=1,3 Y A.S.N.M=200M .....	121
TABLA VIII-21. ANÁLISIS PARA N=1,3 Y A.S.N.M=400M .....	121
TABLA VIII-22. ANÁLISIS PARA N=1,3 Y A.S.N.M=600M .....	121
TABLA VIII-23. ANÁLISIS PARA N=1,3 Y A.S.N.M=843M .....	122
TABLA VIII-24. ANÁLISIS PARA N=1,3 Y A.S.N.M=1000M .....	122
TABLA VIII-25. ANÁLISIS PARA N=1,35 Y A.S.N.M=0M .....	122
TABLA VIII-26. ANÁLISIS PARA N=1,35 Y A.S.N.M=200M .....	123
TABLA VIII-27. ANÁLISIS PARA N=1,35 Y A.S.N.M=400M .....	123
TABLA VIII-28. ANÁLISIS PARA N=1,35 Y A.S.N.M=600M .....	123
TABLA VIII-29. ANÁLISIS PARA N=1,35 Y A.S.N.M=843M .....	124
TABLA VIII-30. ANÁLISIS PARA N=1,35 Y A.S.N.M=1000M .....	124

# ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA I-1. COMPARATIVA COSTOS CALDERA TRADICIONAL FRENTE A CALDERA DE CONDENSACIÓN .....	4
FIGURA I-2. COMPARATIVA DE VENTAS EN EQUIPOS DE PRODUCCIÓN DE CALOR EN ESPAÑA... 4	4
FIGURA I-3. VALORES DE CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA A NIVEL MUNDIAL POR FUENTES DE ENERGÍA PARA EL AÑO 2020.....	5
FIGURA I-4. APROVISIONAMIENTOS DE GAS NATURAL EN ESPAÑA .....	7
FIGURA II-1. PORCENTAJES DE AIRE Y DE COMBUSTIBLE EN LOS QUE SE PRODUCE UNA COMBUSTIÓN .....	10
FIGURA II-2. PRODUCCIÓN DE EMISIONES DE NO <sub>x</sub> EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LLAMA .....	21
FIGURA II-3. DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN UN INTERCAMBIADOR DE DOS CORRIENTES EN CONTRACORRIENTE .....	28
FIGURA II-4. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA EN UN INTERCAMBIADOR DE DOS CORRIENTES EN EQUICORRIENTE .....	28
FIGURA II-5. COMPARATIVA RENDIMIENTOS ESTACIONARIOS ENTRE CALDERAS .....	33
FIGURA II-6. BOQUILLA DE ATOMIZACIÓN DE COMBUSTIBLE .....	34
FIGURA II-7. SIFÓN DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN .....	35
FIGURA II-8. DIFERENTES ELEMENTOS DE LOS QUE CONSTA UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN .....	35
FIGURA II-9. EQUIPOS NEUTRALIZADORES CON CARBÓN ACTIVO .....	35
FIGURA II-10. COMPARACIÓN DE LA ACIDEZ DE DISTINTOS COMPUESTOS .....	36
FIGURA II-11. CALOR INTERCAMBIADO Y SUS RESPECTIVAS PÉRDIDAS EN EL INTERIOR DE UN QUEMADOR DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN .....	36
FIGURA II-12. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN.....	38
FIGURA II-13. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SUELO RADIANTE [8] .....	39
FIGURA II-14. COMPARACIÓN DE UN DEPÓSITO ESTRATIFICADO RESPECTO DE UN DEPÓSITO NO ESTRATIFICADO.....	41
FIGURA II-15. INTERCAMBIADOR DE PLACAS .....	41
FIGURA II-16. COMPARATIVA DEL APROVECHAMIENTO DE LA CONDENSACIÓN CON LA VARIACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE IMPULSIÓN Y DE RETORNO .....	42
FIGURA III-1. VISTA DE LA (A) CALDERA DE CONDENSACIÓN EXPERIMENTAL, (B) SENSORES DE TEMPERATURA DEL AGUA DE IMPULSIÓN Y DE RETORNO, (C) MEDIDOR DE TEMPERATURA EN EL CONDUCTO DE LOS GASES DE ESCAPE .....	44
FIGURA III-2. REGISTRO DE VALORES EXPERIMENTALES DURANTE UN DÍA NORMAL .....	45
FIGURA IV-1. T <sup>º</sup> DE ROCÍO DE VARIOS COMBUSTIBLES EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE EXCESO DE AIRE (N) .....	50

FIGURA IV-2. BALANCE DE ENERGÍA .....	52
FIGURA IV-3. INTERCAMBIADORES DE CALOR EN UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN. ....	56
FIGURA IV-4. EVOLUCIÓN DE LOS HUMOS HASTA ALCANZAR EL EQUILIBRIO TERMODINÁMICO CON LA SUPERFICIE DE LA BATERÍA .....	59
FIGURA IV-5. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA A.S.N.M =400M .....	61
FIGURA IV-6. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA N=1,3.....	61
FIGURA IV-7. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA A.S.N.M= 0M .....	63
FIGURA IV-8. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA N=1,2 .....	63
TABLA IV-13. TENDENCIAS ESTUDIADAS .....	65
FIGURA V-1. GRÁFICO DE INTERACCIONES DE N Y A.S.N.M CON EL RENDIMIENTO .....	71
FIGURA V-2. GRÁFICO DE ITERACCIONES DE A.S.N.M Y Tª HUMOS CON EL RENDIMIENTO .....	71
FIGURA V-3. GRÁFICA RESIDUOS VS PREDICHOS PARA EL RENDIMIENTO .....	73
FIGURA V-4. GRÁFICO DE ITERACIONES DE N Y A.S.N.M CON MASA DE AGUA CONDENSADA ..	75
FIGURA V-5. GRÁFICO DE INTERACCIONES DE Tª DE HUMOS Y A.S.N.M CON MASA DE AGUA CONDENSADA .....	75
FIGURA V-6. GRÁFICO RESIDUOS VS PREDICHOS PARA M DE AGUA CONDENSADA .....	76
FIGURA VIII-1. Tª DE ROCÍO DE DIVERSOS COMBUSTIBLES EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE EXCESO DE AIRE (N). .....	85
FIGURA VIII-2. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA A.S.N.M= 0M. ....	86
FIGURA VIII-3. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA A.S.N.M= 200M. ....	86
FIGURA VIII-4. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA A.S.N.M= 400M. ....	87
FIGURA VIII-5. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA A.S.N.M= 600M. ....	87
FIGURA VIII-6. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA A.S.N.M= 843M. ....	88
FIGURA VIII-7. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA A.S.N.M= 1000M. ....	88
FIGURA VIII-8. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA N=1,1. ....	89
FIGURA VIII-9. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA N=1,15.....	89
FIGURA VIII-10. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA N=1,2.....	90
FIGURA VIII-11. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA N=1,25.....	90
FIGURA VIII-12. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA N=1,3.....	91
FIGURA VIII-13. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO PARA N=1,35.....	91
FIGURA VIII-14. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA A.S.N.M= 0 M. ....	92
FIGURA VIII-15. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA A.S.N.M = 200M. ....	92
FIGURA VIII-16. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA A.S.N.M = 400M .....	93
FIGURA VIII-17. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA A.S.N.M= 600M. ....	93

FIGURA VIII-18. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA A.S.N.M = 843M. ....	94
FIGURA VIII-19. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA A.S.N.M= 1000M. ....	94
FIGURA VIII-20. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA N=1,1.....	95
FIGURA VIII-21. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA N=1,15.....	95
FIGURA VIII-22. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA N=1,2.....	96
FIGURA VIII-23. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA N=1,25.....	96
FIGURA VIII-24. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA N=1,3.....	97
FIGURA VIII-25. EVOLUCIÓN DE LA MASA DE AGUA CONDENSADA PARA N=1,35.....	97
FIGURA VIII-26. MEDIDAS EXPERIMENTALES 27 DE FEBRERO. ....	98
FIGURA VIII-27. MEDIDAS EXPERIMENTALES 28 DE FEBRERO .....	98
FIGURA VIII-28. MEDIDAS EXPERIMENTALES 1 DE MARZO.....	99
FIGURA VIII-29. MEDIDAS EXPERIMENTALES 2 DE MARZO.....	99
FIGURA VIII-30. MEDIDAS EXPERIMENTALES 3 DE MARZO.....	100
FIGURA VIII-31. MEDIDAS EXPERIMENTALES 4 DE MARZO.....	100
FIGURA VIII-32. MEDIDAS EXPERIMENTALES 5 DE MARZO.....	101
FIGURA VIII-33. MEDIDAS EXPERIMENTALES 6 DE MARZO.....	101
FIGURA VIII-34. MEDIDAS EXPERIMENTALES 7 DE MARZO.....	102
FIGURA VIII-35. MEDIDAS EXPERIMENTALES 8 DE MARZO.....	102
FIGURA VIII-36. MEDIDAS EXPERIMENTALES 9 DE MARZO.....	103
FIGURA VIII-37. MEDIDAS EXPERIMENTALES 10 DE MARZO.....	103
FIGURA VIII-38. MEDIDAS EXPERIMENTALES 11 DE MARZO.....	104
FIGURA VIII-39. MEDIDAS EXPERIMENTALES 12 DE MARZO.....	104
FIGURA VIII-40. MEDIDAS EXPERIMENTALES 13 DE MARZO.....	105
FIGURA VIII-41. MEDIDAS EXPERIMENTALES 14 DE MARZO.....	105
FIGURA VIII-42. MEDIDAS EXPERIMENTALES 15 DE MARZO.....	106
FIGURA VIII-43. MEDIDAS EXPERIMENTALES 16 DE MARZO.....	106
FIGURA VIII-44. MEDIDAS EXPERIMENTALES 17 DE MARZO.....	107
FIGURA VIII-45. MEDIDAS EXPERIMENTALES 18 DE MARZO.....	107
FIGURA VIII-46. MEDIDAS EXPERIMENTALES 19 DE MARZO.....	108
FIGURA VIII-47. MEDIDAS EXPERIMENTALES 20 DE MARZO.....	108
FIGURA VIII-48. MEDIDAS EXPERIMENTALES 21 DE MARZO.....	109
FIGURA VIII-49. MEDIDAS EXPERIMENTALES 22 DE MARZO.....	109
FIGURA VIII-50. MEDIDAS EXPERIMENTALES 23 DE MARZO.....	110

<b>FIGURA VIII-51. MEDIDAS EXPERIMENTALES 24 DE MARZO.....</b>	<b>110</b>
<b>FIGURA VIII-52. MEDIDAS EXPERIMENTALES 25 DE MARZO.....</b>	<b>111</b>
<b>FIGURA VIII-53. MEDIDAS EXPERIMENTALES 26 DE MARZO.....</b>	<b>111</b>
<b>FIGURA VIII-54. MEDIDAS EXPERIMENTALES 27 DE MARZO.....</b>	<b>112</b>
<b>FIGURA VIII-55. MEDIDAS EXPERIMENTALES 29 DE MARZO.....</b>	<b>112</b>
<b>FIGURA VIII-56. MEDIDAS EXPERIMENTALES 30 DE MARZO.....</b>	<b>113</b>
<b>FIGURA VIII-57. MEDIDAS EXPERIMENTALES 31 DE MARZO.....</b>	<b>113</b>
<b>FIGURA VIII-58. MEDIDAS EXPERIMENTALES 1 DE ABRIL.....</b>	<b>114</b>





# I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

En este primer capítulo se busca enmarcar y presentar la situación actual de las calderas de condensación, especialmente desde un punto de vista energético y se establecerán los principales objetivos de este trabajo. Para ello, se tratarán los siguientes puntos: motivación del trabajo, antecedentes y objetivos.

---

## I.1 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

El consumo de la energía primaria en los edificios en Europa representa, dependiendo de las condiciones climáticas, hasta un 25-40 %. Teniendo en cuenta dicha cantidad de energía consumida, una mejora y optimización de esta área es un factor clave para mejorar su uso. El aumento del rendimiento energético en el proceso de generación de agua caliente, derivado del uso de calderas de condensación, ha contribuido a reducir los consumos energéticos y, como consecuencia, ha disminuido el impacto ambiental. La condensación del vapor de agua contenido en los humos de escape de estas calderas dependerá directamente de factores que es necesario caracterizar, tales como: las condiciones ambientales: presión (altitud), humedad, etc., la composición del combustible, las condiciones de operación (índice de exceso de aire), etc. Además, la temperatura a la que se enfrían los gases de escape depende de las temperaturas del agua de impulsión y de retorno del sistema de calefacción, así como, de la temperatura de consigna del ACS. Por tanto, analizar el efecto de estos parámetros en el rendimiento de la caldera es esencial para reducir el consumo de combustible. Es decir, optimizando los valores de estos parámetros se minimizará la energía consumida para alcanzar las demandas de calefacción y de ACS requeridas. El presente trabajo tiene dos vertientes: una parte experimental y una parte teórica donde se desarrolla un modelo en Excel. El modelo teórico se valida con los resultados experimentales. Con el modelo validado se realizarán estudios paramétricos para analizar el efecto de los parámetros señalados anteriormente en el rendimiento de la caldera.

## I.2 ANTECEDENTES

Existen diversos autores que realizan estudios sobre calderas de condensación para analizar su potencial en el ahorro energético. Además, estos estudios no se limitan solamente al sector residencial, sino también a la industria.

Los autores, Chen et al. [33], analizan el efecto de incluir calderas de condensación en diferentes procesos en la industria. Además, en sus estudios identifican dos potenciales barreras que son: los posibles problemas de corrosión en la caldera, lo que deriva en la necesidad de utilizar materiales de prestaciones más elevadas y, por tanto, encarece el precio de los equipos y por otro lado, la variabilidad de la temperatura en el retorno. Finalmente, estos autores analizan el impacto del uso de diferentes combustibles en la caldera de condensación.

Por otro lado, V.M. Homutescu et al. [35], analizan el efecto de la combustión de metano enriquecido con hidrógeno en la recuperación de calor latente e impacto ambiental en las calderas de condensación. En sus estudios se observa que, al usar este combustible, tiene lugar un gran ahorro de energía debido al vapor de agua dentro de los gases de combustión. Además de mitigar las emisiones de carbono, el rendimiento de la caldera medido sobre el PCS aumentó en un 1,3% como consecuencia de la energía latente ahorrada, a medida que la fracción volumétrica de hidrógeno aumentó de 0% a 80%.

También cabe resaltar que los autores R.Trojanowski et al. [34], se encargaron de estudiar el uso de distintos polímeros que mejorase la eficiencia de este tipo de calderas, especialmente desde el punto de vista de la corrosión. El problema que se encontraba en el uso de polímeros para resistir la corrosión era su gran capacidad de aislamiento térmico, lo cual dificulta el proceso de transferencia de calor. Con estos nuevos estudios, los nuevos polímeros son capaces de resistir a la corrosión y aumentar en gran medida la conductividad térmica. Basando estos estudios en el uso de intercambiadores de calor de dichos polímeros en calderas de condensación, se consigue una conductividad térmica similar a la del acero inoxidable con un aumento aproximado en la conductividad térmica de 10 veces la del polímero base.

En torno a la primera mitad del siglo XX, se empezaron a usar en los hogares las calderas de carbón, utilizando el transporte de agua caliente en tuberías para llevar el calor por la casa. Sin embargo, este tipo de calderas eran muy poco eficientes.

Alrededor del año 1960 tuvieron su aparición por primera vez las calderas de gas, que se encargaban de calentar a través de un quemador y un serpentín por donde circulaba el agua. Las desventajas que presentaban estas calderas

atmosféricas eran muy grandes, puesto que liberaban gran cantidad de monóxido de carbono y, además, no calentaban lo suficiente [1].

Como consecuencia, se desarrollaron las calderas estancas. Éstas cuentan con chimeneas que permiten eliminar los gases perfectamente y aumentar la eficiencia en torno al 10%. A partir de este momento, las calderas de gas se perfeccionaron añadiéndolas un segundo serpentín donde aprovecharían la energía liberada en la condensación del agua de los humos. En este momento se habrían desarrollado las primeras calderas de condensación [1].

En el año 2017, un informe sobre el mercado de la calefacción publicado por Fegeca, la Asociación de Generadores y emisores térmicos de calefacción señalaba que las calderas de condensación eran el principal dispositivo individual de calefacción y de agua caliente sanitaria (ACS) elegido por los españoles. Esto se debe en gran medida, a su comportamiento ambiental y a su rendimiento energético [2].

En este mismo año, se instalaron en España 6,76% más calderas de condensación que el año anterior, una cifra que se encuentra en torno a las 280.000 calderas [2].

En el año 2019, las calderas murales de condensación aumentaron en un 4,32% respecto al año anterior, situándose en unas 330.000 unidades vendidas [3].

Otra de las grandes razones por las que ha aumentado crecientemente su utilización, es su aportación en la eficiencia energética de los edificios. En un solo dispositivo, permiten generar calor y ACS, además de aportar una gran flexibilidad en la utilización de otros emisores térmicos como suelo radiante, radiadores, etc. La sustitución de antiguas calderas que utilizan combustibles fósiles sólidos o líquidos por calderas de condensación alimentadas con gas natural ha mejorado notablemente el rendimiento energético en el calentamiento de agua, y de ahí el impacto ambiental [24]. Además, tal y como se puede observar en la figura I-1 [3], los costos de este tipo de calderas se compensan en pocos años:

## ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTA SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN



Figura I-1. Comparativa costos caldera tradicional frente a caldera de condensación

Más concretamente, en relación con la utilización de la caldera de condensación en España, cabe resaltar que en el año 2015 entró en vigor la Directiva ErP a través del Reglamento Europeo de Ecodiseño. Su principal objetivo era la implantación en el mercado de dispositivos con una mayor eficiencia energética, prohibiendo a partir de ese momento la fabricación de cualquier tipo de caldera de gas que no fuera de condensación. Esto se une a la publicación a nivel nacional en el año 2020 del nuevo Código Técnico de la Edificación, a través del cual se busca una mayor sostenibilidad y eficiencia energética en los nuevos edificios con una mayor presencia de fuentes renovables [3]. En la figura I-2 [30] se puede observar una comparativa de ventas de los equipos de producción en España durante los años 2017 y 2018:



Figura I-2. Comparativa de ventas en equipos de producción de calor en España

Como se señalaba anteriormente, el combustible mayoritario en la generación de agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción, además de en procesos industriales para abastecer demandas térmicas de la índole más variada, es el gas natural. La energía primaria derivada del consumo del gas natural representó, en el año 2020 [36] 138 exajulios, como se puede observar en el gráfico de la figura I-3. Dicho de otra manera, el consumo de energía primaria derivado del gas natural supuso, en 2020, el 24,7% de la demanda de energía primaria a nivel mundial

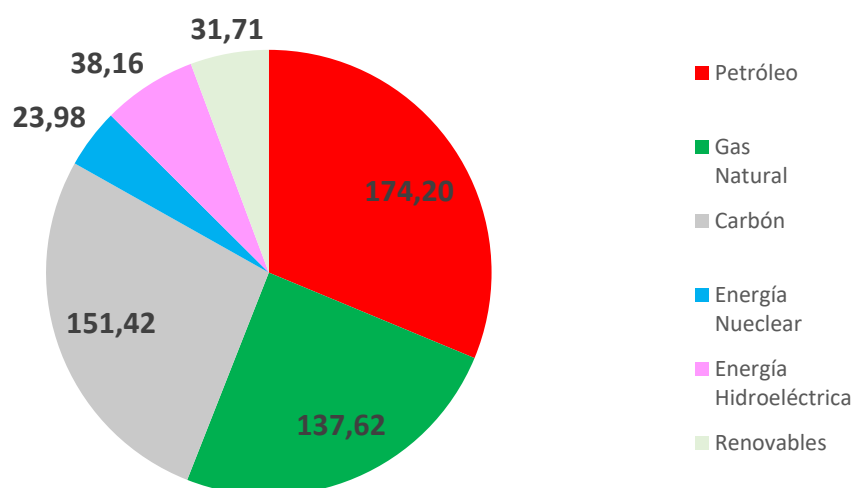


Figura I-3. Valores de consumo de energía primaria a nivel mundial por fuentes de energía para el año 2020

El gas natural se trata, desde el punto de vista de su composición, de un hidrocarburo cuyo principal componente es metano, aunque también suele tener otros componentes en proporción variable como etano, nitrógeno, butano, propano, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, mercaptanos (entre ellos metil-mercaptano, CH<sub>4</sub>S, para detectar el olor en caso de fuga) y trazas de hidrocarburos más pesados [4]:

- Metano (60-98 %)
- Etano (1-20 %)
- Propano (0,5-12 %)
- Butano (0,2- 5 %)
- Pentano (0,2-3 %)
- Dióxido de carbono (0-8 %)
- Nitrógeno (0-5 %)
- Ácido sulfhídrico (0-5 %)

Aunque aumentando el porcentaje de hidrógeno en el gas natural se consiguen menores emisiones de CO<sub>2</sub> [25], su composición la determina el proveedor y por tanto no se puede controlar.

Es considerada una de las fuentes energéticas más limpias y respetuosas con el medio ambiente, ya que es la fuente convencional que emite menos emisiones a la atmósfera. Además, es capaz de satisfacer la demanda energética en los sectores comercial, doméstico e industrial. Se trata de un pilar clave para lograr los objetivos impuestos por la Comisión Europea en la reducción de las emisiones que provocan efecto invernadero en España: alcanzar un 27% de las energías renovables y reducir en un 40% las emisiones de efecto invernadero para el año 2030 [4].

En la tabla I-1 [5] se recoge un resumen de las emisiones de los principales combustibles fósiles:

*Tabla I-1. Niveles de emisiones de distintos combustibles fósiles*

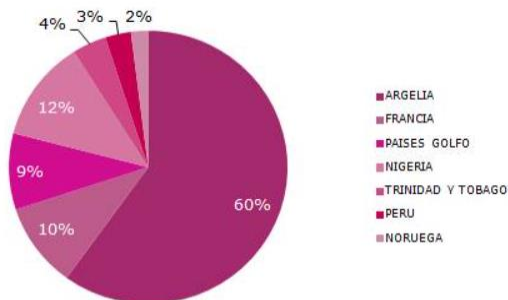
<b>Contaminantes (libras/Mbtu)</b>	<b>Gas Natural</b>	<b>Petróleo</b>	<b>Carbón</b>
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	117.000	164.000	208.000
Monóxido de carbono (CO)	40	33	208
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	92	448	457
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	1	1.122	2.591
Otras partículas	7	84	2.744
Mercurio	0	0,007	0,016

Otra ventaja asociada con la mejora de la eficiencia energética de los procesos que emplean gas natural como combustible es reducir la dependencia energética que mantiene España respecto de otros países, ya que, al no contar con un recurso propio, es necesario importarlo. Nuestro principal suministrador es Argelia, seguido de Nigeria, Francia, y los Países del Golfo [6], como se puede observar en la figura I-4 [5].

APROVISIONAMIENTOS DE GAS NATURAL EN ESPAÑA (TWh)

ORIGEN	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
NACIONAL	0,8	1,0	1,3	1,7	1,2	1,9	1,1	0,5	0,5	0,8
IMPORTACIONES	409,00	408,90	457,60	410,52	404,48	399,29	394,93	375,49	384,70	364,70
EXPORTACIONES	0,00	1,20	2,20	11,54	12,58	19,22	31,28	42,40	66,80	57,00
TOTAL SUMINISTROS NETOS	409,80	408,70	456,70	400,70	393,10	382,00	364,75	333,55	301,40	308,50
Total Aprovevisionamientos bcm	35,33	35,34	39,56	35,54	34,97	34,59	34,14	32,41	32,40	

Fuente: Sedigas



Fuente: Sedigas

Figura I-4. Aprovisionamientos de gas natural en España

## I.3 OBJETIVOS

El presente Trabajo Fin de Grado se realiza un estudio de los parámetros que afectan al rendimiento y a la cantidad de agua condensada en las calderas de condensación. Para ello se ha creado un modelo en el que se modifican parámetros que afectan al proceso de combustión. Además, el modelo se valida con datos tomados de una caldera real en funcionamiento. Finalmente se plantean relaciones estadísticas entre las variables. La metodología que se ha seguido se puede plantear, de forma resumida, en los siguientes ítems:

- Monitorización de una caldera de condensación de una vivienda durante varias semanas.
- Creación de un modelo teórico en Excel para simular las distintas combustiones.
- Modificación de las variables en el modelo y obtención de resultados.
- Análisis e interpretación de los resultados y datos obtenidos a través de un estudio ANOVA.
- Comparación de los resultados con las medidas experimentales.
- Valoración y conclusiones extraídas del análisis anterior.

Los objetivos que se tratan de alcanzar con el presente trabajo son:

- Estudiar cómo varían los parámetros de la caldera a partir de la modificación de las variables independientes establecidas.

- Recoger y analizar los datos de la caldera experimental para posteriormente compararla con los datos del modelo.
- Determinar en qué magnitud las variables independientes están relacionadas con el rendimiento de la caldera y con la masa de agua condensada.
- Obtención de los valores óptimos de funcionamiento en cuanto al rendimiento y la masa de agua condensada para unas condiciones ambientales establecidas.



## II. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

En este capítulo se presentan los principales conceptos teóricos necesarios para el desarrollo y entendimiento del presente trabajo. Se tratarán los siguientes puntos: combustión en combustibles gaseosos, propiedades de los combustibles gaseosos, tipos de combustión, parámetros característicos de los combustibles gaseosos, eficiencia de la combustión, composición de los humos, conceptos psicrométricos, intercambiadores de calor, descripción de los distintos tipos de calderas y funcionamiento de las calderas de condensación.

---

### II.1 COMBUSTIÓN EN COMBUSTIBLES GASEOSOS

La combustión se puede definir como la reacción de oxidación de un combustible. Sin embargo, para que pueda darse dicha reacción, han de cumplirse tres condiciones [7]:

- Presencia de combustible y comburente.
- Desarrollo de la mezcla de combustible y comburente (dosado en el medio donde se realiza la combustión) en una proporción adecuada.
- Aportación de una energía inicial, habitualmente denominada energía de activación.

El porcentaje de combustible en la mezcla debe superar el límite inferior de inflamabilidad y no debe ser mayor a un porcentaje denominado límite superior de inflamabilidad. Si la concentración de combustible (respecto al total o suma de combustible más aire) se encuentra fuera de este rango, se puede afirmar que no se producirá la combustión, ver figura II-1.

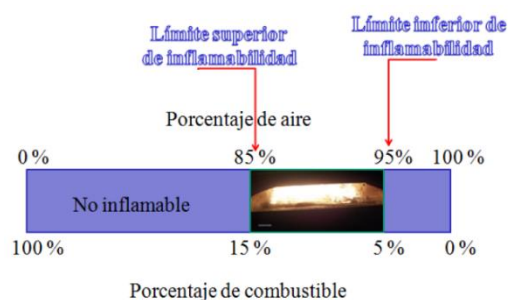


Figura II-1. Porcentajes de aire y de combustible en los que se produce una combustión

Algunos valores típicos de las concentraciones de los diferentes gases que componen el aire se muestran en la tabla II-1, [7]. Se puede concluir que, esencialmente, el aire está formado por dos componentes: el nitrógeno (78% en volumen) y el oxígeno (21% en volumen). El oxígeno es el comburente, el agente oxidante que oxidará el combustible. El nitrógeno, en primera aproximación y de forma habitual, se puede considerar como inerte (salvo a elevadas temperaturas, orientativamente por encima de 1400°C, donde puede descomponerse y formar óxidos de nitrógeno, NOx).

Tabla II-1. Composición del aire

Aire	% en volumen		% en peso	
	Real	Uso	Real	Uso
Nitrógeno	78.03	79	75.45	76.8
Oxígeno	20.99	21	23.2	23.2
Argón	0.94	0	1.3	0
CO <sub>2</sub>	0.03	0	0.05	0
Otros	0.01	0	despreciable	0
Peso molecular (Kg/Kmol)			28,967	0

Como se introducía anteriormente, la aportación de una energía inicial (energía de activación) es esencial para que tenga lugar el proceso de combustión. Esta energía de activación consigue ionizar los reactivos que, con dichas condiciones de presión y temperatura reciben el nombre de punto de ignición. Cuando la combustión evoluciona espontáneamente se habla de fase de propagación de la combustión [7], La combustión siempre consume esa energía de activación para poder mantenerse. Esa energía la reacción la obtiene de sí misma. Nótese que, la reacción de combustión es un proceso exotérmico (se genera energía térmica). Parte de la energía generada en la propia reacción la propia reacción la emplea para automantenerse.

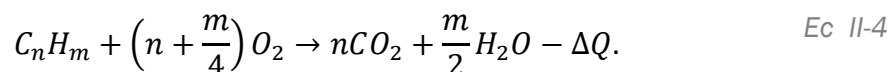
A consecuencia del proceso se forman los productos de combustión. Estos están formados mayoritariamente por H<sub>2</sub>O y el CO<sub>2</sub>. Sin embargo, se pueden formar un elevado número de productos tales como: SO<sub>x</sub> (si el combustible tiene restos de azufre), NO<sub>x</sub> (ya sea porque el combustible tiene N<sub>2</sub> o por la formación de NO<sub>x</sub> térmico donde se emplea el nitrógeno del aire previa termólisis), si se trabaja índices de exceso de aire bajos y/o el proceso de mezcla entre el combustible y el comburente es deficiente se tendrán inquemados a la salida de la caldera (no como producto porque será simplemente combustible que no ha reaccionado), inertes introducidos en la caldera con el comburente (N<sub>2</sub> fundamentalmente), cenizas, etc.

En las calderas, se usan combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. En el caso de la caldera de condensación estudiada en este trabajo, se emplea gas natural como combustible. Si se utilizan combustibles sólidos, una alternativa es que la combustión se realice vaporizando el combustible previamente [7], aunque existe una gran variedad de calderas comerciales que queman combustible sólido, tanto en industria como en el sector residencial.

De forma simplificada, considerando combustión completa (no hay inquemados) y que no se forman óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), se pueden considerar las siguientes reacciones químicas, tanto si se usa aire atmosférico como si se utiliza oxígeno puro (la única diferencia es que si se considerara aire atmosférico se debería considerar el flujo de nitrógeno (componente mayoritario) en los humos: [22]:



El proceso de combustión se puede expresar en una única ecuación, donde se resuelve el balance de materia por estequiometría. Por ejemplo, para el caso de un hidrocarburo C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, se puede expresar la reacción de combustión de la siguiente forma [7]:



Siendo ΔQ el término que refleja el carácter exotérmico de una reacción de combustión [40].

Un parámetro que permite clasificar los diferentes combustibles gaseosos en familias es el índice de Wobbe, que viene dado por la expresión:

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{\rho_r}} \quad [kJ/m^3] \quad \text{Ec II-5}$$

Dónde:

- PCS= poder calorífico superior del combustible  $[kJ/m^3]$ .
- $\rho_r$ = densidad relativa del gas respecto del aire.

Según el índice de Wobbe, los gases se agrupan en tres familias [7]:

- **Primera familia:** gases manufacturados con un índice de Wobbe superior comprendido entre 22,4 MJ/m<sup>3</sup> y 24,8 MJ/m<sup>3</sup>.
- **Segunda familia:** gases naturales y mezcla de hidrocarburos-aire con un índice de Wobbe superior comprendido entre 39,1 MJ/m<sup>3</sup> y 54,7 MJ/m<sup>3</sup>.
- **Tercera familia:** gases licuados del petróleo cuyo índice de Wobbe superior se encuentre entre 72,9 MJ/m<sup>3</sup> y 87,3 MJ/m<sup>3</sup>.

## II.2 PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

Las principales propiedades que caracterizan a los combustibles gaseosos se pueden clasificar inicialmente en propiedades físicas y en propiedades químicas.

### II.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS

Las principales propiedades físicas de los combustibles son:

- **Presión y temperatura de utilización:** presión y temperatura del gas suministrado a la caldera. En caso de que el suministro del gas se realice a media o alta presión.
- **Densidad:** se define la “densidad absoluta” de una sustancia gaseosa como la masa que tiene una unidad de volumen de dicho gas en unas determinadas condiciones de presión y de temperatura. La “densidad relativa” es la relación entre la densidad absoluta del gas y la densidad absoluta del aire, estando ambas en las mismas condiciones de presión y de temperatura (generalmente 0°C y 1 atm) [7]. Por lo tanto, esta densidad relativa viene dada por la expresión:

$$\rho_r = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{aire}} \quad \text{Ec II-6}$$

En la siguiente tabla se observan las densidades relativas de algunos gases combustibles [8]:

Tabla II-2. Densidad relativa de los gases combustibles

	Densidad	Densidad relativa
	Kg/Nm <sup>3</sup>	-
GN	0,828	0,63 (aire)
Propano	2,038	1,85 (aire)
Gasóleo	890	0,89(agua)

## II.2.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

Las principales propiedades químicas de los combustibles son:

- **Punto de ignición:** condiciones físicas de presión y temperatura necesarias para que la sustancia empiece a arder (se inicie el proceso de combustión) y se asegure el mantenimiento de su combustión sin necesidad de aportación de calor externa [7]. A presión atmosférica, las temperaturas de ignición de algunos combustibles se pueden observar en la tabla II-3 [7]:

Tabla II-3. Temperaturas de ignición a presión atmosférica

Combustible	Temperatura °C
Propano (comercial)	493 - 604
Butano (comercial)	482 - 538
Etanol	363
Gas natural	482 - 632
Gasolina	456
Hidrógeno	500
Madera blanda	320 - 393
madera dura	493 - 604

- **Análisis (%volumen):** tanto por cierto en volumen de los componentes del gas referidos a condiciones estándar (288,15 K y 1,01325 bar) [7].
- **Poder calorífico del combustible:** se denomina el poder calorífico como la cantidad de calor liberada en la combustión completa. El poder calorífico superior (Hs o PCS) es la energía liberada en la combustión completa habiéndose condensado el vapor de agua contenido en los humos. Esta situación es característica de las calderas de condensación [8].

El poder calorífico superior (Hi o PCI) es la energía liberada en la combustión completa cuando el agua es contenida en forma de vapor en los humos. Se trata de la situación más habitual [8],[7].

Los poderes caloríficos de los combustibles más usados en las calderas, y otros con potencial de utilización, se muestran en la tabla II-4, fuente IDAE:

Tabla II-4. Poder calorífico inferior (PCI) de algunos combustibles

Combustible	PCI (kWh/kg)
GNL	12,278
Gas natural	13,333
Metano	13,889
Etano	12,889
Gas de refinería	13,750
Gas de coquería	10,750
Gas de alto horno	0,686
Biogases en general	14,000
Biogás pobre	14,000
Biogás de vertedero	14,000
Biogás de depuradora	14,000

En el caso de las calderas de condensación, se pueden producir rendimientos de combustión instantáneos mayores del 100% sobre el P.C.I debido al aprovechamiento de la energía liberada en la condensación [7],[8].

La ecuación relaciona ambos poderes caloríficos se puede expresar como [9]:

$$PCI = PCS - m_{H_2O} \cdot \lambda \quad \text{Ec II-7}$$

Siendo:

- $PCI$ = poder calorífico inferior [ $KJ/Kg$  combustible].
- $PCS$ = poder calorífico superior [ $KJ/Kg$  combustible].
- $m_{H_2O}$ = masa de agua aportada por el combustible y/o generada en la combustión. [ $KgH_2O/Kg$  combustible].
- $\lambda$ = calor de vaporización del agua [ $KJ/Kg$ ].

En la tabla II-5 [8] se pueden observar las principales características químicas de algunos combustibles:

Tabla II-5. Características de los combustibles

COMBUSTIBLE	Hi	Hs	RD 61/2006 (Hi mínimo)	RD 61/2006 (Hs mínimo)	DIFERENCIA
	kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg
GAS NATURAL	13,05	14,43	-	-	1,38
PROPANO	12,82	13,92	12,56	13,84	1,10
BUTANO	12,69	13,74	12,44	13,72	1,06
GASÓLEO C	11,56	12,23	-	-	0,66

COMBUSTIBLE	PODER COMBURÍVORO		PODER FUMÍGENO HÚMEDO		PODER FUMÍGENO SECO	
	Nm <sup>3</sup> Aire/ kWh <sub>Hi</sub>	Nm <sup>3</sup> Aire/ kWh <sub>Hs</sub>	Nm <sup>3</sup> Hu- mos/ kWh <sub>Hi</sub>	Nm <sup>3</sup> Humos/ kWh <sub>Hs</sub>	Nm <sup>3</sup> Humos/ kWh <sub>Hi</sub>	Nm <sup>3</sup> Humos/ kWh <sub>Hs</sub>
GAS NATURAL	0,96	0,87	1,06	0,96	0,86	0,78
PROPANO	0,94	0,87	1,02	0,94	0,86	0,80
BUTANO	0,94	0,87	1,02	0,94	0,87	0,80
GASÓLEO C	0,92	0,87	0,98	0,92	0,87	0,82

COMBUSTIBLE	DIÓXIDO DE CARBONO		AGUA		DIÓXIDO DE AZUFRE		
	gCO <sub>2</sub> / kWh <sub>Hi</sub>	gCO <sub>2</sub> / kWh <sub>Hs</sub>	gH <sub>2</sub> O/ kWh <sub>Hi</sub>	gH <sub>2</sub> O/ kWh <sub>Hs</sub>	gSO <sub>2</sub> / kWh <sub>Hi</sub>	ppm <sup>1</sup>	gSO <sub>2</sub> / kWh <sub>Hs</sub>
GAS NATURAL	204	185	156	141	-		-
PROPANO	234	215	127	117	-		-
BUTANO	239	220	123	113	-		-
GASÓLEO C <sup>2</sup>	275	260	87	82	0,173	70	0,163

Notas:

1. ppm [=] cm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> humos secos. Recuérdese que:

$$ppm = ppm_{medio} \cdot \frac{21}{21 - O_{2-medido}}$$

En el analizador de gases se llama ppm<sup>corregido</sup>, es decir, ppm<sup>corregido</sup> = ppm.

2. RD 287/2001. Contenido de azufre en peso no superior al 0,1%.

### II.3 TIPOS DE COMBUSTIÓN

Se diferencian diferentes tipos de procesos de combustión:

- **Combustión completa:** combustión en la cual se oxidan totalmente todos los elementos que constituyen el combustible. No se forman inquemados [10].
- **Combustión incompleta:** aparecen inquemados ya que los componentes del combustible no se oxidan totalmente [10].
- **Combustión estequiométrica:** se trata de la combustión completa realizada con la cantidad exacta de oxígeno, por lo tanto, el aire empleado es el mínimo necesario que garantiza tener dicha cantidad de oxígeno para la oxidación completa de todos los componentes del combustible. El estudio de la combustión estequiométrica permite

definir los parámetros característicos de los combustibles que estudian posteriormente [10]:

- Aire mínimo para la combustión o poder comburívoro.
- Coeficiente de exceso de aire.
- Poder fumígeno.
- **Combustión con exceso de aire:** se utiliza una cantidad de oxígeno mayor a la estequiométrica.
- **Combustión con defecto de aire:** estas combustiones ocurren cuando se utiliza menos oxígeno del necesario (del estequiométrico). Están reguladas legalmente debido al peligro que presentan los inquemados originados, como es el caso del monóxido de carbono (CO) [7]. La inhalación de monóxido de carbono por parte de personas hace que el monóxido de carbono se fije en la hemoglobina formando la carboxihemoglobina. Cuando esto ocurre, los glóbulos rojos no pueden transportar el oxígeno en la sangre, pudiendo suponer la muerte si la exposición es prolongada.

## II.4 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS COMBUSTIBLES

Los principales parámetros característicos de los combustibles son: aire mínimo para la combustión completa (aire estequiométrico), coeficiente de exceso de aire y poder fumígeno.

### II.4.1 AIRE MÍNIMO PARA LA COMBUSTIÓN ( $V_a$ ).

También denominado como poder comburívoro del combustible ( $V_a$ ), el aire mínimo corresponde con la cantidad estequiométrica de aire que es necesaria para originar la combustión completa del combustible utilizado. Debido a que aparecen en pequeñas cantidades, no se tiene en cuenta la cantidad de este necesario para la formación de óxidos de nitrógeno  $NO_x$  [11]. Por lo tanto, se puede afirmar que el aire estequiométrico es un parámetro que depende únicamente de la composición del combustible. Si se modifica la composición del combustible se modifican la cantidad de aire comburente necesario y el volumen de humos producido. En la tabla II-6 [8] se observa el aire necesario de combustión para diferentes combustibles por unidad de energía:



Tabla II-6. Aire necesario de combustión por unidad de energía para algunos combustibles

COMBUSTIBLE	Nm <sup>3</sup> Aire/kWh <sub>HI</sub> (Nm <sup>3</sup> Aire /MJ <sub>HI</sub> )	Nm <sup>3</sup> Aire/kWh <sub>HS</sub> (Nm <sup>3</sup> Aire /MJ <sub>HS</sub> )
GAS NATURAL	0,96 (0,27)	0,87 (0,24)
PROPANO	0,94 (0,26)	0,87 (0,24)
BUTANO	0,94 (0,26)	0,87 (0,24)
GASÓLEO C	0,92 (0,26)	0,87 (0,24)

#### II.4.2 COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE (n)

En la gran mayoría de las combustiones en las calderas, la cantidad de aire presente será superior a la estrictamente necesaria para que se produzca la combustión. Esto se realiza para asegurar que todo el aire se mezcla con el comburente y, por tanto, sea susceptible de quemarse. Ajustar el índice de exceso de aire es obtener una solución de compromiso: si se aumenta en índice de exceso de aire favorece el proceso de mezclado, pero se disminuye la temperatura de los humos y, por ende, el rendimiento de la caldera.

A la diferencia entre el aire con el que opera la caldera y el aire estequiométrico se le denomina aire en exceso. Este valor normalmente se expresa en tanto por ciento, Al cociente entre el aire realmente introducido y el aire mínimo se denomina coeficiente de exceso de aire(n) [11]:

$$n = \frac{A_r}{A_m} \quad \text{Ec II-8}$$

Como valor orientativo, los valores usuales de coeficientes de exceso de aire suelen oscilar entre los siguientes valores [11]:

- Combustibles líquidos: 1,1 - 1,2.
- Combustibles sólidos: 1,5 - 2.
- Combustibles gaseosos: 1 - 1,1.

Como conclusión fundamental y como se indicaba anteriormente, cuanto mayor es este índice de exceso de aire, menor número de inquemados y de restos de combustión habrá. Sin embargo, cuanto más se aleje de la unidad, mayor será el caudal de humos y las pérdidas en estos [11].

#### II.4.3 PODER FUMÍGENO (V<sub>h</sub>)

Se trata del volumen de los productos de la combustión completa, y sin exceso de aire, de la unidad de combustible.

Se puede expresar como [8]:

$$V_h = \frac{N_{m^3} \text{ humos}}{N_{m^3} \text{ combustible}} = \frac{N_{m^3} \text{ humos}}{Kg \text{ combustible}} \quad \text{Ec II-9}$$

En la tabla II-7 se puede observar el volumen de humos producido durante la combustión de algunos combustibles [8]:

*Tabla II-7. Volumen de humos producido durante la combustión de algunos combustibles*

COMBUSTIBLE	Nm <sup>3</sup> Humos/kWh <sub>HI</sub>	Nm <sup>3</sup> Humos/kWh <sub>HS</sub>	kgCO <sub>2</sub> / Kg combustible	gco <sub>2</sub> /kWh <sub>HI</sub>	gco <sub>2</sub> /kWh <sub>HS</sub>	gH <sub>2</sub> O/ kWh <sub>HI</sub>	gH <sub>2</sub> O/kWh <sub>HS</sub> (gH <sub>2</sub> O/MJ <sub>HI</sub> )
GAS NATURAL	1,06	0,96	2,66	204	185	156	141 (43,25)
PROPANO	1,02	0,94	3	234	215	127	117(35,15)
BUTANO	1,02	0,94	3,03	239	220	123	113 (34,08)
GASÓLEO C	0,98	0,92	3,18	275	260	87	82 (24,07)

## II.5 EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

Para analizar la eficiencia de una combustión se plantea un balance de energía comparando la energía térmica liberada en la combustión y la masa de combustible utilizado (energía aportada). Por ello, este balance vendrá expresado en KJ/Kg de combustible quemado.

En un proceso de combustión, los términos más representativos del balance energético son [7]:

- **Calor nominal del combustible (Q<sub>n</sub>):** se trata del máximo calor que es liberado por el combustible, tomando como base el PCI.
- **Calor útil (Q<sub>u</sub>):** referido a procesos de convección es el producto del flujo másico por la diferencia de entalpía.

El cociente de los dos términos anteriores determina el rendimiento de la caldera (y la diferencia entre ambos térmicos representa las pérdidas que se producen en la caldera).

Las pérdidas totales comentadas anteriormente se pueden desglosar en cada una de sus principales componentes:

- Pérdidas de calor en humos.
- Pérdidas de calor por inquemados en las cenizas.
- Pérdidas por inquemados en los gases.

### II.5.1 PÉRDIDAS DE CALOR EN HUMOS ( $P_s$ )

Las pérdidas de calor en los humos de la combustión están originadas a consecuencia de la diferencia de temperatura a la que estos salen a la atmósfera con respecto al ambiente, y a su correspondiente entalpía. En la mayoría de las calderas esta temperatura de los humos no es aprovechable si no se desea aprovechar el calor latente del agua (todavía en fase vapor) de los humos. Condensar parte del contenido de agua en los humos enfriando más los humos de la caldera supone una contribución de energía adicional que puede ser aprovechada en una caldera de condensación. Cuanto mayor sea el flujo de aire (mayor índice de exceso) y mayor sea la temperatura de los humos, mayor serán estas pérdidas [7].

Para cuantificar estas pérdidas en porcentaje se utilizará [7]:

$$P_s = \frac{M_H \cdot C_{p_H} \cdot (T_H - T_{ref})}{P.C.I} \cdot 100 \quad \text{Ec II-10}$$

Donde:

- $M_H$  es la masa de humos en base seca por Kg de combustible [ $Kg/Kg$ ].
- $C_{p_H}$  es el calor específico de los humos [ $KJ/Kg^{\circ}C$ ]. A altas temperaturas podría ser estimado por el calor específico del aire. Sin embargo, lo más usual es calcularlo a través del calor específico de cada componente y su porcentaje presente en los humos, tal y como se indica en la norma UNE 9205:198794.
- $T_H$  es la temperatura de los humos [ $^{\circ}C$ ].
- $T_{ref}$  es la temperatura de entrada de los productos [ $^{\circ}C$ ].
- $P.C.I$  es el poder calorífico inferior del combustible [ $kj/Kg$ ].

### II.5.2 PÉRDIDAS DE CALOR EN LOS INQUEMADOS DE LAS CENIZAS

En este trabajo no se consideran las pérdidas de calor por inquemados porque los modelos teóricos están considerando que la combustión es completa (no hay inquemados).

### II.5.3 PÉRDIDAS POR INQUEMADOS EN LOS GASES ( $P_i$ )

Se presencian estas pérdidas cuando parte de los gases de combustión no se queman y, por tanto, salen con los humos y/o ceniza. El parámetro que nos indica estas pérdidas se calcula de la siguiente manera [7]:

$$P_i = \frac{VH_s \cdot \sum_i^n (inq)_i \cdot \rho_{inq} \cdot P.C.I_{inq}}{P.C.I} \cdot 100 \quad \text{Ec II-11}$$

Donde:

- $VH_s$ : volumen de humos secos [ $m^3/Kg$  combustible].
- $(inq)$ : concentración volumétrica del inquemado [ $m^3/m^3$  humos].
- $\rho_{inq}$ : densidad del CO en condiciones normales [ $Kg/m^3$ ].
- $P.C.I$ : poder calorífico del inquemado [ $KJ/Kg$ ].

Debido a que las concentraciones de CO en los humos son muy pequeñas, se tomarán estas pérdidas como despreciables.

Una vez visto todo lo anterior, se define el rendimiento de la combustión como [7]:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_n} = \frac{Q_n - \sum \text{pérdidas}}{Q_n} = 1 - \frac{P_s}{P.C.I} \quad \text{Ec II-12}$$

## II.6 COMPOSICIÓN DE LOS HUMOS (EMISIONES DE GASES)

De acuerdo con lo que se comentaba anteriormente, la combustión generará unos productos que se expulsarán de la caldera a través de la chimenea en forma de humos. De todos los componentes que se expulsan, dará más importancia a dos de ellos: los óxidos de nitrógeno  $NO_x$  y el monóxido de carbono CO debido a que son dos contaminantes cuya formación se puede minimizar ajustando parámetros de operación de la caldera.

### II.6.1 ÓXIDOS DE NITRÓGENO ( $NO_x$ )

Los óxidos de nitrógeno se forman como subproducto de la reacción del  $N_2$  contenido en el aire comburente o del propio combustible con el oxígeno a alta temperatura de la llama [8].

Estos  $NO_x$  disueltos en los humos, se podrían convertir en ácido nítrico  $HNO_3$  si se combinan con el vapor de agua de la atmósfera. Si precipitaran formarían la dañina lluvia ácida.

Los principales factores que afectan a la formación del  $NO_x$  son [8]:

- **La temperatura de la llama:** a partir de una temperatura de llama de  $1300^\circ C$  la formación de éstos aumentan progresivamente, tal y como

se puede observar en la figura II-2 [8]. Hasta 1000° el porcentaje de formación de NO<sub>x</sub> es bajo.

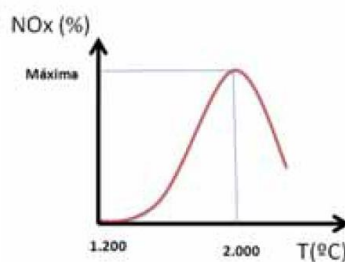


Figura II-2. Producción de emisiones de NO<sub>x</sub> en función de la temperatura de llama

- **La proporción de oxígeno en la zona de reacción o presión parcial de este:** cuanto menor sea esta proporción, menos NO<sub>x</sub> se formarán.
- **El tiempo de permanencia de los gases de combustión en zonas a altas temperaturas:** menos NO<sub>x</sub> se formarán cuanto menor sea el tiempo de permanencia.

En el caso particular de las calderas de condensación, la mayoría de los fabricantes de quemadores han optado por una recirculación de parte de los productos de combustión. Esta recirculación provoca una reducción de la temperatura de llama, limitando los NO<sub>x</sub> formados.

En el caso de este trabajo, las temperaturas alcanzadas en la combustión son altas, en torno a 2000°C. Realizando mediciones en el pH del agua condensada se puede apreciar que el pH es muy ácido (entre valores de pH de 2 y 3). Una posible justificación deriva de que, los NO<sub>x</sub> formados se solubilizan en el agua condensada. Después, los óxidos de nitrógeno reaccionan con la propia agua formando ácido nítrico, acidificando el agua. Esto tiene dos implicaciones: la primera implicación es que las formaciones de NO<sub>x</sub> en la caldera podrían ser mayores que las medidas en los humos a la salida de la misma (ya que parte de los NO<sub>x</sub> se habrían solubilizado en el agua previamente). La segunda implicación es que si el agua se acidifica se debe tratar antes de ser gestionada como un efluente y verterse al medio natural.

Según el RITE, en su IT 1.3.4.1.3.1 *Evacuación de los productos de combustión* señala que, en las instalaciones térmicas de edificios ya existentes, deberán tener unas emisiones de NO<sub>x</sub> de clase 5 cuando se instalen calderas individuales de gas con emisión por fachada [8]. La clasificación de la concentración límite de NO<sub>x</sub> en función de la clase, se puede observar en la siguiente tabla [8]:

Tabla II-8. Concentración límite de NO<sub>x</sub> para cada clase

CLASE DE NO <sub>x</sub>	Concentración límite de NO <sub>x</sub> (MG/kWh)
1	260
2	200
3	150
4	100
5	70

## II.6.2 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Respecto al monóxido de carbono (CO), cabe destacar que se trata del principal inquemado que aparece una combustión incompleta y uno de los gases más tóxicos y mortales en ciertas concentraciones para el ser humano.

La norma UNE EN 15378 *Sistemas de calefacción en los edificios. Inspección de calderas y sistemas de calefacción* establece unos valores límite de emisiones de referencia de CO para las instalaciones *in situ* a la espera de tener unas referencias nacionales [8].

Tabla II-9. Umbrales de emisiones de referencia de CO marcados por la norma UNE EN 15378 para instalaciones *in situ*

COMBUSTIBLE	[CO] <sub>SECO</sub> (ppm <sup>1</sup> )
Gas natural	<100
Hidrocarburos ligeros y gasóleo C	<50

<sup>1</sup>ppm [=]cm<sup>3</sup>CO/m<sup>3</sup> humos secos

## II.7 CONCEPTOS PSICROMÉTRICOS

A continuación, se desarrollan algunos conceptos básicos relacionados con la disciplina de psicrometría que serán utilizados en etapas posteriores del trabajo. Estos esencialmente son conceptos relacionados con: presión, temperatura y humedad [7]:

Conceptos relacionados con la presión:

- **Presión total o Presión atmosférica (P<sub>Atm</sub>):** es la presión a la que se encuentra la mezcla que forma el aire húmedo [7]. Se trata de una consecuencia del peso del aire que se encuentra por encima de un punto determinado, lo cual está relacionado con la altitud sobre el nivel del mar. Para relacionar la presión atmosférica con la altitud sobre el nivel del mar se dispone de la siguiente ecuación:

$$P_{Atm} = 101300 \cdot e^{-0,0001184H}$$

Ec II-13

Siendo:

- $H$ : la altitud sobre el nivel de la mar [ $m$ ].
  - $P_{Atm}$ : presión atmosférica medida [ $Pa$ ].
- **Presión parcial del aire seco ( $P_{as}$ ) y del vapor de agua ( $P_v$ ):** considerando que la mezcla se comporta como gas ideal, la presión parcial de un gas en una mezcla es considerada como la presión ejercida por ese gas al ocupar él sólo el mismo volumen a la misma temperatura. Se trata, por tanto, de la fracción molar de gas con la que contribuye este gas en la presión total [7].

La Ley de Dalton es la utilizada para calcular la presión parcial de un gas. Ésta dicta que el producto de la presión total de un gas por la fracción molar de ese mismo gas en la mezcla ( $x_i$ ) es igual a la presión total. Además, esta fracción molar del gas en la mezcla coincidirá con el valor del “tanto por uno” ya que se considera condiciones normales y, por lo tanto, todos los moles de los gases ocupan el mismo volumen (22,4 L). La ecuación de la Ley de Dalton es:

$$P_i = P_{total} \cdot x_i$$

Ec II-14

Siendo:

- $P_{total}$ : presión total de un gas [ $Pa$ ].
  - $x_i$ : fracción molar del gas en la mezcla.
- **Presión de saturación ( $P_{sat}$ ):** presión alcanzada en la zona de vapor en un recipiente con agua cuando se alcanza el equilibrio termodinámico entre la fase vapor y fase líquida, para una temperatura determinada.

Para calcular esta presión de saturación, además de tablas, la ecuación que relaciona la presión de saturación con la temperatura es la llamada ecuación de Antoine [29]:

$$P_{Sat} = 10^{\left(A - \frac{B}{C+T}\right)}$$

Ec II-15

Siendo:

- $P_{Sat}$ : presión de saturación del agua [ $mmHg$ ].
- $T$ : temperatura [ $^{\circ}C$ ].

- $A, B$  y  $C$ : constantes de Antoine. Para el agua entre  $1^{\circ}\text{C}$  y  $99^{\circ}\text{C}$ :  
 $A = 8,07131, B = 1730,63$  y  $C = 233,426$ .

Conceptos relacionados con la temperatura:

- **Temperatura seca ( $T$  o  $T_s$ ):** se trata de la temperatura a la que se encuentra el aire. Esta temperatura es medida sin tener en cuenta la velocidad del aire ni la humedad relativa. Además, la radiación calorífica de los cuerpos que se encuentran próximos a la misma temperatura del aire tampoco afecta a esta, por lo que se considera un apantallamiento radiante [16].
- **Temperatura de rocío ( $T_r$ ):** la temperatura del punto de rocío se trata de la máxima temperatura a la que se puede enfriar el aire sin que se produzca una condensación del vapor [17]. Asimismo, también se define como la temperatura del aire húmedo saturado de una muestra de aire húmedo que tiene la misma humedad específica a la misma presión atmosférica [7].

Para el caso de una determinada composición de aire húmedo, la temperatura de rocío se puede calcular igualando la presión de saturación (ecuación de Antoine) con la presión parcial del agua en fase vapor de la mezcla (ley de Dalton) [7].

En el caso de una caldera de condensación, esta temperatura será determinante para el rendimiento y la recuperación de calor en la caldera, ya que cuanto más alta sea esta temperatura, más sencillo será enfriar los gases por debajo de esta temperatura para que condense el vapor de agua disuelto en estos [16].

- **Temperatura de saturación adiabática ( $T_{\text{SatAd}}$ ):** es la temperatura del aire saturado adiabáticamente, o la temperatura que alcanza el aire a la salida del túnel aislado (adiabático) sin intercambio de calor con el exterior, en el que el aire húmedo que entra se pone en contacto con agua pulverizada, recirculada desde un depósito teóricamente sin consumo de energía externo [7].

Debido a que la medición de esta temperatura es compleja, se suele tomar la aproximación de considerar el valor de esta temperatura igual a la temperatura de bulbo húmedo.

Conceptos relacionados con la humedad:

- **Humedad Absoluta ( $H_a$ ):** se define como la cantidad de vapor de agua contenida en un determinado volumen de aire seco. Se calcula a partir de la siguiente expresión [18]:



$$H_a = \frac{M_v}{V_{as}} = \frac{\text{masa vapor de agua}}{\text{volumen de aire seco}} \left[ \frac{g}{m^3} \right] \quad \text{Ec II-16}$$

- **Humedad Específica (X):** se trata de la cantidad de vapor de agua que hay en la unidad de masa de aire seco. Presenta un valor máximo debido a que la cantidad de vapor de agua presente en el aire se relaciona con la presión de vapor. Este valor límite de máximo contenido es lo que se denomina humedad a saturación (equivalente a la presión de saturación para la temperatura del aire).

Se pueden diferenciar distintos estados de aire húmedo en función del contenido de humedad específica del aire. De esta manera se tiene aire no saturado con una humedad específica inferior a la de saturación, aire saturado cuando se encuentra vapor de agua y aire sobresaturado cuando la humedad específica es superior a la máxima de saturación. Para cada uno de esos estados el agua se encuentra: en estado líquido en suspensión (niebla) cuando el aire está sobresaturado, O en estado vapor cuando el aire se encuentra saturado (o por debajo de la saturación).

Para calcular la humedad específica a partir de la presión de vapor, se considera que el vapor de agua y el aire seco se comportan como gases ideales. Partiendo de la definición de humedad específica [7]:

$$X = \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{\text{masa vapor de agua}}{\text{masa de aire seco}} \left[ \frac{Kg_{\text{vapor de agua}}}{Kg_{\text{aire seco}}} \right] \quad \text{Ec II-17}$$

Bajo la hipótesis de gas ideal:

$$P_v = n_v RT \quad \text{Ec II-18}$$

$$P_{as} = n_{as} RT \quad \text{Ec II-19}$$

Para un peso molecular del aire de 28,97 g/mol y desarrollando cada uno de los términos en función de su presión parcial se obtiene:

$$\begin{aligned} x &= \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{(P_v \cdot PM_{H_2O}) / (R \cdot T)}{(P_{as} \cdot PM_{as}) / (R \cdot T)} && \text{Ec II-20} \\ &= \frac{P_v \cdot PM_{H_2O}}{(P_{total} - P_v) \cdot PM_{as}} \\ &= 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_{total} - P_v} \end{aligned}$$

- **Humedad Relativa:** se puede definir como la relación existente entre la cantidad de vapor contenida en el aire y la máxima cantidad de aire que podría contener a esa temperatura. El vapor de agua que se encuentra en el aire húmedo presenta una determinada presión parcial  $p_v$ . En el caso de que el aire estuviera saturado de humedad a la misma temperatura se tendría la presión parcial  $p_{vsat}$ . Al cociente entre ambas presiones parciales se denomina humedad relativa (HR) [7]:

$$HR = 100 \cdot \frac{P_v}{P_{vsat}} (\%) \text{ (a } T_s \text{ constante)} \quad \text{Ec II-21}$$

Debido a su capacidad para cuantificar cuánto más vapor puede admitir el aire, esta propiedad es una de las más utilizadas para caracterizarlo teniendo en cuenta que depende de la presión de saturación a la temperatura a la que se encuentra el aire, por lo que se trata de una variable relativa [7].

## II.8 INTERCAMBIADORES DE CALOR: DIFERENCIA MEDIA LOGARÍTMICA DE TEMPERATURAS ( $\Delta T_{DMLT}$ )

Desde que se produce la combustión, hasta que los gases de escape (los humos) abandonan la caldera se produce una serie de mecanismos de transmisión de calor. Las pérdidas de una caldera son en parte consecuencia de esos mecanismos de transmisión de calor. Cuando se produce la combustión en el hogar de la caldera, existe un intercambio convectivo radiante entre los humos y el material refractario del hogar de la caldera. La temperatura de los humos a la salida del hogar (a la entrada del intercambiador humos - agua) es una consecuencia directa de ese intercambio convectivo radiante. Una manera simplificada de poder calcular esa temperatura es considerar que la temperatura de los humos a la salida del hogar coincide con la temperatura adiabática de llama. La temperatura adiabática de llama sería la temperatura máxima que los humos podrían alcanzar a la salida del hogar. En la realidad esa temperatura siempre será menor ya que se producen pérdidas en la caldera que derivan de la transmisión de calor que se produce desde la envolvente de la caldera hacia el ambiente. Estas pérdidas no se tienen en cuenta en el cálculo de la temperatura adiabática de llama (en el cálculo de la temperatura adiabática de llama se considera que todo el calor generado en la combustión se interviene en calentar los humos, es decir, se considera que el sistema es adiabático).

Posteriormente, los humos intercambian calor con en un intercambiador. Pero en el interior de los tubos del intercambiador se calienta el agua (ya sea de

calefacción o de ACS) hasta la temperatura de consigna. Los mecanismos de transmisión de calor que intervienen en el cálculo y caracterización del intercambiador son esencialmente: convección (en el interior y en el exterior de los tubos, en el lado agua y lado aire) y conducción.

Los cálculos de intercambiadores (incluidos los intercambiadores de las calderas) se modelan, desde un punto de vista térmico, siguiendo dos métodos:

- **Método DMLT:** por sus siglas, método de **diferencia media logarítmica de temperaturas**. Es el método que se emplea en este trabajo y que se desarrolla posteriormente.
- **Método NUT:** por sus siglas, método del **número de unidades de transferencia**. Es un método empleado cuando se desconocen, o no se pueden calcular, las temperaturas de salida de la caldera. No obstante, en el modelo desarrollado en este trabajo se estima la temperatura de salida de la caldera a partir de datos experimentales.

Como se señalaba anteriormente, en este trabajo se desarrolla el método DMLT para el cálculo del intercambiador de la caldera. A través de este método se podrá calcular la diferencia media logarítmica de temperatura y posteriormente el calor intercambiado. La diferencia media logarítmica de temperaturas es un valor promedio de las diferencias de temperatura entre el fluido caliente y el frío en cada sección del intercambiador, cuando se considera toda la sección de éste, estando, por tanto, comprendida entre los valores extremos que alcancen estas diferencias en el interior del intercambiador, valores extremos que coinciden las diferencias terminales [7].

El cálculo de la temperatura media logarítmica de temperaturas requiere conocer los perfiles de temperatura a lo largo del intercambiador. Los perfiles dependen del sentido de avance relativo de los flujos pudiendo clasificarse en dos tipos: equicorriente (los humos y el agua avanzan en el mismo sentido dentro del intercambiador) y contracorriente (los humos y el agua avanzan en sentidos contrarios dentro del intercambiador), ver figuras II-3 y II-4, [7]

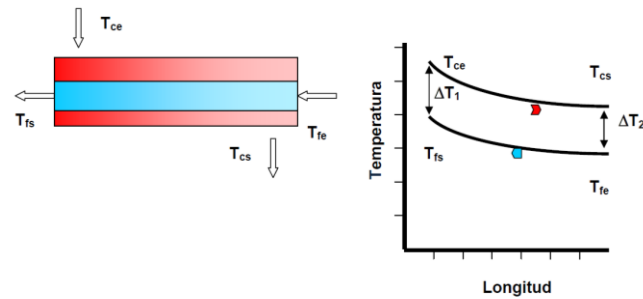


Figura II-3. Distribución de la temperatura en un intercambiador de dos corrientes en contracorriente

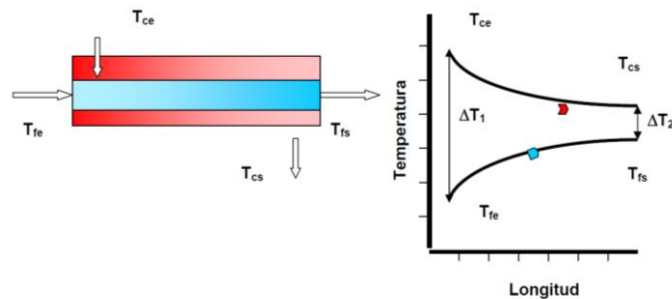


Figura II-4. Distribución de temperatura en un intercambiador de dos corrientes en equicorriente

El flujo de calor intercambiado se calculará con esta diferencia media multiplicada por el área de intercambio y por el coeficiente global real de intercambio.

La expresión que permite calcular la **diferencia media logarítmica de temperatura** (DMLT), representada por  $\Delta T_{lm}$  es [7]:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \text{Ec II-22}$$

La expresión del flujo de calor intercambiado será, por tanto:

$$\dot{Q} = \Delta T_{lm} \cdot U \cdot A \quad \text{Ec II-23}$$

Siendo:

- $U$ : coeficiente global de intercambio,  $[W/(m^2 \cdot k)]$ .
- $A$ : área de intercambio,  $[m^2]$ .

Además, en los intercambiadores de calor se verifica que el flujo de calor cedido por el fluido caliente será adoptado por el fluido frío [7],[18]:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{caliente} \cdot c_{p_{caliente}} \cdot (T_{ce} - T_{cs}) \quad Ec \text{ II-24}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{frío} \cdot c_{p_{frío}} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad Ec \text{ II-25}$$

Dónde:

- $\dot{m}$ : flujo másico de cada uno de los fluidos, [kg/s].
- $c_p$ : calor específico (a presión constante) de cada uno de los fluidos, [J/(kg · K)].
- $T_{ce}$ : temperatura del fluido caliente a la entrada, [°C].
- $T_{cs}$ : temperatura del fluido caliente a la salida, [°C].
- $T_{fs}$ : temperatura del fluido frío a la salida, [°C].
- $T_{fe}$ : temperatura del fluido frío a la entrada, [°C].

Por último, se expresa la efectividad, ( $\varepsilon$ ), del intercambiador a partir de [7]:

$$\varepsilon = \frac{(\Delta T_{mayor})}{(T_{ce} - T_{fe})} \quad Ec \text{ II-26}$$

## II.9 DESCRIPCIÓN

En el siguiente punto se estudiarán los principales tipos de calderas, así como también las partes y el funcionamiento específico de las calderas de condensación junto con ciertas aplicaciones.

### II.9.1 INTRODUCCIÓN A LAS CALDERAS: CARACTERÍSTICAS Y DATOS FUNDAMENTALES

El conjunto caldera-quemador se encarga de generar unos humos a un nivel térmico suficiente para posteriormente enviarlo a los puntos que sean necesarios y abastecer ciertas demandas térmicas. El quemador es el elemento encargado de realizar la mezcla aire-combustible y, además, de realizar la combustión tras la mezcla. Aunque con el quemador se puede regular la llama, la llama y la combustión se llevan a cabo en el hogar de la caldera. Posteriormente, tiene lugar el intercambio humos-agua en el intercambiador de la caldera.

Las calderas cuyo fluido caloportador es agua caliente son [12]:

- Caldera estándar.
- Caldera de baja temperatura.
- Caldera de condensación.

Junto con lo mencionado anteriormente, algunos de los datos fundamentales para definir una caldera son:

- **Potencia nominal:** máxima energía por unidad de tiempo aportada por el combustible, una vez la caldera está a régimen. Es igual a la potencia útil de la caldera, dividida por el rendimiento global, en las condiciones establecidas por las normas, o en su defecto, por el fabricante en su catálogo [7].
- **Potencia útil instantánea o producción de calor máximo continua:** energía térmica neta, por unidad de tiempo, entregada por la caldera al fluido caloportador en las condiciones de funcionamiento que se establezcan [7].
- **Presión de diseño:** máxima presión de trabajo a la temperatura de diseño [11].
- **Presión de timbre:** máxima presión de servicio que puede alcanzar la caldera a la temperatura de servicio [11].
- **Presión de prueba:** valor de la presión a que debe someterse la caldera, elemento, o sector de un sistema para comprobar su estanqueidad [11].
- **Presión máxima de servicio:** presión límite a la que se quedará sometido el aparato una vez conectado a la instalación receptora [11].
- **Temperatura de diseño:** temperatura prevista en las partes metálicas sometidas a presión, en las condiciones más desfavorables de trabajo [11].
- **Temperatura de servicio:** temperatura alcanzada en los fluidos utilizados en los aparatos, en condiciones normales de funcionamiento [11].
- **Superficie de calefacción:** superficie de intercambio de calor en contacto con el fluido transmisor. A su vez se subdivide en [11]:
  - Superficie de radiación: valor que corresponde a las superficies radiantes del hogar, la proyectada de las paredes del hogar en calderas acuotubulares y la correspondiente a la de las cámaras del hogar en calderas piro-tubulares [11].
  - Superficie de convección: superficie bañada por el fluido transmisor y que corresponde a las zonas que no se encuentran expuestas a la llama [11].

- **Producción de calor:**
  - Mínima.
  - Máxima continua.
  - Punta y duración.

### II.9.2 TIPOS DE CALDERAS

La clasificación de los tipos de caldera más representativa para el presente trabajo se establece en cuanto al fluido caloportador usado [7]:

- **Caldera de fluido térmico:** cualquier caldera que no utilice agua como fluido de transporte (por ejemplo, aceite térmico).
- **Caldera de vapor:** aquella que utiliza vapor de agua como medio de transporte o fluido caloportador.
- **Caldera de agua sobrecalentada:** caldera en la que el agua utilizada se encuentra a una temperatura mayor de 110°C.
- **Caldera de agua caliente:** cualquier tipo de caldera que utilice agua como medio de transporte con una temperatura menor a 110°C. Además, atendiendo también a la recuperación latente de los humos se pueden encontrar tres tipos:
  - Estándar.
  - Baja temperatura,  $T_{\text{agua}} < 60^\circ\text{C}$ .
  - Condensación,  $T_{\text{humos}} < 60^\circ\text{C}$ .

Tanto la presión como la temperatura del fluido caloportador van a caracterizar la caldera a utilizar, por ello se recoge en tablas las presiones y temperaturas de uso en cada tipo de caldera [29]:

*Tabla II-10. Rangos de presión y temperatura en los que se utiliza cada caldera [29]*

	Baja P Baja T	Media P Media T	Baja P Alta T	Media P Alta T	Alta P Alta T
Caldera de A.C.	X				
Caldera de A.S.C.C	X				
Caldera de F.T.	X		X	X	
Caldera de vapor	X	X		X	X

### II.9.3 CALDERAS ESTÁNDAR

Normalmente están constituidas por fundición negra. El intercambio de calor producido se realiza por un contacto directo de los humos con el tubo del agua [30].

Para que no se produzcan problemas de corrosión asociados a la aparición de condensados que provoquen la aparición de ácido sulfúrico y carbónico, estas calderas trabajan con una temperatura de retorno del agua que se encuentran en torno a los 55°C-60°C. Como consecuencia, se está trabajando la mayor parte del tiempo con unas temperaturas de retorno mayores a las necesarias, por lo que se producen elevadas pérdidas y el rendimiento estacional de esta caldera no suele ser muy elevado. Además, impiden ajustar la temperatura de la caldera a las demandas puntuales de la instalación [30].

### II.9.4 CALDERAS DE BAJA TEMPERATURA

A diferencia de las calderas estándar, las calderas de baja temperatura pueden trabajar con temperaturas de retorno de agua menores y ajustarse mejor a la demanda de la instalación, ya que evitan la aparición de condensados y como consecuencia, de posteriores corrosiones. Esta mayor resistencia a la corrosión se consigue incrementando la resistencia térmica mediante la utilización de fundición gris [30].

Presentan un ahorro energético en torno al 10%-20% respecto a la estándar [30].

### II.9.5 CALDERAS DE CONDENSACIÓN

Este tipo de caldera es en la que se centra este trabajo. Su mejora respecto a las tecnologías anteriores se basa en hacer que se produzca la condensación de parte del vapor de agua presente en los humos de escape para aprovechar el calor latente asociado a dicho cambio de fase. A través de este proceso, se consigue aumentar el rendimiento y reducir el consumo de combustible [30], [8], [7]. El principal combustible utilizado en este tipo de calderas es el gas natural. Sin embargo, también cabría la posibilidad de utilizar gasóleo.

Están formadas de materiales muy resistentes a la corrosión, como el acero inoxidable con alta aleación porcentual de Cr, Ni y Mo, ya que el agua condensada presenta un valor de pH muy ácido [30].

El ahorro energético que supone la utilización de una caldera de condensación de gas natural respecto de una estándar se encuentra en torno al 35% [30].



Se considerará que una caldera es oficialmente de condensación según la definición de la Directiva de rendimientos 92/42/CE y su transposición según R.D. 275/1995 cuando esté diseñada para condensar de forma permanente una parte importante del vapor de agua contenido en los humos [3].

Según la directiva 92/42/CEE, los rendimientos mínimos de las calderas son:

Tabla II-11. Rendimientos mínimos de cada caldera [27]

Tipo de caldera	Pot. (kW)	Potencia nominal		Carga parcial (0,3·Pn)	
		Tª Media	Rendimiento	Tª Media	Rendimiento
Estándar	4 a 400	70°C	$\geq 84 + 2 \cdot \log P_n$	$\geq 50^\circ\text{C}$	$\geq 80 + 3 \cdot \log P_n$
Baja temperatura	4 a 400	70°C	$\geq 87,5 + 1,5 \cdot \log P_n$	40°C	$\geq 87,5 + 2 \cdot \log P_n$
Condensación	4 a 400	70°C	$\geq 90 + \log P_n$	30°C	$\geq 97 + \log P_n$

Además, en la figura II-5 se muestra una comparativa de los rendimientos de las tecnologías anteriores en función del grado de carga de la caldera [19].

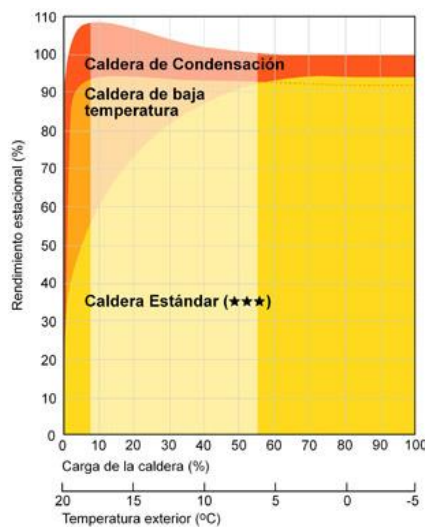


Figura II-5. Comparativa rendimientos estacionarios entre calderas

### II.9.6 COMPONENTES CALDERAS DE CONDENSACIÓN

En las calderas de condensación se distinguirán las siguientes partes [8]:

- **Cámara de combustión (hogar):** elemento donde se produce la combustión, aguantando temperaturas situadas en torno a los 2000°C.
- **Quemador:** se encarga de la combustión del combustible en presencia del comburente. Como se indicaba anteriormente, es el elemento encargado de generar una mezcla adecuada de aire-combustible. Si el combustible es un gas (metano o gas natural), éste no debe evaporarse

para mezclarse. Si el combustible es líquido, el combustible se atomiza gracias a unas boquillas (chicler) donde se genera un tamaño de gota lo suficientemente pequeño para conseguir una buena mezcla aire-combustible y facilitar la evaporación del combustible. El tamaño de gota depende esencialmente del diámetro del orificio de la boquilla y de la diferencia de presión a ambos lados de la boquilla (diferencia de presión entre la impulsión de la bomba de combustible y presión a la que se encuentra en chorro de aire). En la figura II-6 se muestra una imagen de una boquilla de atomización de combustible (chicler) [32].



*Figura II-6. Boquilla de atomización de combustible*

- **Circuito de humos:** dirige los humos producidos en la combustión hacia la caja de humos y, además, trata de enfriarlos al máximo para favorecer la posterior condensación del vapor de agua que los contiene.
- **Caja de humos:** en ella coinciden todos los humos para ser dirigidos hacia la chimenea y su posterior expulsión.
- **Circuito de agua:** en él el agua se calienta a consecuencia de absorber el calor proveniente de las paredes que lo contiene a través de procesos de conducción, convección y radiación.
- **Retorno de agua:** permite conectar a la instalación la llegada del agua más fría proveniente del final del circuito.
- **Salida de agua:** direcciona el agua caliente que sale de la caldera hacia la instalación.
- **Sifón:** a través de él son evacuados los condensados de la caldera de condensación. Presenta esta forma para formar un cierre hidráulico y vencer la depresión en ese punto creada por la chimenea, ver figura II-7 [8]:

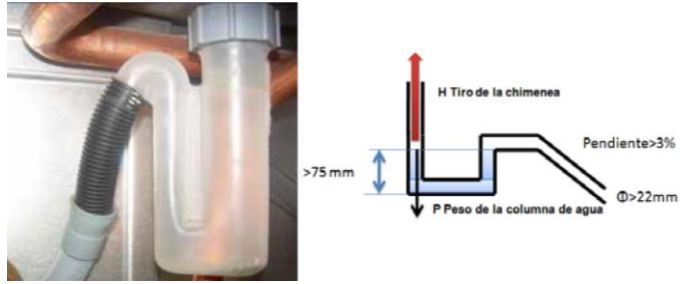


Figura II-7. Sifón de una caldera de condensación

El resumen de los elementos mencionados anteriormente se muestra en la figura II-8 [8]:

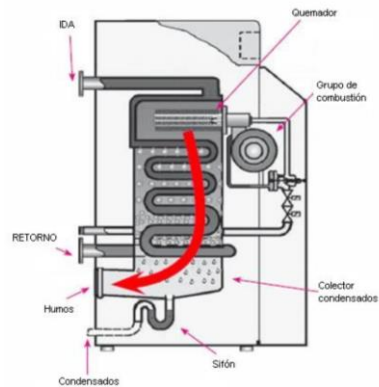


Figura II-8. Diferentes elementos de los que consta una caldera de condensación

Además, como se puede observar en la figura II-9, muchos fabricantes también emplean dispositivos neutralizadores para tratar el carácter ácido de los condensados evacuados por el sifón. Estos dispositivos contienen filtros de carbón activos y un granulado neutralizador (magnesio) que reacciona con los ácidos para formar agua de carácter prácticamente neutro [8].



Figura II-9. Equipos neutralizadores con carbón activo

Como referencia de la acidez del agua de los condensados en función del combustible utilizado en este tipo de calderas, se tendrá una clasificación que se observa en la figura II-10 [8]:

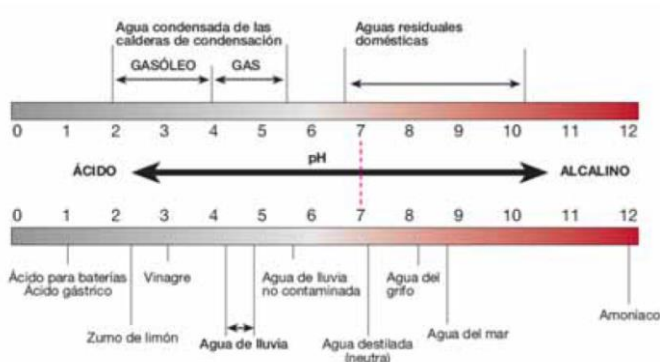


Figura II-10. Comparación de la acidez de distintos compuestos

## II.10 FUNCIONAMIENTO CALDERAS DE CONDENSACIÓN

En las calderas de condensación se pueden distinguir dos partes claramente diferenciadas en función del proceso de transmisión de calor que domina, en el lado de humos, en cada una de ellas. En la primera, el mecanismo de transmisión de calor predominante, en el lado de humos, es la radiación debido a las altas temperaturas que se tienen en la llama. Esta zona se corresponde con el hogar. En la segunda, el mecanismo de transmisión de calor predominante, en el lado de humos, es la convección con cambio de fase donde se aprovecha la energía liberada en la condensación del vapor de agua presente en los humos. Esta zona se corresponde con el intercambiador de la caldera, ver figura II-11, [8].

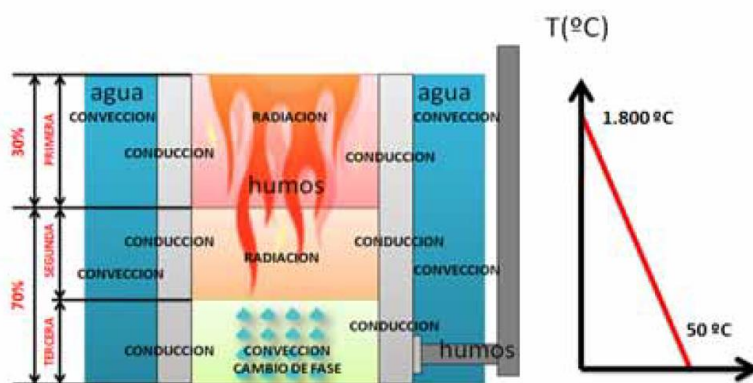


Figura II-11. Calor intercambiado y sus respectivas pérdidas en el interior de un quemador de una caldera de condensación

Considerando la figura II-12, se describe el funcionamiento de las calderas de condensación [8]:

A partir de un alimentador de gas, se provoca la combustión de éste junto con aire tomado del exterior. El calor generado por la llama calentará el agua de impulsión a través de un primer intercambiador de calor, y posteriormente, esta agua caliente será impulsado a la instalación de radiadores o de baja temperatura a través de una bomba. En este momento se produce el intercambio de energía con el ambiente que se desea calefactar.

Como consecuencia de lo anterior, el agua de calefacción se enfría y en el circuito de retorno el agua estará a una temperatura muy inferior a la de impulsión. Las superficies de este circuito con agua fría se ponen en contacto con los humos producidos en la combustión, actuando como un segundo intercambiador de calor.

En este intercambio de calor, primeramente, se busca calentar el agua de retorno lo máximo posible como consecuencia de la diferencia de temperaturas entre esta y los humos, y posteriormente se busca enfriar los humos lo máximo posible para conseguir descender la temperatura de estos por debajo de la temperatura de rocío. En este momento, el vapor de agua contenido en los gases de escape empieza a condensar, liberando gran cantidad de energía.

Esta gran cantidad de energía liberada en la condensación es utilizada directamente para calentar esta agua de retorno, de tal forma que la cantidad de calor necesaria para calentar el agua a través de la llama en el primer intercambiador es mucho menor.

Además, los humos cuyo vapor de agua ya han condensado vuelven a ponerse en contacto con los conductos de admisión de aire del exterior. En este tercer intercambiador se busca aumentar la temperatura de este aire para que llegue caliente al quemador, favoreciendo un ahorro energético en la combustión del gas.

Por último, cabe resaltar que el agua condensada es evacuada del sistema y tratada posteriormente. El esquema de funcionamiento que refleja todo lo anterior se muestra en la siguiente figura II-12:

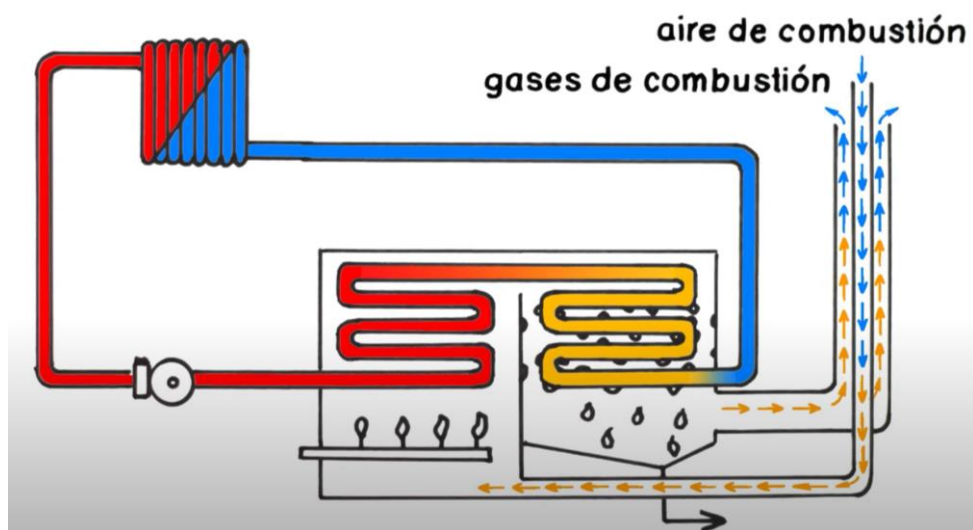


Figura II-12. Esquema de funcionamiento de una caldera de condensación

### II.10.1 INSTALACIONES

Las calderas de condensación pueden utilizarse en instalaciones para producir calefacción y/o ACS, independientemente del tipo de emisiones, temperatura de trabajo, etc. Sin embargo, no en todas las instalaciones se aprovechará de la misma manera el calor de la condensación, por ello se distinguen diferentes tipos [8]:

- Sistemas de baja temperatura.
- Calefacción con radiadores.

### II.10.2 SISTEMAS DE BAJA TEMPERATURA

En este tipo de sistemas, se potencia aún más el uso de las calderas de condensación. Trabajan con unas temperaturas de impulsión en torno a 50°C, lo que garantiza que las temperaturas de retorno de retorno del agua sean inferiores a la de rocío de los gases de combustión [8]. El caso más representativo de este tipo de sistemas es el suelo radiante.

En este tipo de sistemas de baja temperatura (inferior a 28°C en la superficie por la normativa vigente), se potencia el ahorro y la eficiencia energética, además de garantizar confort y bienestar. [31]. En la figura II-13 se observa la caldera y el circuito de la instalación por donde circula el agua. El circuito de impulsión viene representado de color rojo, mientras que el circuito de retorno viene representado de color amarillo. Entre estos dos se representa un circuito serpenteado, en el cual tiene lugar el intercambio de calor en la vivienda. Este

intercambio de calor se realiza de forma equitativa, lineal y equilibrada. Además, cabe resaltar que este tipo de sistemas no precisan de un mantenimiento específico.

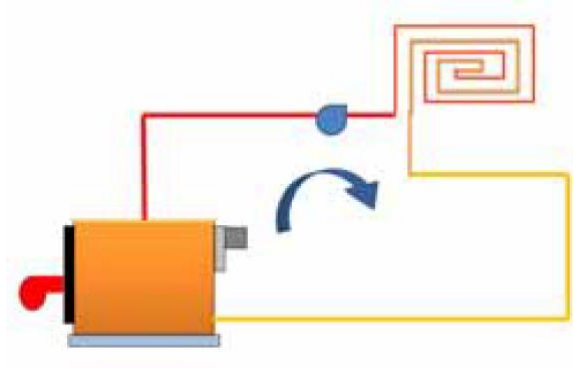


Figura II-13. Esquema de funcionamiento del suelo radiante [8]

### II.10.3 CALEFACCIÓN CON RADIADORES

Generalmente, las instalaciones de calefacción son dimensionadas para las temperaturas exteriores más bajas de cada localidad. Sin embargo, la gran mayoría del tiempo se tienen temperaturas superiores a lo largo del día, lo cual obliga a los sistemas de calefacción a ajustarse a la demanda energética en cada momento. En el caso de instalaciones individuales, esta demanda se ajusta a través de un termostato ambiente y manteniendo fija la temperatura de impulsión. Por el contrario, en instalaciones centrales se adecua esta temperatura a las necesidades de cada momento; se reducen las temperaturas de impulsión a los radiadores a medida que aumenta la temperatura exterior, lo cual provoca que las temperaturas de retorno sean menores en algunos intervalos del día [8].

Si se utilizaran calderas estándar, la regulación se llevaría a cabo a través de elementos del circuito, tales como válvulas motorizadas. Sin embargo, en el caso de las calderas de condensación tanto individuales como centrales, se puede aprovechar el fenómeno de la condensación durante largos periodos de tiempo ya que se puede actuar directamente sobre la temperatura de producción de la caldera.

Generalmente se diseñan los radiadores para operar con temperaturas comprendidas entre 80-60°C, estando la temperatura máxima en 80°C. Esto está regulado desde el año 1998 por el RITE. También cabe resaltar que el RITE establece 60°C como máxima temperatura de referencia para las partes accesibles de la caldera.

#### II.10.4 CIRCUITO CALEFACCIÓN Y ACS

A continuación, se describen las principales características que presentan los circuitos de calefacción y de ACS específicos en las calderas de condensación.

#### II.10.5 CIRCUITO DE ACS

Con el fin de evitar enfermedades relacionadas con la legionela, tal y como dicta la norma, la producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) requiere temperaturas de impulsión elevadas (80-60°C). Como consecuencia, esto se consigue solamente en este tipo de calderas en el periodo transitorio de calentamiento inicial, momento en el cual el circuito de agua de consumo (circuito secundario) se encuentra a temperaturas bajas (calentamiento de un depósito partiendo de la temperatura de red generalmente) [8].

Con el fin de que la caldera esté trabajando en condensación el mayor tiempo posible, se buscan diferentes estrategias:

- 1) La utilización de un intercambiador de calor colocado fuera del depósito, suministrando una temperatura de retorno a la caldera por encima de la temperatura del agua que entra al intercambiador, que sería muy próxima a de red, ver figura II-15.
- 2) La utilización de depósitos acumuladores con elevada estratificación. En este tipo de depósitos se aprecian dos partes bien diferenciadas: la parte superior en la zona de consumo, donde se acumulan las temperaturas de agua más elevadas, y por otro lado la parte inferior, a temperaturas bajas. En esta parte de la caldera se encuentran temperaturas próximas a las de red. El intercambiador iría situado en la zona más baja posible, logrando unos niveles de condensación elevados y una temperatura de retorno a la caldera muy próxima a la de red, ver figura II-14.

Si se desean temperaturas de ACS instantáneas, la temperatura de retorno a la caldera dependerá de la superficie de intercambio del sistema de ACS y de las condiciones de trabajo del circuito. Se deduce entonces que, con temperaturas más bajas de consigna de ACS y caudales de extracción elevados se conseguirán retornos de calderas más bajos [8].



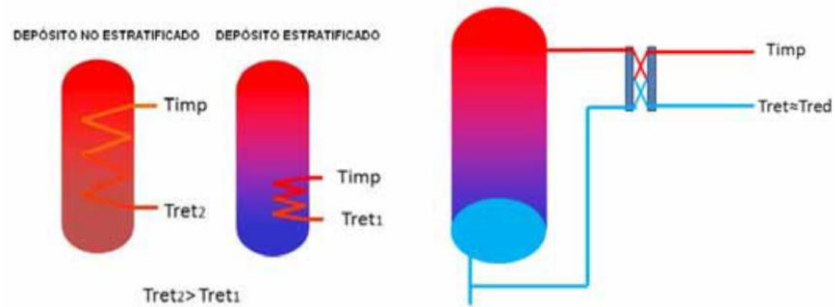
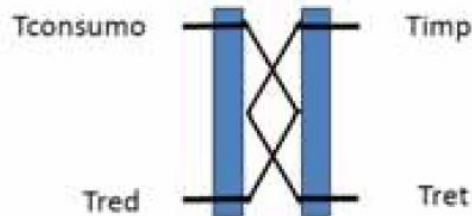


Figura II-14. Comparación de un depósito estratificado respecto de un depósito no estratificado



$$\downarrow T_{ref} \Rightarrow [ \uparrow \text{Caudal de consumo} ] \text{ o } [ \downarrow T_{consumo} ]$$

Figura II-15. Intercambiador de placas

## II.10.6 CIRCUITO DE CALEFACCIÓN

Como norma, se tratará de trabajar con una temperatura de retorno lo más baja posible en el circuito de calefacción. Para ello [8]:

- Se tratará de evitar la utilización de válvulas mezcladoras que provoquen conexiones directas entre la impulsión y el retorno para que se garantice que la temperatura de retorno esté por encima de la de rocío.
- Para adaptarse mejor a los requisitos del sistema se utilizarán bombas de caudal variable. Favorecerán la condensación al mismo tiempo que evita temperaturas de retorno altas.
- Para una misma temperatura media, la condensación se verá más favorecida para un menor caudal de agua cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre impulsión y retorno, como se puede observar en la figura II-16:

## ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

---

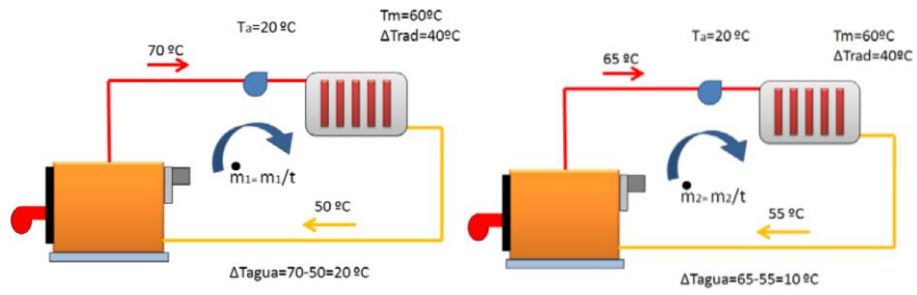


Figura II-16. Comparativa del aprovechamiento de la condensación con la variación de las temperaturas de impulsión y de retorno

# III. MONTAJE EXPERIMENTAL

---

En el siguiente capítulo se tratará todo lo relacionado con los datos recogidos en las medidas experimentales. Se presentarán aspectos relacionados con la caldera de condensación utilizada para recoger las medidas experimentales, así como también los procesos de medida y las gráficas recogidas a partir de estas. Además, se realizará un análisis de los datos tomados con su correspondiente interpretación. Los puntos que se estudiarán a continuación son: descripción de los elementos medidos, materiales y método, y análisis e interpretación de los datos tomados.

---

## III.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS MEDIDOS, MATERIALES Y MÉTODO

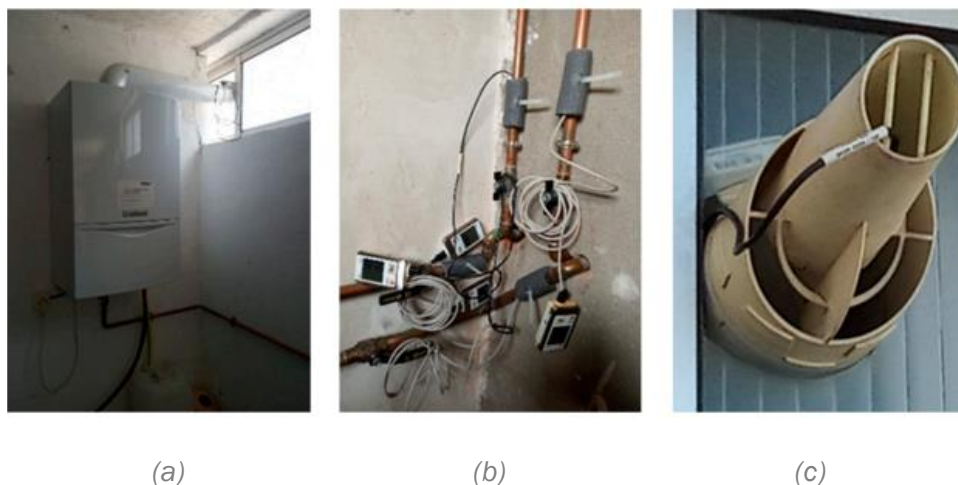
Se monitorizan una serie de variables de la caldera a lo largo de cinco semanas completas para su caracterización. Se trata de una caldera de condensación Vaillant Ecotech PLUS. Estos datos servirán para validar el modelo teórico. Las sondas recogerán datos de manera ininterrumpida cada diez segundos.

Los sensores de temperatura son de la marca Testo, concretamente Data Loggers, modelo 175 T2- Por otro lado, los sensores de humedad y temperatura del aire son Testo Data Logger modelo 175H1,

A partir de las sondas mencionadas anteriormente, se mide:

- **Sonda 1:** la sonda interior se encargará de medir temperaturas justo encima de la chimenea de salida, y la sonda externa la temperatura de humos.
- **Sonda 2:** la externa medirá la temperatura del ACS, mientras que la interior la ambiente.
- **Sonda 3:** la externa medirá la temperatura de retorno del agua, mientras que la interior la ambiente.
- **Sonda 4:** la externa medirá la temperatura de impulsión del agua, mientras que la interna la ambiente.

- **Sonda 5:** la externa medirá la temperatura del agua fría de consumo humano (AFCH), mientras que la interna medirá la temperatura ambiente.
- **Sonda 04:** se encargará de medir la temperatura del ambiente y la humedad relativa.



*Figura III-1. Vista de la (a) caldera de condensación experimental, (b) sensores de temperatura del agua de impulsión y de retorno, (c) medidor de temperatura en el conducto de los gases de escape*

El consumo medio fue medido y, además, también se realizaron los correspondientes análisis de combustión a partir de analizadores TESTO modelo 330-2. Un ejemplo de los parámetros medios medidos a lo largo de cinco días se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla III-1. Parámetros medidos de la caldera de condensación experimental para un día normal*

Parámetros	Valores medidos
Temperatura instantánea de salida de gases	42 °C
Variación media	30-56.8 °C
Temperatura del aire	12.4 °C
Rendimiento	99.1 %
Exceso de aire	1.27
Pérdidas	0.9 %
[CO <sub>2</sub> ]	9.41%
[O <sub>2</sub> ]	4.4 %
[CO]	68 ppm

En cuanto a la medición del agua condensada, se ha procedido a partir de una báscula y una garrafa en la cual se recogía diariamente toda el agua que había condensado. Primeramente, se medía la tara de la garrafa para después efectuar la medición completa en la báscula. De esta forma se obtuvieron todas las mediciones. Además, el cálculo del agua condensada por cada metro cúbico de gas se obtuvo a partir de la observación de los metros cúbicos disponibles del gas en la caldera. Esto se determina a partir de la lectura directa de éste, para posteriormente poder calcular el consumo restando la lectura de ese día respecto a la lectura del día anterior en el mismo momento.

Cabe destacar que inicialmente hasta la tercera semana, la temperatura de consigna del ACS estaba en 45°C, mientras que la de la calefacción estaba en 50°C. A partir de la tercera semana se realiza un cambio en las temperaturas de consigna, situando la del ACS en 50°C, y la de calefacción en 55°C.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se han realizado las correspondientes gráficas de las diferentes variables a lo largo de los días.

### III.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

A continuación, se muestra la figura III-2, en la que se puede observar la monitorización de las diferentes sondas y la variación de las variables presentadas anteriormente.

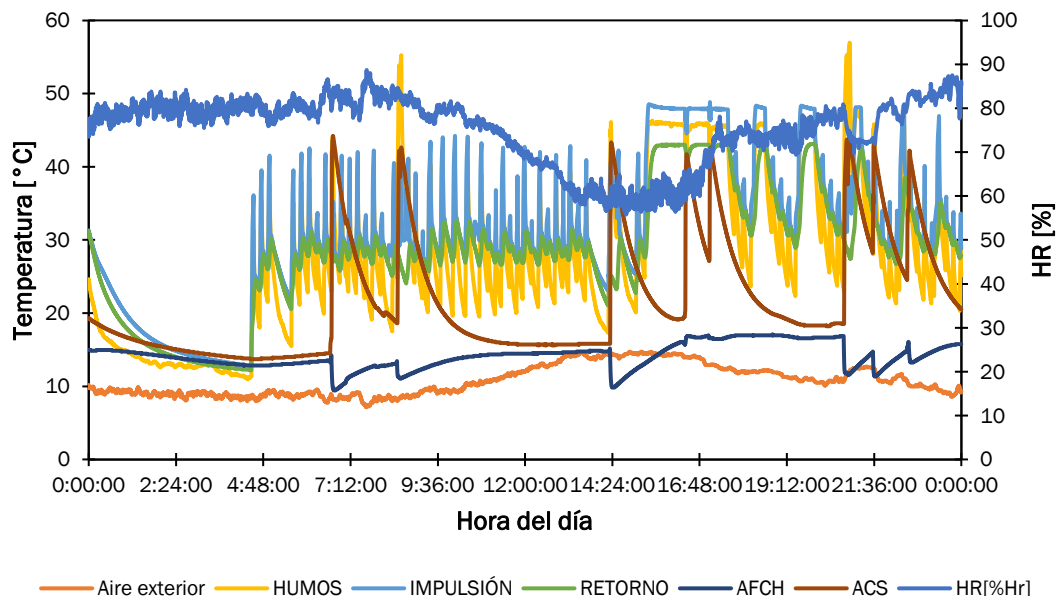


Figura III-2. Registro de valores experimentales durante un día normal

Durante periodos de uso puntual de calefacción, se puede observar que la temperatura de los humos de escape se encuentra contenida entre las temperaturas de retorno del agua y del suministro del sistema de calefacción. Con ello, se demuestra que la temperatura a la que se puede enfriar los gases es siempre más baja que la temperatura del suministro de agua de calefacción. Sin embargo, puede ocurrir que a consecuencia del arranque de la caldera y de una demanda simultánea de ACS y calefacción, la temperatura de los humos sea mayor durante un corto espacio de tiempo. Pero esta situación únicamente se puede mantener en un transitorio.

Las tablas de datos y sus correspondientes gráficas estarán incluidas en el anexo.

# IV. MODELO MATEMÁTICO

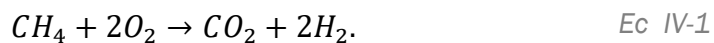
Una vez recogidos los datos anteriores de la caldera de condensación experimental, y a partir de los conceptos explicados en el segundo capítulo, se ha elaborado un modelo teórico en Excel. En dicho modelo, se realizarán todas las simulaciones necesarias para completar el estudio, considerando siempre los gases en condiciones normales. Las variables de estudio independientes en el modelo son: índice de exceso de aire, temperatura de salida de humos y altitud sobre el nivel del mar. Los puntos que se han estudiado son: cálculo de la temperatura de rocío del gas, cálculo del PCI del gas y temperatura de salida de humos, cálculo del calor total intercambiado, cálculo del agua condensada y calor recuperado, cálculo del rendimiento y conclusiones.

## IV.1 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE ROCÍO DE LOS HUMOS

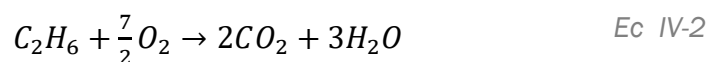
Para calcular la temperatura de rocío de los humos provocados en la combustión del gas natural se sigue el siguiente procedimiento:

- Una vez definida una determinada composición en tanto por ciento en volumen de los distintos componentes del gas natural, se resuelven los balances de materia para calcular la composición de los humos [13]. Las reacciones que se resuelven en el balance de materia se muestran a continuación:

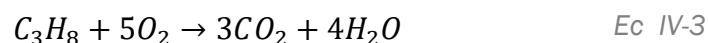
Para el metano:



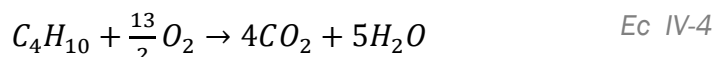
Para el etano:



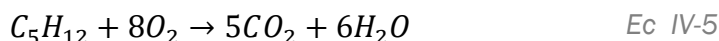
Para el propano:



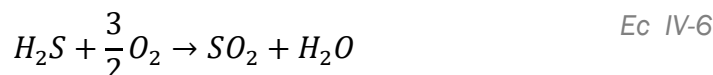
Para el butano:



Para el pentano:



Para el ácido sulfhídrico:



- A partir del índice de exceso de aire y de la ecuación II-6, se calcula el volumen de aire real, y con ello el volumen de humos de cada una de las reacciones con la siguiente ecuación [12]:

$$\dot{V}_{HUMOS} = \dot{V}_{\text{productos de combustión}} + \dot{V}_{\text{AIRE REAL}} - \dot{V}_{O_2 \text{ ESTEQUIMÉTRICO}} \quad \text{Ec IV-7}$$

$[Nm^3/h]$

Dónde:

- $\dot{V}_{\text{productos de combustión}}$ : caudal de humos  $[Nm^3/h]$ .
  - $\dot{V}_{\text{AIRE REAL}}$ : caudal de aire real  $[Nm^3/h]$ .
  - $\dot{V}_{O_2 \text{ ESTEQUIMÉTRICO}}$ : caudal de oxígeno estequiométrico  $[Nm^3/h]$ .
- Para calcular la presión de vapor ( $P_v$ ) del vapor de agua en los humos de la combustión, se ha utilizado la expresión II-14. Se tendrá en cuenta que la presión atmosférica está directamente relacionada con la altitud sobre el nivel del mar (una de las variables independientes) a partir de la ecuación II-13. Se calculará la fracción molar del vapor de agua ( $x_v$ ) como el cociente del volumen del vapor de agua total por el volumen de los humos [7]:

$$x_v = \frac{\dot{V}_{\text{VAPOR DE AGUA TOTAL}}}{\dot{V}_{HUMOS}} \quad \text{Ec IV-8}$$

Se sustituyen los datos y se obtiene la presión de vapor del vapor de agua en los humos de la combustión del gas natural.

- De acuerdo con la expresión II-21, se determina que la presión de saturación y la presión de vapor están relacionadas a partir de la humedad relativa.



Lógicamente, cuando el aire no puede admitir más vapor, éste empezará a condensar. Si esto se traduce a la ecuación II-21, este punto se alcanzará cuando el cociente valga uno, y que, por tanto, la presión de vapor del agua en los humos sea igual a la presión de saturación de ésta, tal y como se puede observar en la ecuación IV-9. La temperatura a la cual se producirá esto es la temperatura de rocío. Para calcular dicha temperatura de rocío, se despeja el valor de la presión de saturación del vapor de agua, y a partir de este valor, la temperatura de rocío:

$$P_v = P_{sat} [Pa] \quad \text{Ec IV-9}$$

$$P_v = 10^{\left(A - \frac{B}{C+T}\right)} [Pa]$$

Despejando la temperatura en la ecuación II-15, se obtiene el valor de la temperatura de rocío del gas.

Este mismo procedimiento también se ha realizado de la misma manera para diversos combustibles líquidos puros como:

- Butano.
- Propano.
- Gasóleo C.
- Metano.

Las diferentes temperaturas de rocío calculadas para los combustibles mencionados anteriormente se muestran en la figura IV-1. Se puede observar que a medida que aumenta el índice de exceso de aire la temperatura de rocío disminuye, es decir, el vapor de agua comienza a condensar más tarde. Esto sucede debido a que a medida que se aumenta el volumen de humos la presión parcial del agua disminuye y, con ella, la temperatura de rocío.

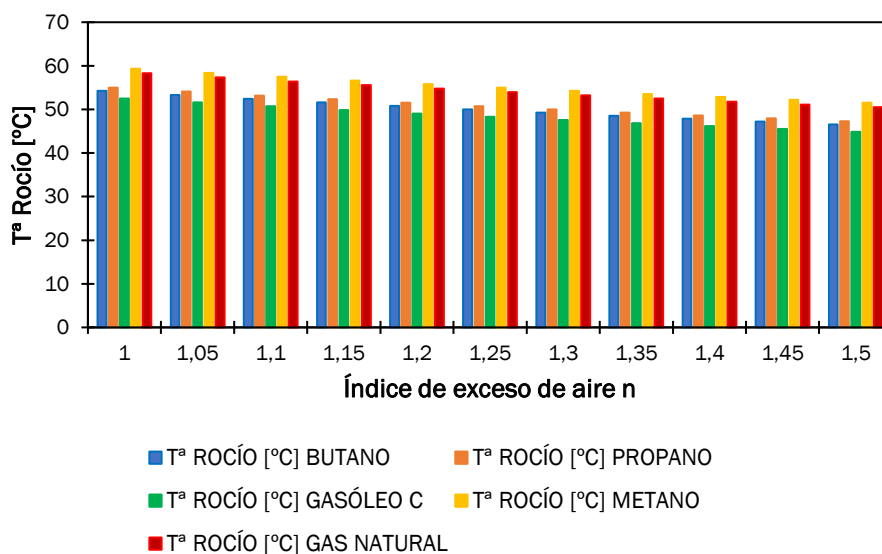


Figura IV-1. Tª de rocío de varios combustibles en función del índice de exceso de aire (n)

Para llegar a los resultados mostrados en la gráfica anterior, se han utilizado las tablas IV-1, IV-2 y IV-3, cuyas variables independientes toman los siguientes valores:

Tabla IV-1. Valores de las variables independientes tomados como referencia en el ejemplo

Variables independientes:	
Índice de exceso de aire	1,28
Caudal (Nm <sup>3</sup> /h)	0,57
Altitud sobre nivel mar (m)	843
Ptotal (Pa)	91677,34

En las tablas IV-2 y IV-3 se muestran las temperaturas de rocío extraídas directamente del modelo teórico en Excel a partir del procedimiento explicado anteriormente:

Tabla IV-2. Parámetros calculados para obtener la temperatura de rocío de diversos combustibles

COMPONENTES	COMPOSICIÓN (%VOLUMEN)	GAS NATURAL										
		Productos de combustión+inertes(Nm3/h )	Vapor de agua (Nm3/h )	o2 estequ.	V aire esteq	Vaire real	V HUMOS	Xv	Pvapor(Pa)	Psat (Pa)	HR (%)	T <sup>a</sup> Rocío(°C)
METANO	86	1,461	0,974	0,974	4,637	5,890	6,376	0,145	13306,454	605,115	2198,995	51,604
ETANO	5	0,142	0,085	0,099	0,472	0,599	0,642					
PROPANO	2	0,079	0,045	0,057	0,270	0,342	0,365					
BUTANO	2	0,102	0,057	0,074	0,351	0,445	0,473					
PENTANO	2	0,125	0,068	0,091	0,431	0,548	0,582					
DIÓXIDO CARBONO	1	0,006					0,006					
NITRÓGENO ÁCIDO	1	0,006					0,006					
SULFHÍDRICO	1	0,011	0,006	0,008	0,040	0,051	0,054					
TOTAL SUMA	100		1,234	1,302	6,201	7,876	8,504					

Tabla IV-3. Parámetros calculados para obtener la temperatura de rocío de varios combustibles.

COMBUSTIBLES PUROS	Productos de combustión+inertes(Nm3/h )	Vapor de agua (Nm3/h)	o2 estequ.	V aire esteq	Vaire real	V HUMOS	Xv	Pvapor (Pa)	Psat (Pa)	HR (%)	T <sup>a</sup> Rocío(°C)
BUTANO	5,0958	2,831	3,680	17,525	22,257	23,673	0,120	10963,691	605,115	1811,835	47,709
PROPANO	3,9634	2,2648	2,831	13,481	17,121	18,253	0,124	11375,032	605,115	1879,812	48,442
GASÓLEO C	14,155	7,3606	10,475	49,880	63,347	67,027	0,110	10067,543	605,115	1663,740	46,028
METANO	1,6986	1,1324	1,132	5,392	6,848	7,415	0,153	14001,630	605,115	2313,878	52,646

En el anexo se encuentran las gráficas correspondientes a la variación de la temperatura de rocío de los diferentes combustibles para diferentes índices de excesos de aire.

## IV.2 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE SALIDA DE HUMOS

A partir del modelo, se calcula cuál es la temperatura de los humos tras producirse la combustión en nuestra caldera, es decir, a la salida del hogar. Para calcular la temperatura a la salida del hogar es necesario aplicar un balance de energía. La figura IV-2 representa un esquema que ayuda a aplicar dicho balance. La figura IV-2 indica que para pasar de los reactivos una temperatura concreta a los productos a otra temperatura concreta se requiere una cantidad de calor  $\dot{Q}$  desconocida. Sin embargo, se puede plantear un “camino” alternativo y finalmente afirmar que la energía puesta en juego en ambos caminos debe ser la misma. En el camino alternativo en primer lugar se calientan/enfrían los reactivos desde su temperatura hasta 25°C. Se elige la temperatura de 25°C porque para pasar de reactivos a productos se necesita una entalpía de reacción. Esa entalpía de reacción se calcula a partir de los calores de formación y dichos calores de formación se miden experimentalmente todos a la temperatura de 25°C. Finalmente, los reactivos se calientan desde 25°C hasta la temperatura de salida de los reactivos (los humos) del reactor (en este caso, del hogar de la caldera). En la figura IV-2 se muestra de forma más detallada las contribuciones energéticas asociadas a cada una de las transformaciones.

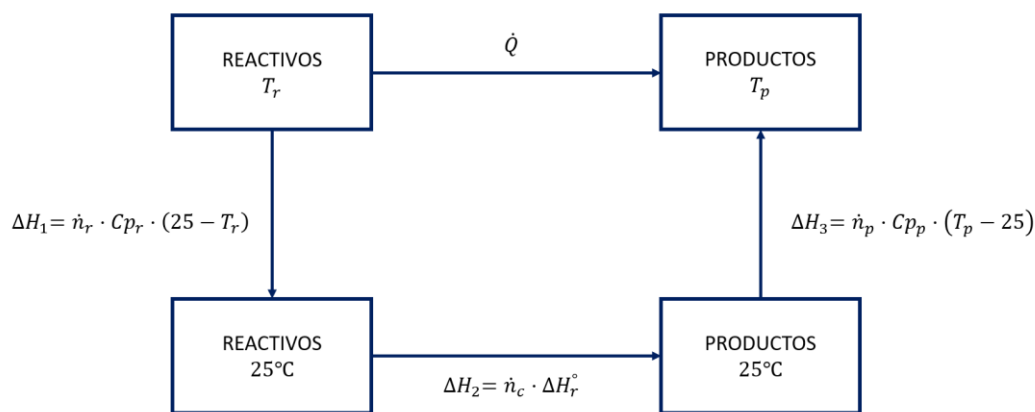


Figura IV-2. Balance de energía

Como se ha señalado anteriormente, se plantea la siguiente igualdad:

$$\dot{Q} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \quad \text{Ec IV-10}$$

Además, se realizan las siguientes aproximaciones:

- Se considera proceso diabático, por lo tanto,  $Q=0$ .
- Se desprecia el valor de  $\Delta H_1$  ya que su valor es muy pequeño comparado con el de  $\Delta H_2$  y  $\Delta H_3$ . Esto es debido a que la diferencia de temperaturas es muy pequeña.
- En la expresión:

$$\Delta H_3 = \dot{n}_{\text{productos}} \cdot c_{p_{\text{productos}}} \cdot (T_{\text{productos}} - 25^{\circ}\text{C}) \quad [\text{kJ}/\text{h}] \quad \text{Ec IV-11}$$

Donde:

- $c_{p_{\text{productos}}}$ : calor específico de los humos  $[\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}]$ .
- $\dot{n}_{\text{productos}}$ : flujo másico de los humos  $[\text{kmol}_{\text{humos}}/\text{h}]$ .
- $T_{\text{productos}}$ : temperatura adiabática de llama  $[^{\circ}\text{C}]$ .

Se puede considerar que  $c_{p_{\text{productos}}} = c_{p_{\text{aire}}}$ . Por tanto, la ecuación IV-10 resulta:

$$0 = \Delta H_2 + \Delta H_3$$

$$-\Delta H_2 = \dot{n}_{\text{productos}} \cdot c_{p_{\text{productos}}} \cdot (T_{\text{productos}} - 25^{\circ}\text{C}) \quad \text{Ec IV-12}$$

$$T_{\text{productos}} = \frac{-\Delta H_2}{\dot{n}_{\text{productos}} \cdot c_{p_{\text{productos}}}} + 25 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Una vez establecido todo lo anterior, se procede a calcular el valor de  $\Delta H_2$ , que coincidirá con el valor del poder calorífico inferior del combustible (PCI) multiplicado por el flujo másico (o molar) del combustible que reacciona:

- A partir de las entalpías de formación de cada uno de los compuestos del gas natural que tienen lugar en la reacción se calcula su entalpía de combustión.
- Multiplicando esta energía liberada en la combustión por cada mol por el número de moles que reaccionan de cada compuesto y sumando el total, se obtiene el valor de la potencia térmica liberada en la combustión  $\Delta H_2$ .
- A partir del caudal de  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  que se ha obtenido en el balance de materia, se determina su flujo molar en  $\text{Kmol}/\text{h}$  dividiendo por 22,4, ya que, en condiciones normales, cada  $\text{Kmol}$  de compuesto ocupa un volumen de  $22,4 \text{ m}^3$ .
- Con todos estos datos se resuelve el balance de energía y así se calcula la temperatura adiabática de llama,  $T_{\text{productos}}$ .

Los calores específicos que se han sido utilizado para los principales compuestos se pueden observar en la tabla IV-4:

*Tabla IV-4. Calores específicos de los componentes utilizados*

<b>Componente</b>	<b>Cp_m [kJ/(kmol·K)]</b>
N2	31,655
O2	33,507
CO2	48,961
H2O	38,267

Las principales entalpías de formación ( $\Delta H_f^\circ$ ) que han sido utilizadas se observan en la tabla IV-5:

*Tabla IV-5. Entalpías de formación de los compuestos que intervienen en nuestras reacciones químicas*

<b>Componentes</b>	<b><math>\Delta H_f^\circ</math> [kJ/mol]</b>
METANO	-74,85
ETANO	-84,67
PROPANO	-103,8
BUTANO	-124,7
PENTANO	-146,4
DIÓXIDO CARBONO	-393,5
NITRÓGENO	0
ÁCIDO SULFHÍDRICO	-20,5
Agua	-241,83
Dióxido de carbono	-393,5
Oxígeno	0

En las tablas IV-6, IV-7 Y IV-8, extraída del modelo en Excel, se observarán todas las operaciones descritas anteriormente para calcular dicha temperatura:

Tabla IV-6. Cálculo de la entalpía de combustión del combustible y de la potencia térmica liberada

GAS NATURAL									
Componentes	Moles Reacción [kmol/h]	$\Delta fH^\circ$ [kJ/mol]	$\alpha_{comb}$	$\alpha_{O2}$	$\alpha_{CO2}$	$\alpha_{H2O}$	$\Delta_{comb}H^\circ$ [kJ/mol]	$\Delta_{comb}H^\circ$ [kJ/kmol]	Qi [kJ/h]
METANO	0,0217	-74,85	1	2	1	2	-802,31	-802310	-17440,6434
ETANO	0,0012	-84,67	1	3,5	2	3	-1427,82	-1427820	-1804,53501
PROPANO	0,0005	-103,8	1	5	3	4	-2044,02	-2044020	-1033,32511
BUTANO	0,0005	-124,7	1	6,5	4	5	-2658,45	-2658450	-1343,94142
PENTANO	0,0005	-146,4	1	8	5	6	-3272,08	-3272080	-1654,1533
DIÓXIDO CARBONO		-393,5							0
NITRÓGENO		0							0
ÁCIDO SULFÚDRICO	0,0002	-20,5	1	1,5	5	6	-3397,98	-3397980	-858,900123
								$\Delta H2$	-24135,4984 [kJ/h]
									-6,70430511 [kW]

Tabla IV-7. Cálculo del flujo másico

PRODUCTOS			
Componente	Flujo molar [kmol/h]	Cp_m [kJ/(kmol·K)]	[kJ/(h·K)]
N2	0,278	31,655	8,800
O2	0,016	33,507	0,526
CO2	0,031	48,961	1,497
H2O	0,055	38,268	2,109
	0,379		12,933

Tabla IV-8. Cálculo de la temperatura adiabática de llama

TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA				
Cp_m_humos	34,087	[kJ/(kmol·K)]		
m_humos	0,379	[kmol/h]		
Ts	2164,411	[K]	1891,261	[°C]
Te	298,15	[K]		
$\Delta H2$	-24135,498	[kJ/h]		
	-6,704	[kW]		

### IV.3 CÁLCULO CALOR TOTAL INTERCAMBIADO

Para el cálculo del calor total intercambiado, se tomarán como referencia algunos datos experimentales extraídos de la caldera de condensación real. A partir de estos datos, se considera como un único intercambiador el formado por la interacción humos-agua caliente para la impulsión y humos-agua fría de retorno (donde tendrá lugar la condensación). En la figura IV-3 se observan dichas partes [8]:

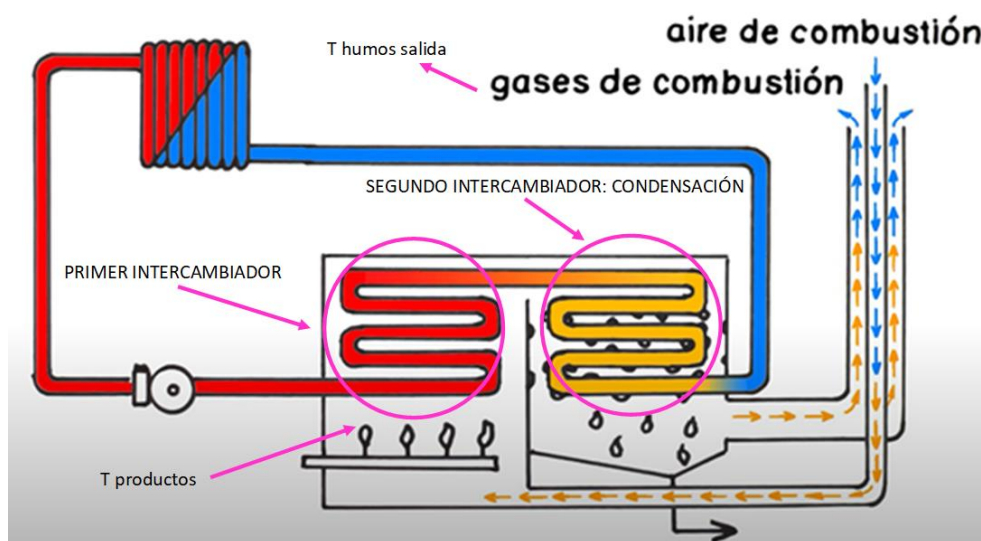


Figura IV-3. Intercambiadores de calor en una caldera de condensación.

Considerando como fluido caliente a los humos, y como fluido frío al agua de calefacción y/o ACS, se aplica al intercambiador de calor el método de diferencia media de temperaturas logarítmicas (DMLT). Al aplicarlo, se establece como temperatura de los humos a la salida ( $T_{\text{humos salida}}$ ) el valor de 40°C. Se ha elegido este valor por ser el valor medio de las temperaturas recogidas en la mayoría de los días para nuestra caldera real. Además, el otro valor fijado como variable independiente será la temperatura de retorno del agua, fijada en 33°C y que al igual que antes, se ha recogido un valor medio procedente de las mediciones experimentales.

Se aplican las ecuaciones II-24 y II-25:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{caliente}} \cdot c_{p_{\text{caliente}}} \cdot (T_{ce} - T_{cs})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{frío}} \cdot c_{p_{\text{frío}}} \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$



La incógnita será el flujo del fluido frío, que será despejada una vez se haya calculado el valor del calor total intercambiado, tal y como se puede ver en las tablas IV-9 y IV-10:

Tabla IV-9. Propiedades de los fluidos calientes y fríos en el método DMLT

CALIENTE		
HUMOS		
mcaliente	0,379	[kmol/h]
	0,003	[kg/s]
Cpcaliente	34,087	[kJ/(kmol·K)]
Tce	1891,261	[°C]
Tcs	40	[°C]

FRÍO		
AGUA		
mfrío		[Kmol/h]
		[Kg/s]
Cpfrío	75,24	[kJ/(kmol·K)]
Tfe	33	[°C]
Tfs	55	[°C]

Tabla IV-10. Calor intercambiado por los fluidos caloportadores y flujo másico del fluido frío

MÉTODO DMLT		
Qcaliente	6,958	[KW]
Qfrío	6,958	[KW]
mfrío	0,004	Kmol/s
	0,075	Kg/s
	4,540	Kg/min

#### IV.4 CÁLCULO DEL AGUA CONDENSADA Y CALOR RECUPERADO

Para calcular la masa de agua condensada en la combustión, el principal objetivo será calcular la masa de vapor de agua que se encuentran en los humos después de la condensación y la masa de vapor de agua que se encuentran en los humos antes de esta. Por lo tanto, se calculará como:

$$\dot{m}_{\text{agua condensada}} = \dot{m}_{\text{agua inicial}} - \dot{m}_{\text{agua final}} \quad \text{Ec IV-13}$$

Siendo:

- $\dot{m}_{agua\ inicial}$ : masa de agua contenida en los humos antes de la condensación [ $Nm^3/h$ ].
- $\dot{m}_{agua\ final}$ : masa de agua contenida en los humos finales que se emitirán al ambiente [ $Nm^3/h$ ].

La masa de agua que se encuentra en los humos inicialmente dependerá de la composición del combustible, y de la reacción de los compuestos que lo forman. En la tabla IV-2 se puede observar la cantidad de vapor de agua contenida en los humos inicialmente para esas condiciones determinadas de exceso de aire, altitud sobre el nivel del mar y caudal de combustible.

La masa de agua que se encuentra en los humos justo antes de expulsarlos a la atmósfera se calculará a partir de la temperatura de salida de humos que se ha fijado previamente, tal y como se señaló en el apartado anterior. Los pasos que se seguirán son los siguientes:

- Asociada a esta temperatura habrá una presión de saturación del agua en estos humos de escape que se calculará a partir de la ecuación II-15.
- Se considera que el proceso de condensación del vapor de agua contenido en los humos se realiza sobre la línea HR=100% y que finaliza sobre ésta, es decir, que el enfriamiento y posterior cambio en la humedad específica del vapor de agua en los humos evoluciona sobre la línea de vapor saturado, por lo que al alcanzar la temperatura de 40°C se obtendrá vapor saturado en los humos, ver figura IV-4 [7]. De esta manera se podrá utilizar la ecuación II-21, cuyo cociente valdrá uno, por lo que la presión de saturación a la temperatura de salida de humos (40°C) será igual a la presión de vapor ecuación IV-9. **Nótese que esta explicación solamente es válida si la temperatura superficial de la batería (del intercambiador) es superior a la temperatura de rocío de los humos a la salida del hogar.**

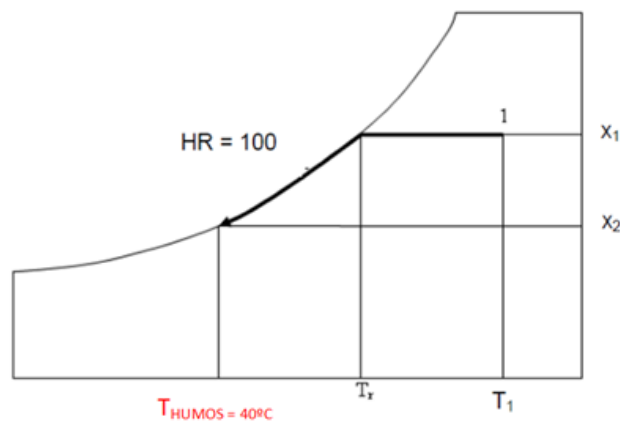


Figura IV-4. Evolución de los humos hasta alcanzar el equilibrio termodinámico con la superficie de la batería

- Habiendo calculado ya la presión de vapor asociada a esa temperatura de humos, se aplica la ecuación II-14 y se despeja el valor de  $x_v$ , que mostrará la cantidad de vapor de agua presente en los humos finales en tanto por uno.
- Si se multiplica  $x_v$  por el caudal total de humos, se obtendrá la cantidad final de agua, por lo que ya se podrá aplicar la ecuación:

$$\dot{m}_{agua\ final} = x_v \cdot \dot{V}_{HUMOS} \quad Ec\ IV-14$$

Siendo:

- $x_v$ : fracción molar del vapor de agua en los humos.
- $\dot{V}_{HUMOS}$ : caudal total de humos [ $Nm^3/h$ ].
- $\dot{m}_{agua\ final}$ : masa de agua contenida en los humos finales que se emitirán al ambiente [ $Nm^3/h$ ].

Una vez calculado el agua que se ha condensado, se podrá calcular el calor recuperado como consecuencia de esta condensación a partir de la expresión:

$$\dot{Q}_{recuperado} = \dot{m}_{agua\ condensada} \cdot \lambda \quad [kJ/h] \quad Ec\ IV-15$$

Siendo:

- $\lambda$ : calor de vaporización del agua [ $kJ/kg$ ].
- $\dot{m}_{agua\ condensada}$ : masa de agua obtenida en la condensación [ $kg/h$ ].

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

---

Las tablas utilizadas en nuestro modelo para calcular la masa de agua condensada tienen la siguiente forma:

*Tabla IV-11. Cálculo del agua condensada en el modelo*

<b>AGUA CONDENSADA</b>				
Xv inicial	0,145			
Agua inicial	1,234	[Nm <sup>3</sup> /h]	0,992	[Kg/h]
HR (Tsalida humos)	180,972	[%]		
Pvapor	7352,789	[Pa]		
Xv final	0,080			
Agua final	0,682	[Nm <sup>3</sup> /h]	0,548	[Kg/h]
Agua condensada	0,552	[Nm <sup>3</sup> ]		
	0,025	[Kmol/h]		
	0,444	[Kg/h]	0,784	[Kg/Nm <sup>3</sup> gas]

*Tabla IV-12. Cálculo calor recuperado en la caldera de condensación*

$\Delta h_{vap}$	2500	[kJ/kg]
Q	1109,46322	[kJ/h]
	0,30818423	[KW]

En las figuras IV-5 y IV-6 se podrá observar la relación existente entre la masa de agua condensada con la temperatura de salida de humos, índice de exceso de aire y altitud sobre el nivel del mar:

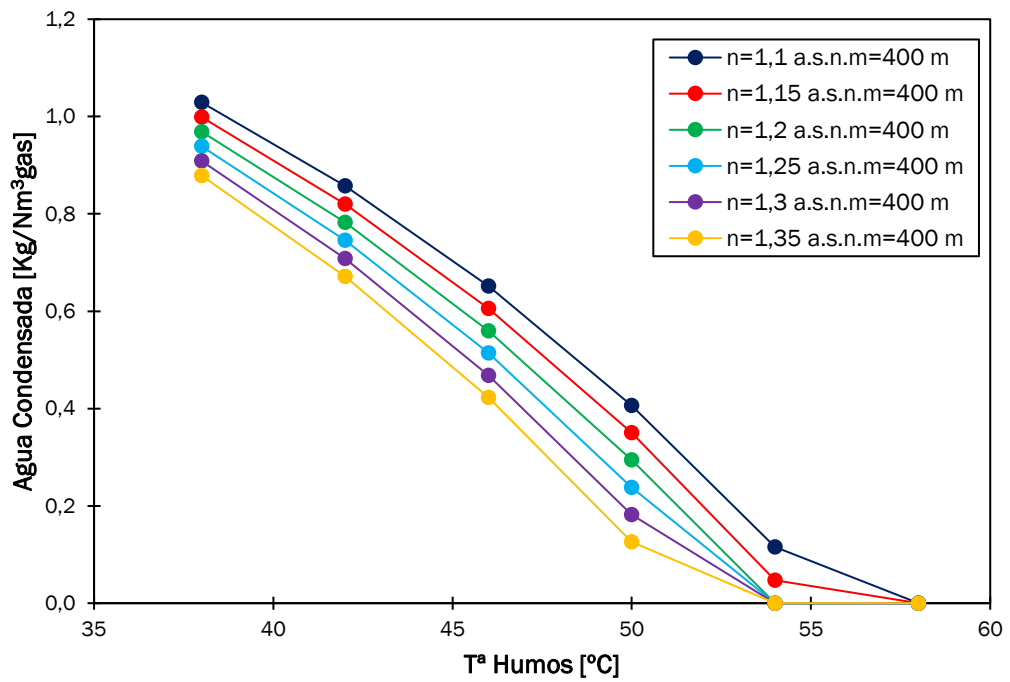


Figura IV-5. Evolución de la masa de agua condensada para a.s.n.m = 400m

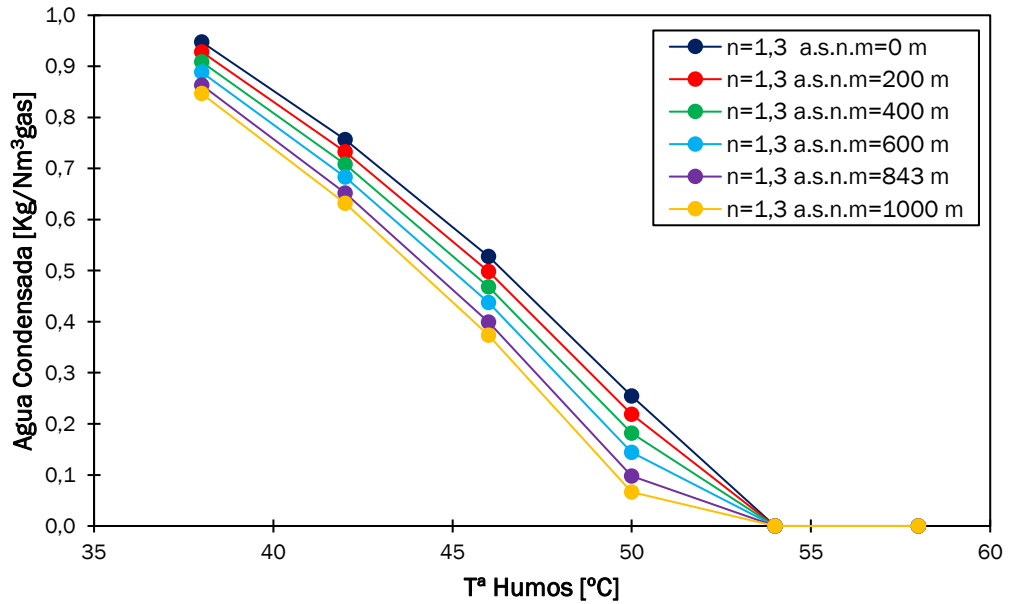


Figura IV-6. Evolución de la masa de agua condensada para n=1,3

## IV.5 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO

Para calcular el rendimiento de la caldera se utilizarán todos los datos calculados en los apartados anteriores. Cabe resaltar que este rendimiento es calculado respecto al poder calorífico inferior (PCI), por lo que se sabe de antemano que pueden ser superiores al 100% ya que son rendimientos instantáneos de combustión, no rendimientos estacionales. La expresión empleada para el cálculo del rendimiento es:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{productos}} \cdot c_{p\text{productos}} \cdot (T_{\text{productos}} - T_{\text{humos salida}}) + \dot{m}_{\text{agua condensada}} \cdot \lambda}{\dot{m}_{\text{combustible}} \cdot PCI_{\text{combustible}}} \quad \text{Ec IV-16}$$

Donde:

- $T_{\text{productos}}$ : temperatura adiabática de llama calculada en la ecuación IV-12 [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- $T_{\text{humos salida}}$ : temperatura de los humos en la chimenea de salida, es decir, una vez ya condensado el vapor de agua que estaba contenido en estos [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- $\dot{m}_{\text{agua condensada}}$ : agua condensada [ $\text{kg}/\text{Nm}^3 \text{gas}$ ].
- $\lambda$ : calor de vaporización del agua [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ].
- $\dot{m}_{\text{combustible}}$ : flujo másico de combustible [ $\text{kg}_{\text{combustible}}/\text{h}$ ].
- $PCI_{\text{combustible}}$ : poder calorífico inferior del combustible [ $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{combustible}}$ ].
- $c_{p\text{productos}}$ : calor específico de los humos [ $\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ ].
- $\dot{m}_{\text{productos}}$ : flujo másico de los humos [ $\text{kg}_{\text{humos}}/\text{h}$ ].

En las figuras IV-7 y IV-8 se observará cómo varía el rendimiento en función del índice de exceso de aire, temperatura de salida de humos y altitud sobre el nivel del mar:

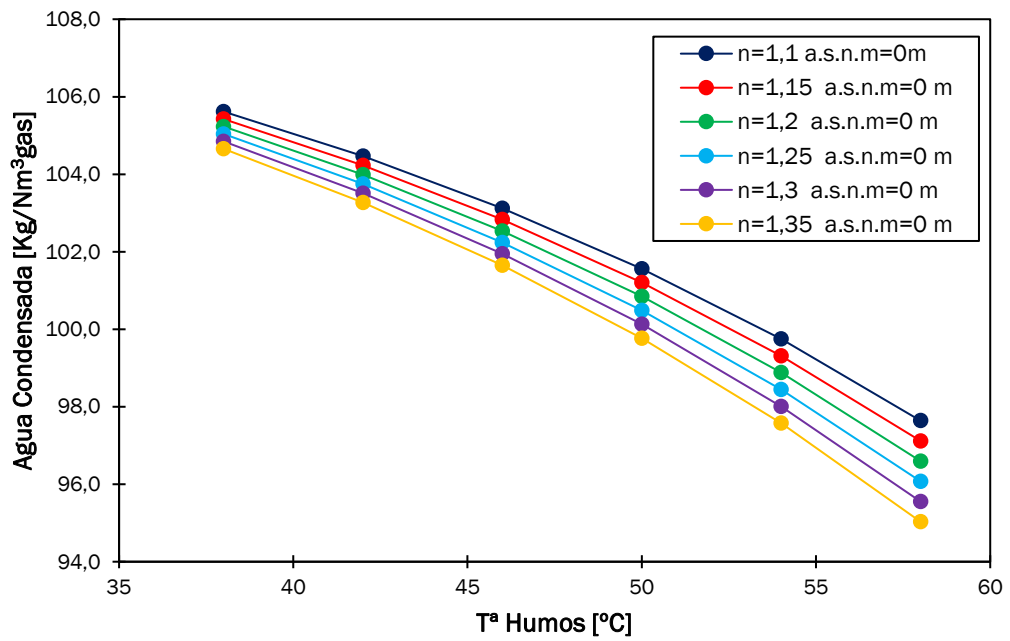


Figura IV-7. Evolución del rendimiento para a.s.n.m= 0m

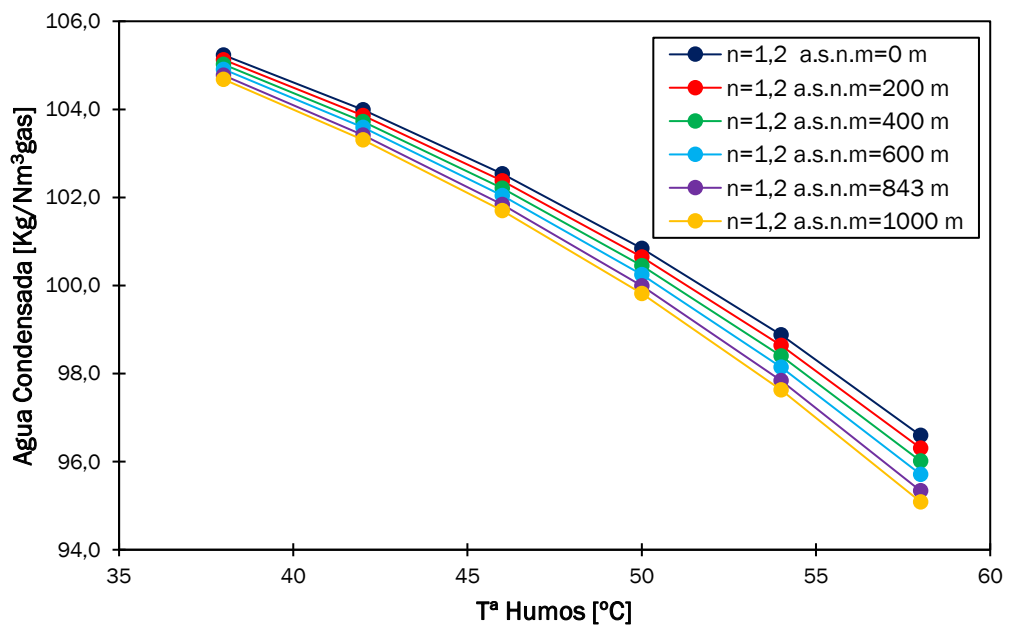


Figura IV-8. Evolución del rendimiento para n=1,2

## IV.6 CONCLUSIONES

A continuación, se discuten cada uno de los parámetros que influyen en cómo opera la caldera de condensación y se analizan sus tendencias:

En primer lugar, en cuanto a la temperatura de rocío, se observa que, para un índice de exceso de aire mayor a la unidad, a medida que se aumenta el índice de exceso de aire, estas temperaturas disminuyen gradualmente para todos los combustibles estudiados. Esto se explica ya que, al aumentar el índice de exceso de aire, se está incrementando tanto el oxígeno que no combustiona como el nitrógeno (inerte) que se introduce a la caldera. Dicho de otra manera, se incrementa el flujo de humos a la salida de la caldera. Si se forma el mismo vapor de agua, ya que no se ha modificado la cantidad de combustible que se introduce a la caldera (despreciando la humedad contenida en el propio aire) y el volumen de humos aumenta, esto implica que la concentración del vapor de agua en los humos (dicho de otra manera, la fracción molar o la presión parcial) disminuye. Como consecuencia, tal y como se deduce de la ecuación IV-8, al disminuir la presión parcial del agua, temperatura de rocío disminuye. Dicho de otra manera, los humos empiezan a condensar a temperaturas más bajas.

También se aprecia que, en la inmensa mayoría de los casos, para los parámetros con los que se van a trabajar de exceso de aire y altitud sobre el nivel del mar, se obtienen temperaturas de llama próximas a 2000°C. Como se observó en el apartado II.6.1, sobre esta temperatura se obtiene el pico de formación de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Por tanto, se puede afirmar que se están produciendo óxidos de nitrógeno en la caldera. Sin embargo, que dichos óxidos de nitrógeno se formen no implica necesariamente que salgan con los humos de la caldera. Tras realizar medidas experimentales del pH del agua condensada, se observa que dicho pH es muy ácido, por lo que se puede inferir que una parte de los óxidos de nitrógeno formados en la combustión terminan disueltos en el agua condensada.

Respecto a la masa de agua condensada, se puede concluir que manteniendo el índice de exceso de aire la masa de agua condensada disminuye a medida que la temperatura de salida de los humos es mayor. Es decir, cuanto más se enfríen los humos antes de salir de la caldera más vapor de agua condensará. Además, mayor será la condensación cuanto menor sea la altitud sobre el nivel del mar a la que se encuentre la caldera. En otras palabras, si la altitud sobre el nivel del mar es baja, la presión atmosférica es alta. Si la presión atmosférica es alta la presión parcial del vapor de agua aumenta (para la misma fracción molar del vapor de agua en los humos). Si la presión parcial del vapor de agua aumenta, la temperatura de rocío también lo hace y esto implica que los humos empiecen a condensar antes favoreciendo así la condensación



del vapor de agua. Aplicando la ecuación IV-9 se observa que la temperatura de rocío disminuye con la altitud sobre el nivel del mar, por lo que se dificulta la condensación.

También cabe resaltar que, para una misma temperatura de salida de humos, la cantidad de agua condensada será mayor para un exceso de aire más pequeño, ya que la temperatura de rocío será más alta (la presión parcial es mayor) y resultará más sencillo enfriar los humos por debajo de esa temperatura.

Respecto al rendimiento también se puede concluir que: manteniendo el índice de exceso de aire constante, el rendimiento descenderá según aumente la temperatura de salida de humos. Esto se deduce de una manera sencilla con la ecuación IV-16, en la que se observa que, al disminuir la masa de agua condensada, también lo hará el rendimiento. Lo mismo sucede manteniendo constante la altitud sobre el nivel del mar. Además, relacionado directamente con lo mencionado en el párrafo anterior, los mayores rendimientos se alcanzan, para una determinada temperatura de salida de humos, cuanto menor es el índice de exceso de aire y la altitud sobre el nivel del mar.

Una vez se ha visto todo lo anterior, a modo de resumen se tienen las tendencias de la tabla IV-13:

Tabla IV-13. Tendencias estudiadas

TENDENCIAS	
↑ n	↓T <sup>a</sup> rocío
↑ a.s.n.m	↓T <sup>a</sup> rocío
↑T <sup>a</sup> Humos	↓η
↑ n	↓η
↑ a.s.n.m	↓η
↑T <sup>a</sup> Humos	↓Agua condensada
↑ n	↓Agua condensada
↑ a.s.n.m	↓Agua condensada



# V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

---

En el presente capítulo se realizará un análisis y discusión de los resultados anteriores. Además, se establecerá un estudio estadístico de los diferentes datos tomados a partir del modelo realizado para poder complementar dicho análisis. A partir de este, se identificará cómo y de qué manera los distintos factores influyen en este proceso. La utilización de esta metodología de trabajo es fundamental para llegar, a partir de una serie de ensayos, a unos resultados concluyentes. Las herramientas utilizadas en este capítulo son: estudio ortogonal cruzado (Taguchi) y análisis de varianza (ANOVA).

Los principales objetivos de los experimentos son:

- Determinar el valor que han de tomar las variables independientes para lograr los valores óptimos de las variables deseadas.
- Determinar qué variables presentan una mayor importancia e influencia en el estudio y el nivel de dicho grado.

El análisis de varianza (ANOVA) se ha realizado a partir del software estadístico Statgraphics Centurion. Además, como ya se ha ido comentando a lo largo del trabajo, las variables independientes que se modificarán son:

- Índice de exceso de aire (n).
  - Altitud sobre el nivel del mar (a.s.n.m.).
  - Temperatura de los humos a la salida. ( $T^a$  humos).
-

## V.1 PLANTEAMIENTO ANÁLISIS ORTOGONAL

A continuación, se detallará una serie de tablas pertenecientes al análisis ortogonal cruzado realizado, y que posteriormente se utilizarán para el análisis de varianza:

*Tabla V-1. Análisis para n=1,1 y a.s.n.m=0m*

<b>n=1,1 a.s.n.m=0m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,1	0	38	1,062	105,616
1,1	0	42	0,899	104,466
1,1	0	46	0,702	103,125
1,1	0	50	0,468	101,564
1,1	0	54	0,191	99,748
1,1	0	58	0	97,640

*Tabla V-2. Análisis para n=1,1 y a.s.n.m=200m*

<b>n=1,1 a.s.n.m=200 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,1	200	38	1,046	105,519
1,1	200	42	0,878	104,346
1,1	200	46	0,677	102,978
1,1	200	50	0,438	101,383
1,1	200	54	0,154	99,528
1,1	200	58	0	97,374

*Tabla V-3. Análisis para n=1,1 y a.s.n.m=400m*

<b>n=1,1 a.s.n.m=400 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,1	400	38	1,029	105,420
1,1	400	42	0,857	104,223
1,1	400	46	0,651	102,827
1,1	400	50	0,406	101,199
1,1	400	54	0,115	99,304
1,1	400	58	0	97,103

## V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

*Tabla V-4. Análisis para n=1,1 y a.s.n.m=600m*

<b>n=1,1 a.s.n.m=600 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar</b>	<b>T<sup>a</sup> humos</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>Rendimiento</b>
	<b>[m]</b>	<b>[°C]</b>	<b>gas]</b>	<b>[%]</b>
1,1	600	38	1,012	105,318
1,1	600	42	0,836	104,097
1,1	600	46	0,625	102,672
1,1	600	50	0,374	101,009
1,1	600	54	0,076	99,074
1,1	600	58	0	96,824

*Tabla V-5. Análisis para n=1,1 y a.s.n.m=843m*

<b>n=1,1 a.s.n.m=843 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar</b>	<b>T<sup>a</sup> humos</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>Rendimiento</b>
	<b>[m]</b>	<b>[°C]</b>	<b>gas]</b>	<b>[%]</b>
1,1	843	38	0,990	105,192
1,1	843	42	0,809	103,941
1,1	843	46	0,592	102,479
1,1	843	50	0,334	100,774
1,1	843	54	0,027	98,787
1,1	843	58	0	96,477

*Tabla V-6. Análisis para n=1,1 y a.s.n.m=1000m*

<b>n=1,1 a.s.n.m=1000 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar</b>	<b>T<sup>a</sup> humos</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>Rendimiento</b>
	<b>[m]</b>	<b>[°C]</b>	<b>gas]</b>	<b>[%]</b>
1,1	1000	38	0,976	105,108
1,1	1000	42	0,791	103,837
1,1	1000	46	0,570	102,352
1,1	1000	50	0,307	100,618
1,1	1000	54	0	98,597
1,1	1000	58	0	96,248

El resto de las tablas elaboradas en este análisis se encuentran recogidas en el anexo.

## V.2 PLANTEAMIENTO ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

El Análisis de Varianza (ANOVA) es una fórmula estadística que nos permite evaluar el efecto individual y de dos o más variables independientes (factores) sobre una variable dependiente cuantitativa. En el caso de utilizar varios factores durante un mismo diseño, nos otorga la posibilidad de poder identificar y analizar el efecto de la interacción entre estos. Se trata de una herramienta fundamental para averiguar si la diferencia entre los valores medios es estadísticamente significativa [26].

En el caso de un modelo ANOVA de dos factores se encuentran dos efectos principales (correspondientes a uno por cada factor) y con el efecto de la interacción entre ambos factores, por lo que los efectos de interés son tres.

En un modelo ANOVA de tres factores se tienen tres efectos principales, tres efectos de las interacciones dobles (procedentes de las interacciones de variables dos a dos) y el efecto de la interacción entre los tres factores.

En nuestro estudio, como ya se comentó anteriormente, se tratará de relacionar el índice de exceso de aire ( $n$ ), altura sobre el nivel del mar (a.s.n.m) y temperatura de salida de humos ( $T^a$  humos), que serán los tres factores de estudio, con el rendimiento y la masa de agua condensada.

El software escogido para realizarlo es Statgraphics 19 Centurion.

## V.3 ANOVA RENDIMIENTO

A partir del diseño ortogonal propio, se introducirán los datos en Statgraphics y se realizará el análisis factorial de la varianza a partir de iteraciones de orden 2, ya que de tercer orden no parecen ser muy relevantes. Se obtendrán las tablas V-7, V-8, V-9 y V-10 y las figuras V-1, V-2 y V-3:

*Tabla V-7. Análisis de varianza para el rendimiento*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Exceso de aire ( $n$ )	80,6576	5	16,1315	2887,25	0
B: a.s.n.m [m]	26,5903	5	5,31806	951,84	0
C: $T^a$ Humos [ $^{\circ}$ C]	2192,67	5	438,534	78489,6	0
INTERACCIONES					
AB	0,345441	25	0,0138177	2,47	0,0006
AC	10,1355	25	0,40542	72,56	0

Esta tabla descompone la variabilidad de Rendimiento [%] en contribuciones debidas a los tres factores. Dado que se ha elegido la suma de cuadrados tipo 3, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de ellos, y puesto que 6 valores-P son menores de 0,05, se llega a la conclusión de que estadísticamente tienen un efecto significativo sobre el rendimiento [%] con un 95 [%] de confianza.

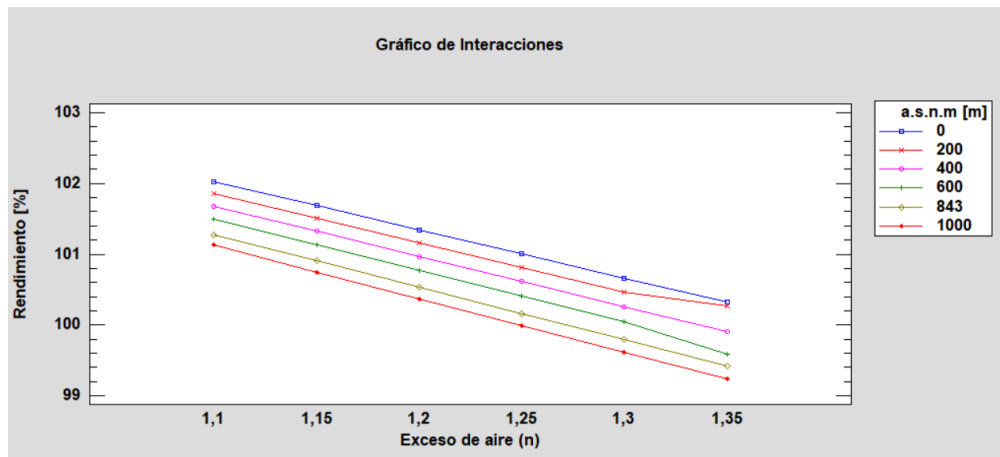


Figura V-1. Gráfico de interacciones de n y a.s.n.m con el rendimiento

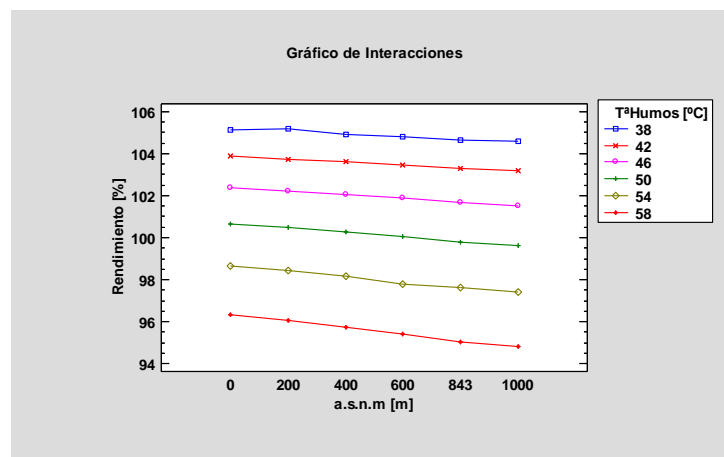


Figura V-2. Gráfico de iteracciones de a.s.n.m y Tªhumos con el rendimiento

Aunque anteriormente se ha visto que hay una gran relación estadística entre los diferentes factores y el rendimiento, se observa sin embargo en ambas figuras que las líneas obtenidas son prácticamente paralelas, lo cual indica que las iteracciones no parecen muy relevantes de cara a la práctica. Esta gráfica de interacción es útil para interpretar la interacción entre a.s.n.m [m], exceso de aire (n) y TªHumos [°C]. Las 6 líneas trazadas en la gráfica representan cada

PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

uno de los niveles de TªHumos [°C]. Conectan las medias de mínimos cuadrados para los 6 niveles de a.s.n.m [m] en la gráfica inferior, y los 6 niveles de exceso de aire (n) en la gráfica superior. Esto se reafirma con la tabla anterior, en la columna de la suma de cuadrados.

Como consecuencia de lo anterior, se decide interpretar los efectos principales a partir de las pruebas de rango múltiple:

Tabla V-8. Prueba de múltiples rangos para rendimiento por exceso de aire (n)

Exceso de aire (n)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1,35	36	99,79	0,0124579	X
1,3	36	100,141	0,0124579	X
1,25	36	100,5	0,0124579	X
1,2	36	100,859	0,0124579	X
1,15	36	101,218	0,0124579	X
1,1	36	101,577	0,0124579	X

Tabla V-9. Prueba de múltiples rangos para rendimiento por Tª de humos

TªHumos [°C]	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
58	36	95,5683	0,0124579	X
54	36	98,0095	0,0124579	X
50	36	100,144	0,0124579	X
46	36	101,962	0,0124579	X
42	36	103,52	0,0124579	X
38	36	104,881	0,0124579	X

Tabla V-10. Prueba de múltiples rangos para Rendimiento por a.s.n.m

a.s.n.m [m]	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1000	36	100,182	0,0124579	X
843	36	100,346	0,0124579	X
600	36	100,576	0,0124579	X
400	36	100,792	0,0124579	X
200	36	101,012	0,0124579	X
0	36	101,176	0,0124579	X

Se puede observar claramente, que, en la columna de grupos homogéneos, la posición de las X's es muy diferente entre sí, lo cual indica que sí que hay diferencias estadísticamente significativas entre los niveles.



Por último, se observa la gráfica residuos vs predichos:

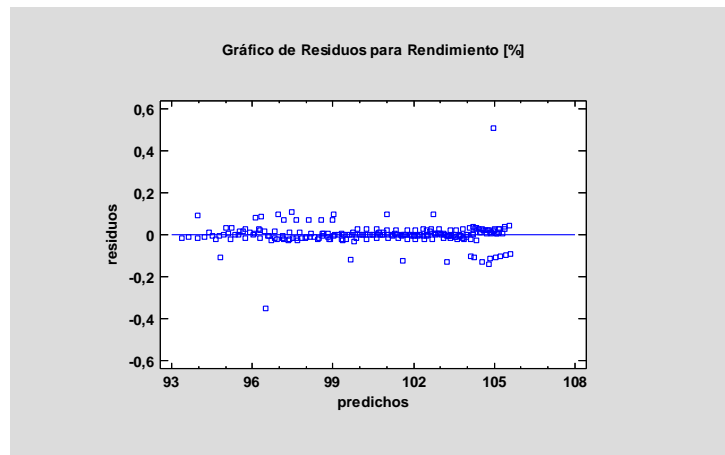


Figura V-3. Gráfica residuos vs predichos para el rendimiento

La figura V-3 muestra los residuos frente a los valores predichos de Rendimiento [%]. Esta gráfica es útil para detectar heteroscedasticidad, en la cual la varianza de Rendimiento [%] cambia conforme lo hace la media. Si los puntos forman un patrón general en forma de embudo, esto indica un tipo de heteroscedasticidad que a menudo puede corregirse transformando la variable dependiente.

A modo de conclusión, se podría decir que, estadísticamente todos los factores tienen una importancia muy significativa sobre el rendimiento, sin poder determinar cuál de ellos tiene más importancia, ya que los respectivos P-valores son muy bajos. A partir de las pruebas de rango múltiple se observa que cuanto mayor es la temperatura de salida de humos, menor será el rendimiento, estando el valor óptimo para nuestro rango de temperaturas en 38°C. Los valores óptimos de altitud sobre el nivel del mar y de exceso de aire se encuentran en 0 metros y en 1,1 respectivamente. De esta manera, se llega a las mismas conclusiones del modelo teórico, pero esta vez desde un punto de vista estadístico.

#### V.4 ANOVA AGUA CONDENSADA

Para la realización del siguiente análisis factorial de la varianza se procede del mismo modo que en el apartado anterior. Se obtendrán las tablas V-11, V-12, V-13 y v-14, y las figuras V-4, V-5 y V-6:

PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE  
CONDENSACIÓN

Tabla V-11. Análisis de varianza para masa de agua condensada

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS					
PRINCIPALES					
A: Exceso de aire (n)	0,607581	5	0,121516	419,75	0
B: a.s.n.m [m]	0,270377	5	0,0540755	186,79	0
C: TªHumos [°C]	27,3287	5	5,46574	18880,07	0
INTERACCIONES					
AB	0,00361588	25	0,000144635	0,5	0,9768
AC	0,229339	25	0,00917355	31,69	0
BC	0,0894398	25	0,00357759	12,36	0
RESIDUOS	0,0361873	125	0,000289498		
TOTAL (CORREGIDO)	28,5653	215			

Como se puede observar en este caso, 5 de los 6 valores-P son menores que 0,05, por lo que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la masa de agua condensada con un 95% de confianza. El único valor-P que es mayor de 0,05 es el que relaciona el exceso de aire con la altura sobre el nivel del mar, lo cual es previsible, ya que carece de sentido relacionar solamente estos con la masa de agua condensada sin tener en cuenta el factor temperatura de salida de humos.

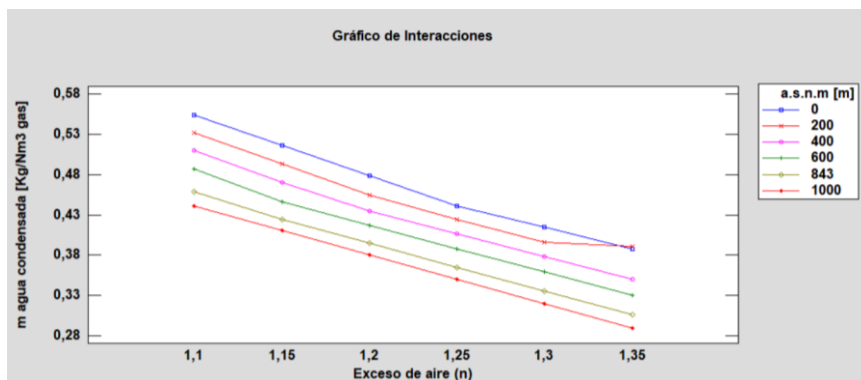


Figura V-4. Gráfico de iteraciones de  $n$  y a.s.n.m con masa de agua condensada

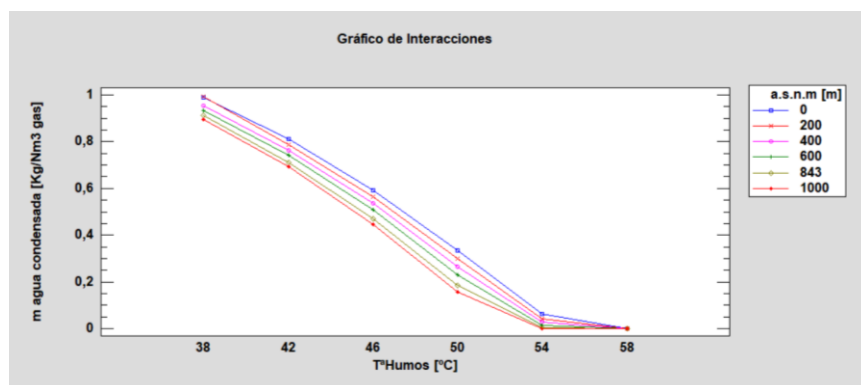


Figura V-5. Gráfico de interacciones de  $T^a$  de humos y a.s.n.m con masa de agua condensada

En las figuras V-4 y V-5 se aprecia que la tendencia de las líneas es aproximadamente paralela, siendo las iteraciones muy poco relevantes también. En la segunda ilustración, como no podía ser de otra forma, el motivo por el que las líneas tienden a valores nulos de agua condensada cuando la temperatura de salida de humos es alta es debido a que no se alcanza el punto de rocío en los humos.

Tabla V-12. Prueba de Múltiple Rangos para masa de agua condensada por exceso de aire ( $n$ )

Exceso de aire ( $n$ )	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1,35	36	0,342175	0,00283577	X
1,3	36	0,367222	0,00283577	X
1,25	36	0,395722	0,00283577	X
1,2	36	0,426639	0,00283577	X
1,15	36	0,460278	0,00283577	X
1,1	36	0,497061	0,00283577	X

PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

Tabla V-13. Prueba de Múltiples Rangos para masa de agua condensada por  $T^a$  de humos

$T^a$ Humos [°C]	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
58	36	0	0,00283577	X
54	36	0,0253111	0,00283577	X
50	36	0,245969	0,00283577	X
46	36	0,520397	0,00283577	X
42	36	0,750831	0,00283577	X
38	36	0,946589	0,00283577	X

Tabla V-14. Prueba de Múltiples Rangos para masa de agua condensada por a.s.n.m

a.s.n.m [m]	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1000	36	0,365214	0,00283577	X
843	36	0,380731	0,00283577	X
600	36	0,404603	0,00283577	X
400	36	0,424703	0,00283577	X
200	36	0,448553	0,00283577	X
0	36	0,465294	0,00283577	X

En cuanto a las tablas correspondientes a grupos homogéneos, vuelven a indicar que todas las medidas son significativamente diferentes entre los niveles, ya que las posiciones de las X's son muy diferentes entre sí.

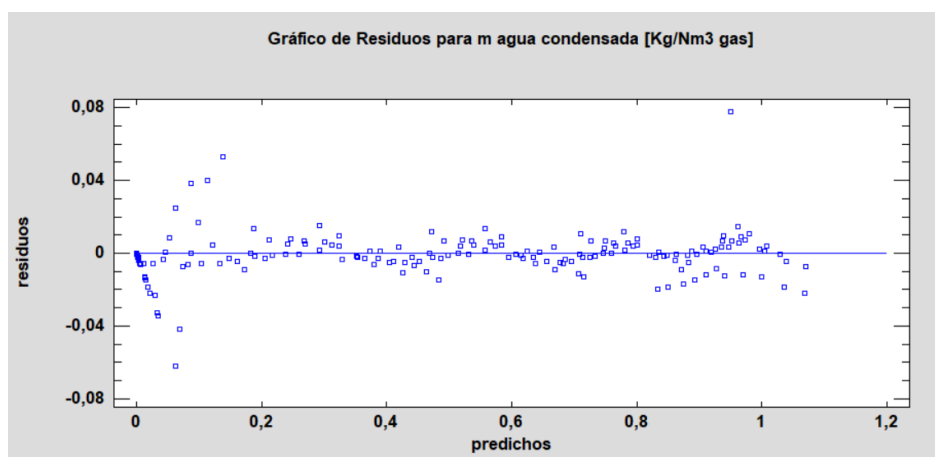


Figura V-6. Gráfico residuos vs predichos para m de agua condensada

Al igual que en el apartado anterior, la figura V-6 muestra los residuos frente a los valores predichos de m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]. Esta gráfica es

útil para detectar heteroscedasticidad, en la cual la varianza de  $m$  agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas] cambia conforme lo hace la media. Si los puntos forman un patrón general en forma de embudo, esto indica un tipo de heteroscedasticidad que a menudo puede corregirse transformando la variable dependiente. Sin embargo, en este caso se ven valores que se alejan del 0. Esto se debe a que, para temperaturas de salidas de humos muy altas, el agua contenida en estos no condensa, por lo que se tiene en cierta forma una cota inferior de 0 kg de agua condensada. Esto es lo que origina esa dispersión que se puede observar.

Las conclusiones que se pueden sacar de esta ANOVA son las siguientes: como era de esperar, el factor temperatura de los humos tiene un papel determinante en la influencia del agua condensada. Además, se puede encontrar la mayor cantidad de agua condensada al nivel del mar (0 m de altitud) para una temperatura de salida de humos de 38°C, un índice de exceso de aire de 1,1. De esta manera, también llegamos a las mismas conclusiones del modelo teórico desde un punto de vista estadístico.



# VI. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO

En el presente capítulo se establecerán las principales conclusiones y líneas de futuro de acuerdo con el análisis y discusión de los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

## VI.1 CONCLUSIONES

En el capítulo anterior se realizó una interpretación de los resultados más exhaustiva, donde se analizaban las tendencias de todas las variables que afectan al rendimiento de la caldera. En este capítulo el objetivo es otro, ahora se pretende comparar el modelo experimental con el modelo teórico para dar solidez a las conclusiones anteriormente descritas y destacar nuevamente aquellas que son más relevantes.

En la tabla VI-1 se realizará una comparación de los resultados obtenidos con nuestro modelo teórico con la caldera de condensación experimental. Cabe destacar que la composición del gas natural que se ha fijado en el trabajo es muy probable que difiera de la utilizada experimentalmente, esto es una fuente de incertidumbre que induce un error que no se puede estimar. La temperatura de los gases de escape ha sido fijada en 40°C, considerando que es el valor que más típico durante los periodos de operación constante de la caldera, como se puede observar en la figura III-2.

*Tabla VI-1. Comparativa de los resultados obtenidos mediante el modelo teórico y el estudio experimental*

Procedimiento	a.s.n.m (m)	Exceso de aire	Thumos (°C)	[O2]%vol.	[CO2]%vol.	Agua condensada (Kg/Nm3)	$\eta$ (%)
Modelo teórico	843	1.27	40	4.46	8.56	0,864	99.58
Modelo experimental	843	1.27	30–56.8	4.4	9.41	0,84	99.10

Como se puede apreciar, el modelo teórico se ajusta al montaje experimental. Por ejemplo, en el cálculo del rendimiento hay un error menor a un punto porcentual (<1%). Los errores obtenidos pueden ser consecuencia principalmente de varios motivos: la variación de la composición del gas natural elegida respecto a la real, no tener en cuenta la humedad del aire a la hora de establecer el modelo teórico y errores en la formulación de cómo se considera el proceso de condensación del agua dentro de la caldera. De esta manera en el modelo teórico se podrá observar que la condensación de agua siempre es mayor que en la caldera experimental, por lo que, como consecuencia, el rendimiento también lo será.

Respecto a la relación existente entre el índice de exceso de aire con el rendimiento y la masa de agua condensada, se observa a partir del modelo teórico y sus respectivas gráficas (se encuentran en el Anexo) que, a medida que disminuye el índice de exceso de aire, aumenta tanto el rendimiento como la masa de agua condensada para una misma temperatura de los humos a la salida. A medida que aumenta la temperatura de los humos, disminuye tanto el rendimiento como la masa de agua condensada para cualquier índice de exceso de aire.

En cuanto a la relación entre la altura del nivel del mar con el rendimiento y la cantidad de agua condensada, también se encuentra una situación muy similar a la anterior. A medida que disminuye la altitud sobre el nivel del mar, aumenta el rendimiento y la masa de agua condensada para una misma temperatura de los humos a la salida. A medida que aumentan la temperatura de los humos a la salida, se puede observar que el rendimiento y el agua condensada también disminuyen para cualquier altitud sobre el nivel del mar.



## VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1]Moreno,P. (15 de julio de 2019). Evolución de las calderas de condensación. *Estrella digital*.  
<https://www.estrelladigital.es/articulo/empresas/evolucion-calderas-condensacion/20190715192856378673.html>
- [2]Arnabat, I. (13 de noviembre de 2020). Calderas de condensación ¿Cómo funcionan y qué ventajas tienen?.*Caloryfrio.com*  
<https://blog.caloryfrio.com/calderas-condensacion-eficiencia-energetica/>
- [3]Raso.C.(4 de marzo de 2020). La venta de las calderas de condensación en España aumenta un 4% en 2019. *Caloryfrio.com*  
<https://www.caloryfrio.com/noticias/informacion-mercado/venta-calderas-condensacion-espana-aumenta-4-en-2019.html>
- [4]Enagas. (s.f). *El gas natural*.  
<https://www.enagas.es/enagas/es/QuienesSomos/QueEsElGasNatural/ElGasNatural>
- [5]Energía y sociedad. (s.f). *Breve historia del gas natural en España*.  
<https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/1-1-breve-historia-del-gas-natural-en-espana/>
- [6]Cores. (abril de 2022). Volumen de las importaciones de gas natural y gas natural licuado (GNL) a España en 2021. *Statista.com*  
<https://es.statista.com/estadisticas/993973/volumen-de-gas-natural-y-gas-natural-licuado-importado-desde-espana-por-paises/>
- [7]Rey Martínez FJ, San José Alonso JF, Velasco Gómez E, Tejero González A, Andrés Chicote M. *Ingeniería Térmica*. Grupo de Termotecnia, Dpto de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. Universidad de Valladolid.
- [8]Consejería de Economía y Hacienda de la Comunidad de Madrid. (s.f). *Guía Básica Calderas de Condensación*.
- [9]Fernández. JF. (s.f). Poder Calorífico. *Máquinas Térmicas*. (2-22). Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional de Mendoza.
- [10]García San José R. (2001). *Combustión y combustibles*.

- [11]De Andrés JA, Rodríguez Pomatta, Aroca Lastra. S, Arteaga del Campo A, García Gándara M, García Quesada M. *Calor y Frío Industrial 1*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- [12]De Andrés JA, Rodríguez Pomatta, Aroca Lastra. S, Arteaga del Campo A, García Gándara M, García Quesada M. *Calor y Frío Industrial 2*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- [13]Sonntag RE, Van Wylen GJ. (1977) *Introducción a la termodinámica clásica y estadística*. Limusa.
- [14]Rohsenow WM, Hartnett JP, Cho YI. (1998). *Handbook of Heat Transfer*. Mcgraw-Hill.
- [15] (s.f). (5 de agosto de 2019). Temperatura seca, temperatura húmeda y temperatura efectiva. *Actitud Ecológica*.  
<https://actitudecologica.com/temperatura-seca-temperatura-humeda-y-temperatura-efectiva/>
- [16](s.f). ¿Qué es el punto de rocío y cómo medirlo? *Vaisala*.<https://www.vaisala.com/es/blog/2019-10/que-es-el-punto-de-rocio-y-como-medirlo>
- [17](s.f). (9 de abril de 2018). Humedad relativa, específica y absoluta. *S&P*.<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/>
- [18]Necati Özisik M. (1985). *Heat Transfer: A Basic Approach*. McGraw-Hill
- [19]Pérez-Hickman Tiedtke J, Fernández Salinas S. (9 de abril de 2012). Caldera de condensación frente a la caldera estándar. *Canales sectoriales*.<https://www.interempresas.net/Climatizacion/Articulos/65661-Caldera-de-condensacion-frente-a-caldera-estandar.html>
- [20]Moran MJ, Shapiro HN, Turégano JA. *Fundamentos de termodinámica técnica* 2ª Edición ed: Reverté. 2004
- [21] Asociación Española para la Calidad. *Introducción a los métodos Taguchi para la ingeniería de calidad*
- [22] Fischer R. *The Design of Experiments*, 1935

- [23] Velasco Gómez E. Rendimiento de los procesos de combustión. Lección V.2: Tecnología de la combustión, Ingeniería Térmica. Universidad de Valladolid. 2012
- [24][Horak, J.; Kubonova, L.; Krpec, K.; Hopan, F.; Kubesa, P.; Motyka, O.; Laciok, V.; Dej, M.; Ochodek, T.; Placha, D. PAH emissions from old and new types of domestic hot water boilers. *Environ. Pollut.* **2017**, *225*, 31–39. [CrossRef] [PubMed]
- [25][Boulahlib, M.S.; Medaerts, F.; Boukhalifa, M.A. Experimental study of a domestic boiler using hydrogen methane blend and fuel-rich staged combustion. *Int. J. Hydrog. Energy* **2021**, in press. [CrossRef]
- [26]Triola MF. *Essentials of Statistics*. Pearson International Edition
- [27]Tejero González. A. (2021). *Apuntes instalaciones térmicas*. Universidad de Valladolid.
- [28]Fernández Ladrera. H. (10 de diciembre de 2014). Caldera estándar, de baja temperatura y de condensación. *Certificado de eficiencia energética*.<https://certificadodeeficienciaenergetica.com/articulo/caldera-estandar-baja-temperatura-y-condensacion>
- [29][Poling, B.E.; Prausnitz, J.M.; O'Connell, J.P. The Properties of Gases and Liquids. McGraw Hill Professional, 2000. Available online: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=576b60dc3d7f4b3e0b1acf84&assetKey=AS%3A375993815584769%401466655319665> (accedido el 12 de Octubre de 2021).]
- [30]Raso.C. (5 de marzo de 2019). Las ventas de calderas murales en España aumentan un 12,5% con la tecnología de condensación como protagonista. *Caloryfrio.com*.  
<https://www.caloryfrio.com/noticias/informacion-mercado/ventas-calderas-murales-espana-aumentan-12-5-tecnologia-condensacion-protagonista.html>.
- [31] Sthexpert. (23 de abril de 2019). *Sistema de calefacción por suelo radiante a baja temperatura*.  
<https://sthexpert.standardhidraulica.com/biofloor-calefaccion-por-suelo-radiante-a-baja-temperatura/#:~:text=El%20suelo%20radiante%20de%20agua,adem%C3%A1s%20de%20un%20ahorro%20energ%C3%A9tico>
- [32] Climatic. (s.f). *Repuestos quemadores*  
<https://climatik.online/chicler-055g-80h-danfoss-030h8910/>

- [33] Chen, Q.; Finney, K.; Li, H.; Zhang, X.; Zhou, J.; Sharifi, V.; Swithenbank, J. Condensing boiler applications in the process industry. 2010  
<https://www.journals.elsevier.com/applied-energy>
- [34] Trojanowski, R.; Butcher, T.; Worek, M.; Wei, G. Polymer heat exchanger design for condensing boiler applications. 2016  
<https://www.sciencedirect.com/journal/applied-thermal-engineering>
- [35] Balanescu, DT.; Homutescu, VM. Effects of hydrogen-enriched methane combustion on latent heat recovery potential and enviromental impact of condensing boilers (2021)  
<https://www.sciencedirect.com/journal/applied-thermal-engineering>
- [36] Bp (2020) *Statistical review of world energy*  
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

## VIII. ANEXO

En este último capítulo se encuentran las gráficas obtenidas a partir del modelo experimental y del modelo teórico.

### TEMPERATURA DE ROCÍO DE DIVERSOS COMBUSTIBLES

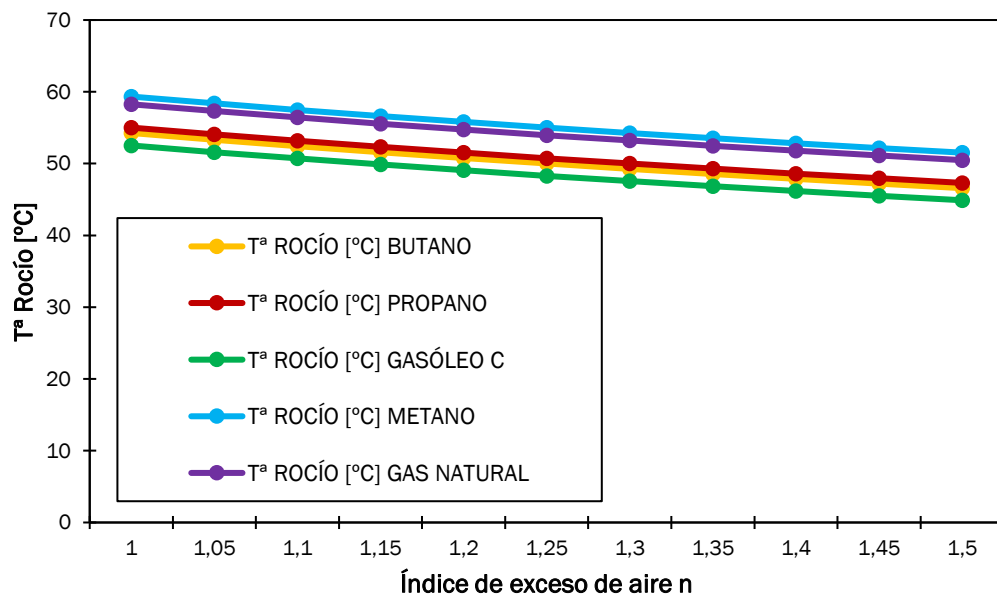


Figura VIII-1. Tª de rocío de diversos combustibles en función del índice de exceso de aire (n).

GRÁFICAS RENDIMIENTO Y MASA DE AGUA CONDENSADA

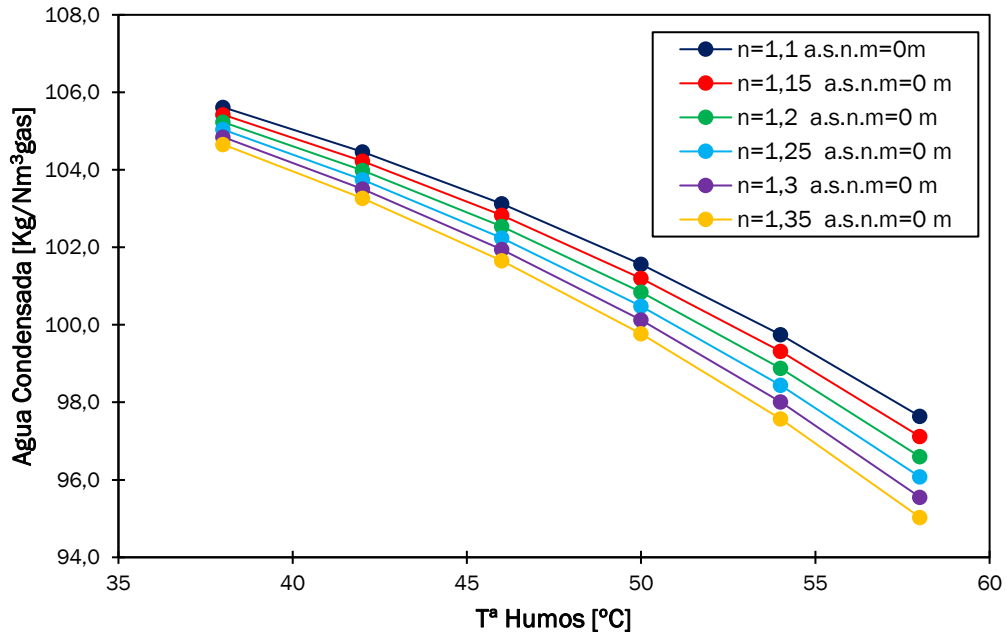


Figura VIII-2. Evolución del rendimiento para a.s.n.m= 0m.

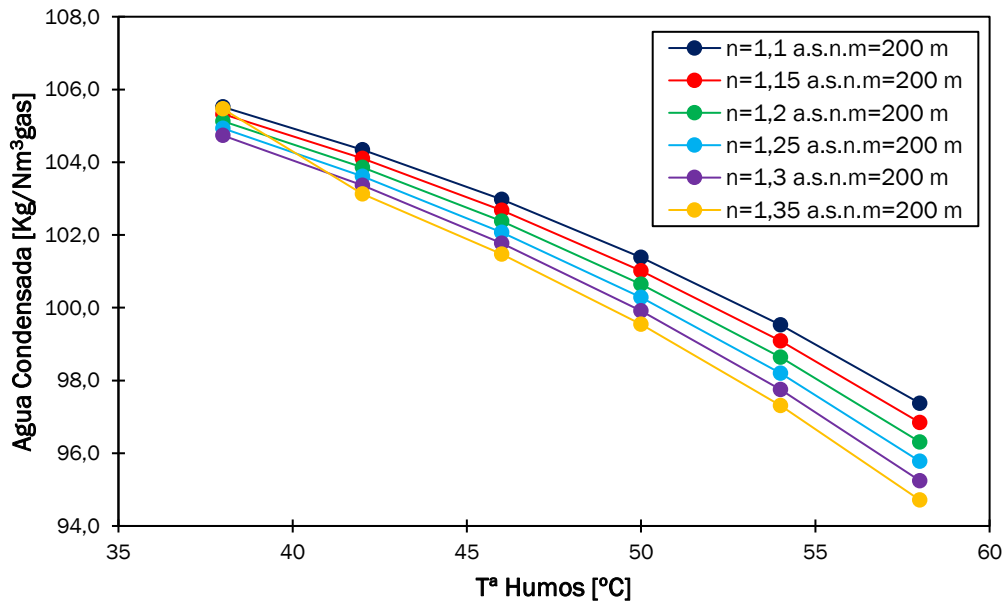


Figura VIII-3. Evolución del rendimiento para a.s.n.m= 200m.

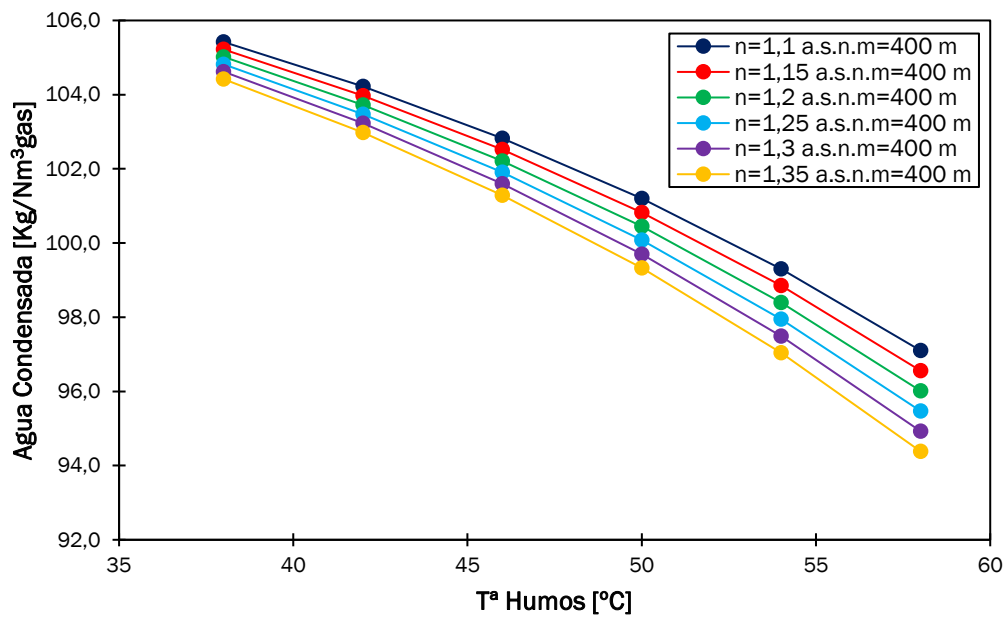


Figura VIII-4. Evolución del rendimiento para a.s.n.m = 400m.

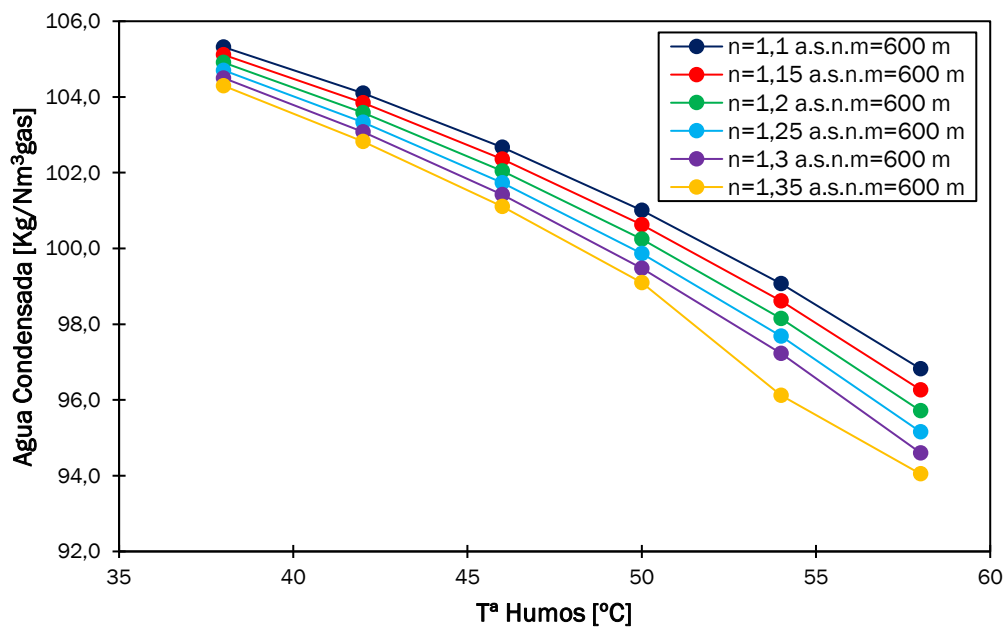


Figura VIII-5. Evolución del rendimiento para a.s.n.m = 600m.

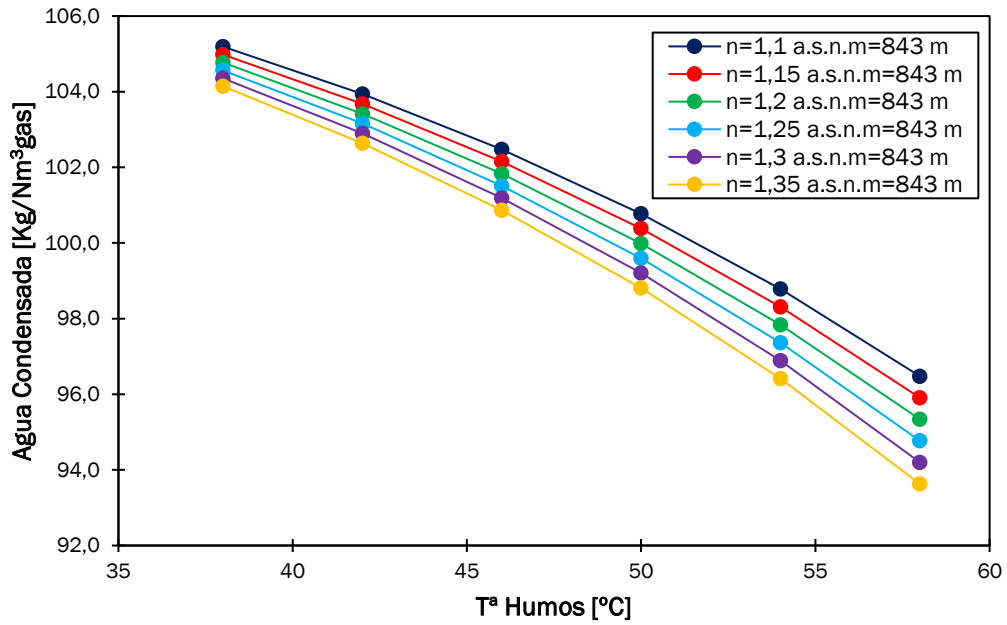


Figura VIII-6. Evolución del rendimiento para a.s.n.m= 843m.

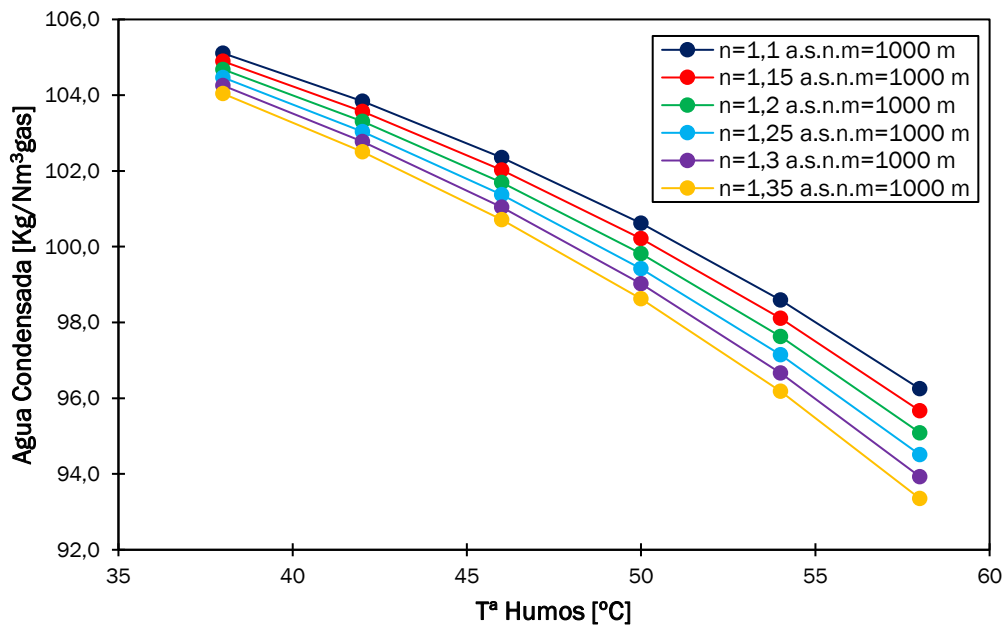


Figura VIII-7. Evolución del rendimiento para a.s.n.m= 1000m.



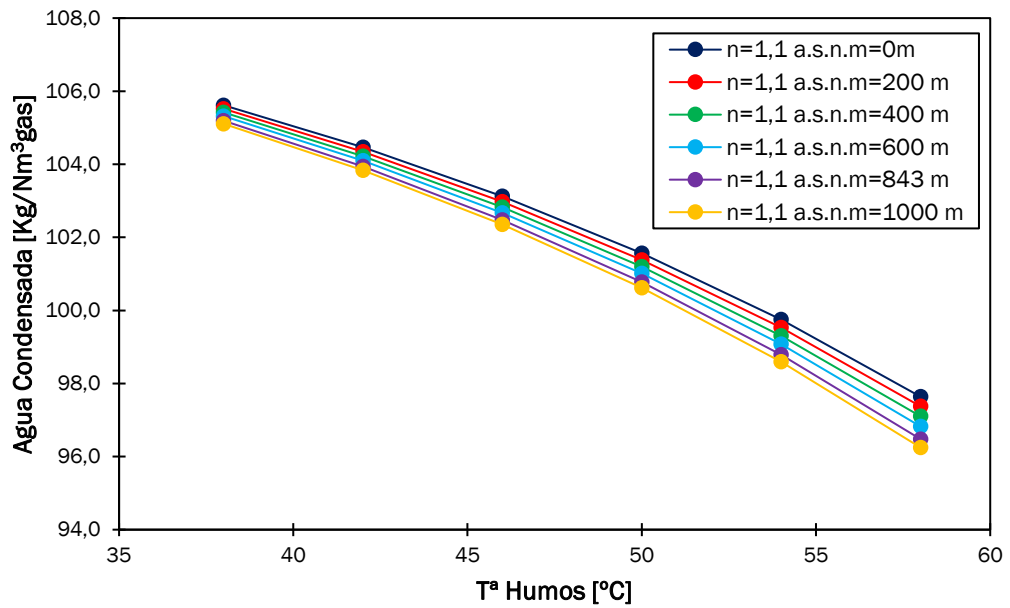


Figura VIII-8. Evolución del rendimiento para n=1,1.

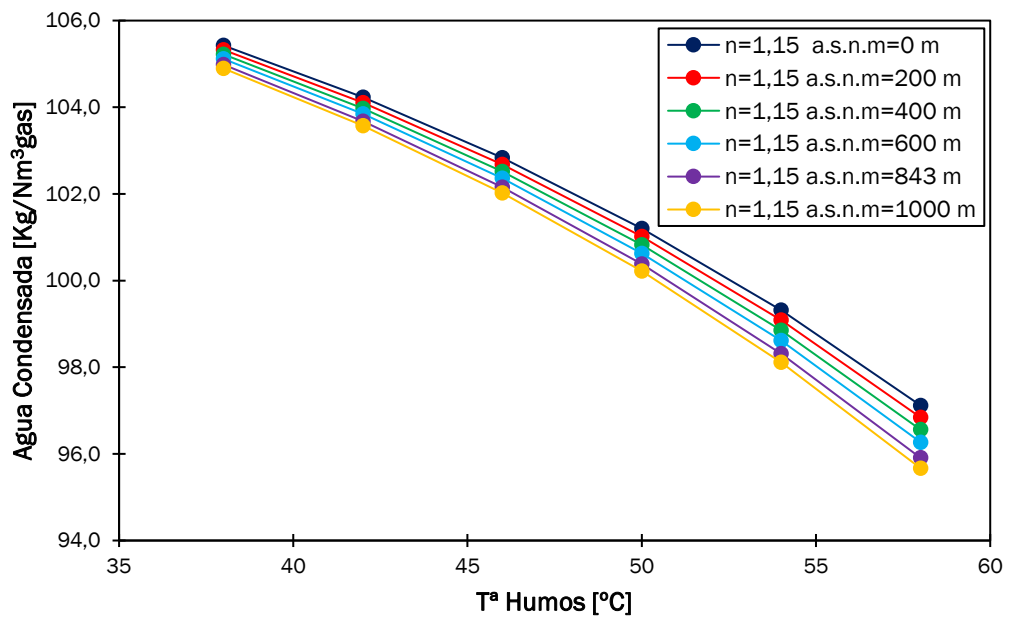


Figura VIII-9. Evolución del rendimiento para n=1,15

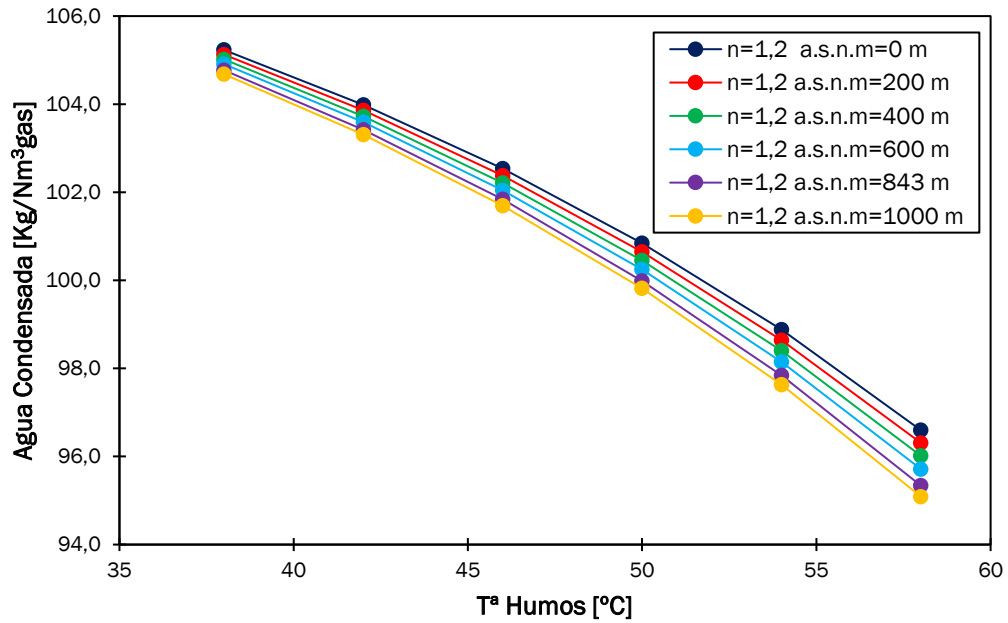


Figura VIII-10. Evolución del rendimiento para n=1,2.

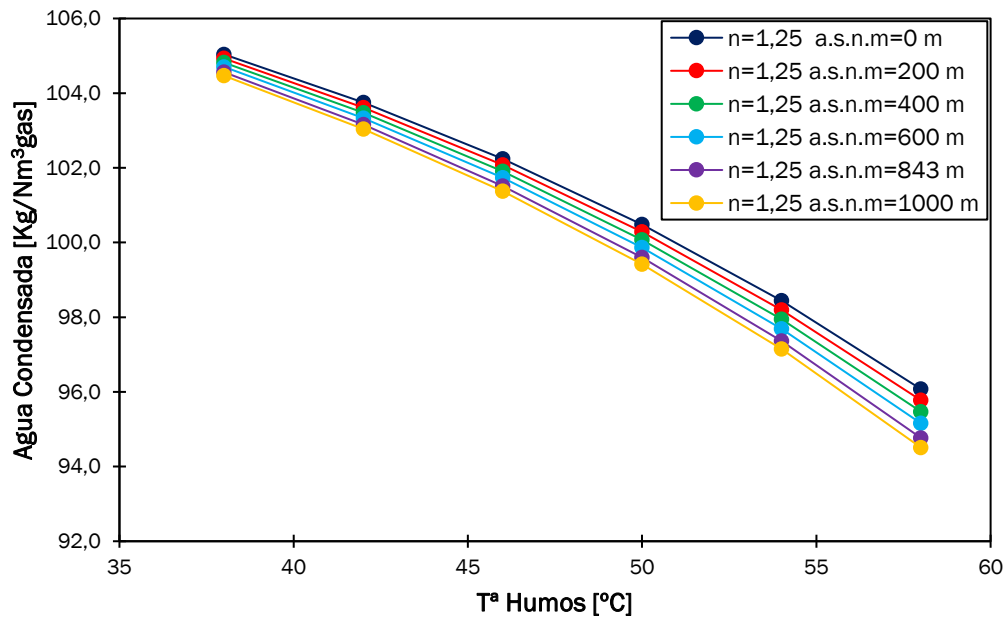


Figura VIII-11. Evolución del rendimiento para n=1,25.

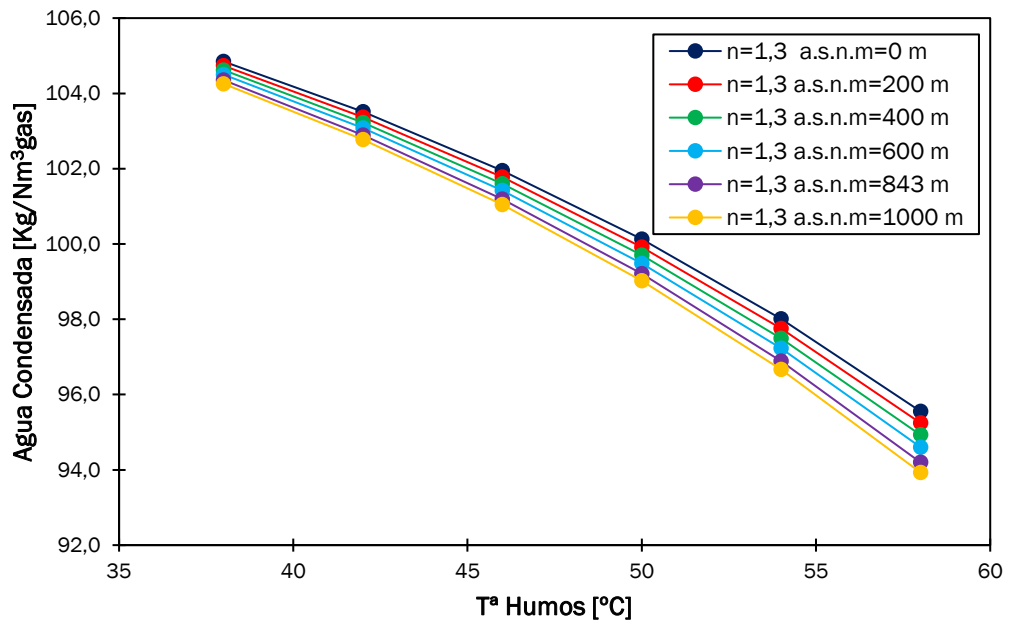


Figura VIII-12. Evolución del rendimiento para n=1,3.

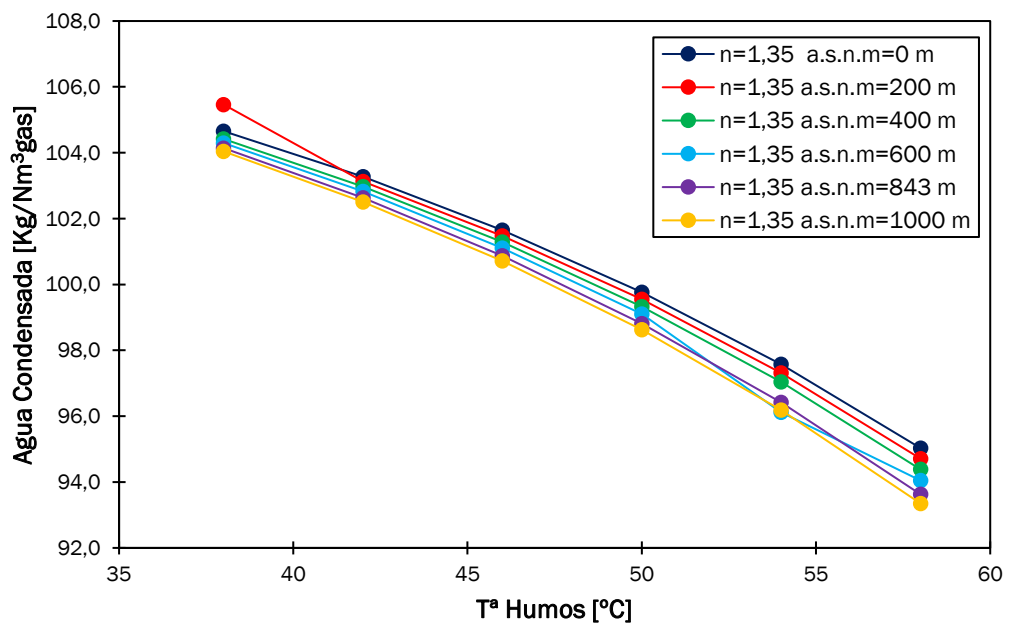


Figura VIII-13. Evolución del rendimiento para n=1,35.

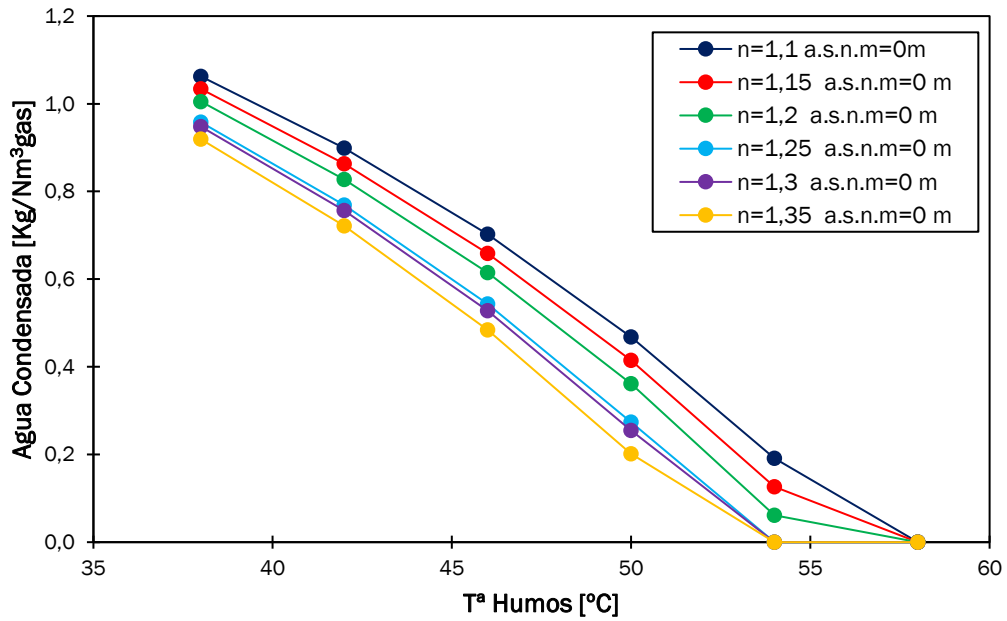


Figura VIII-14. Evolución de la masa de agua condensada para a.s.n.m=0 m.

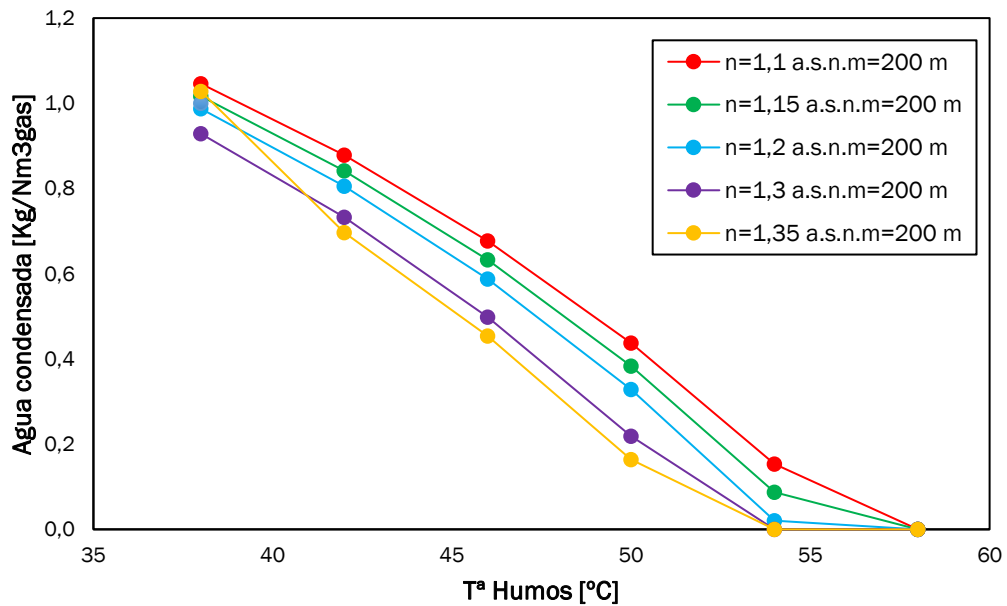


Figura VIII-15. Evolución de la masa de agua condensada para a.s.n.m = 200m.

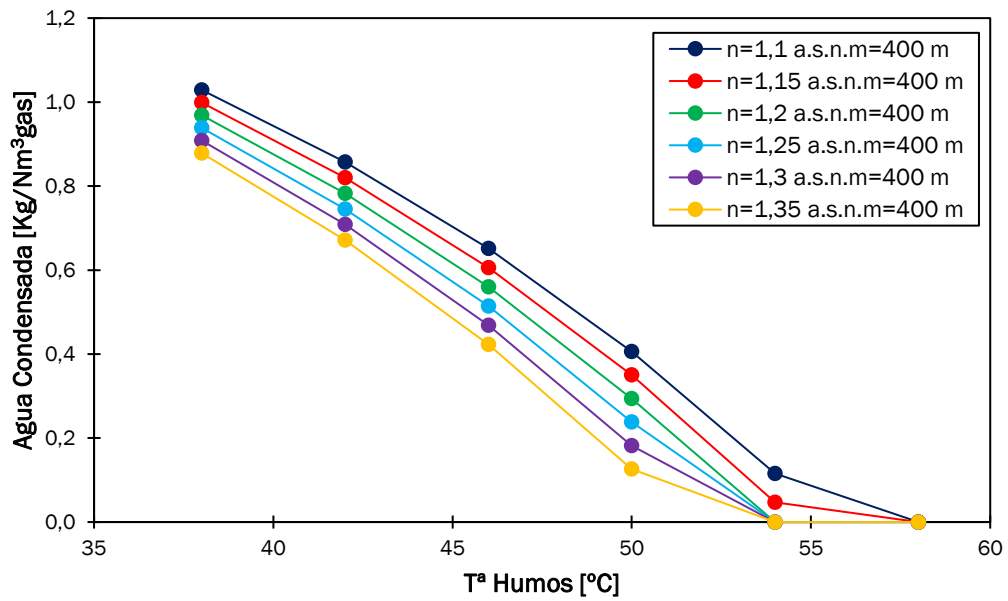


Figura VIII-16. Evolución de la masa de agua condensada para a.s.n.m = 400m

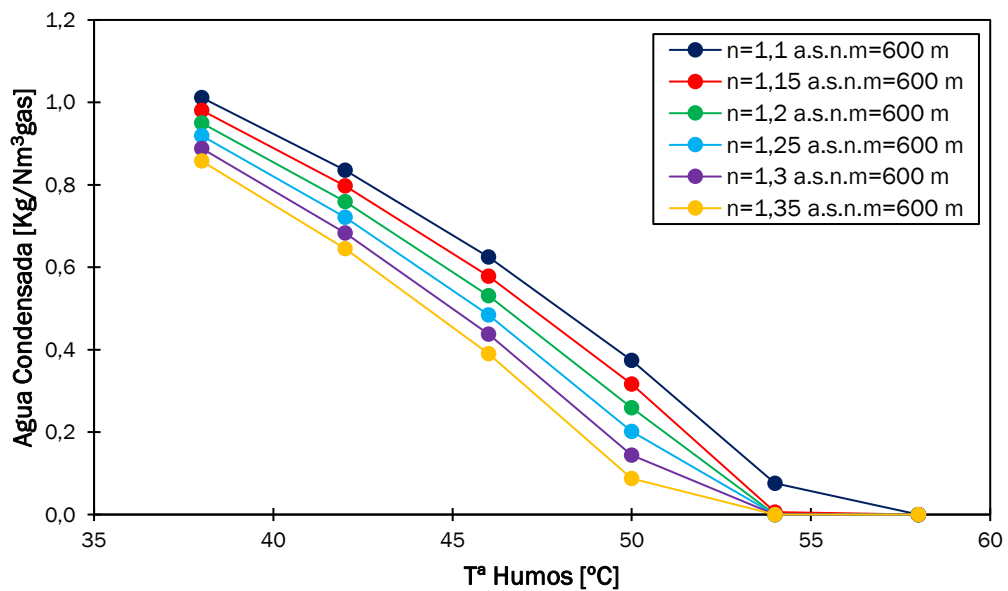


Figura VIII-17. Evolución de la masa de agua condensada para a.s.n.m= 600m.

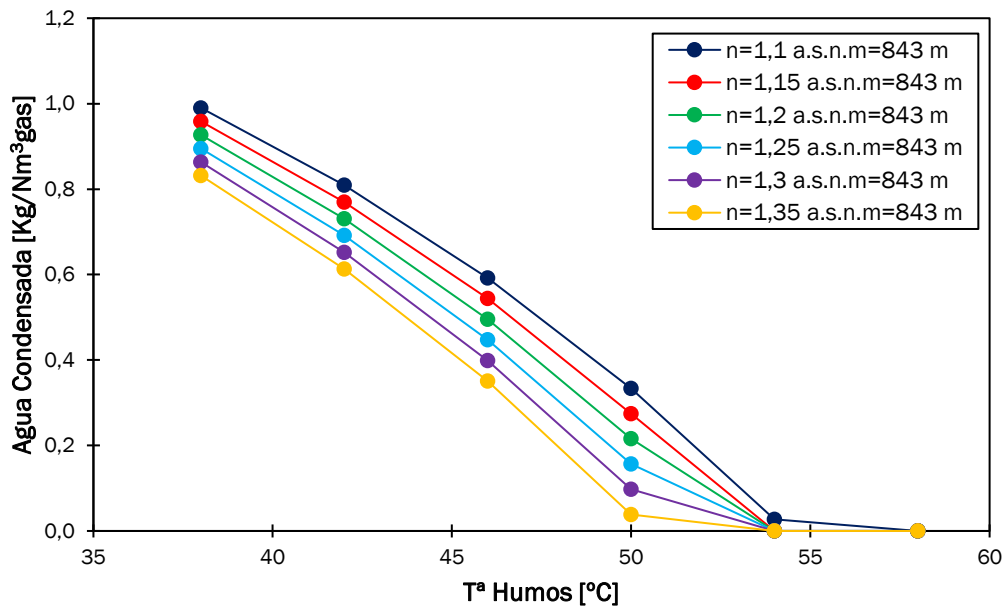


Figura VIII-18. Evolución de la masa de agua condensada para a.s.n.m = 843m.

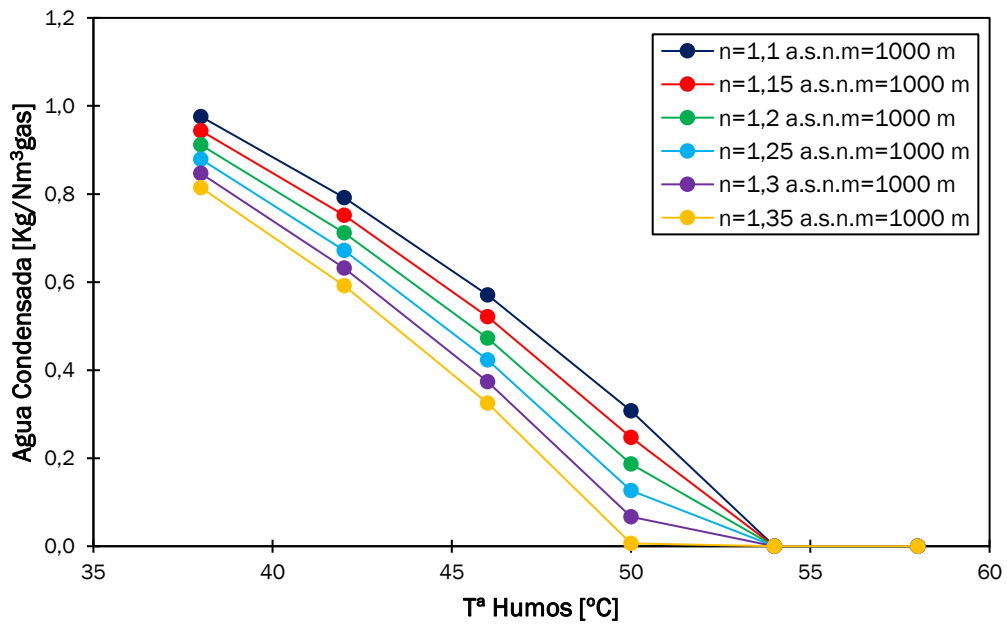


Figura VIII-19. Evolución de la masa de agua condensada para a.s.n.m= 1000m.

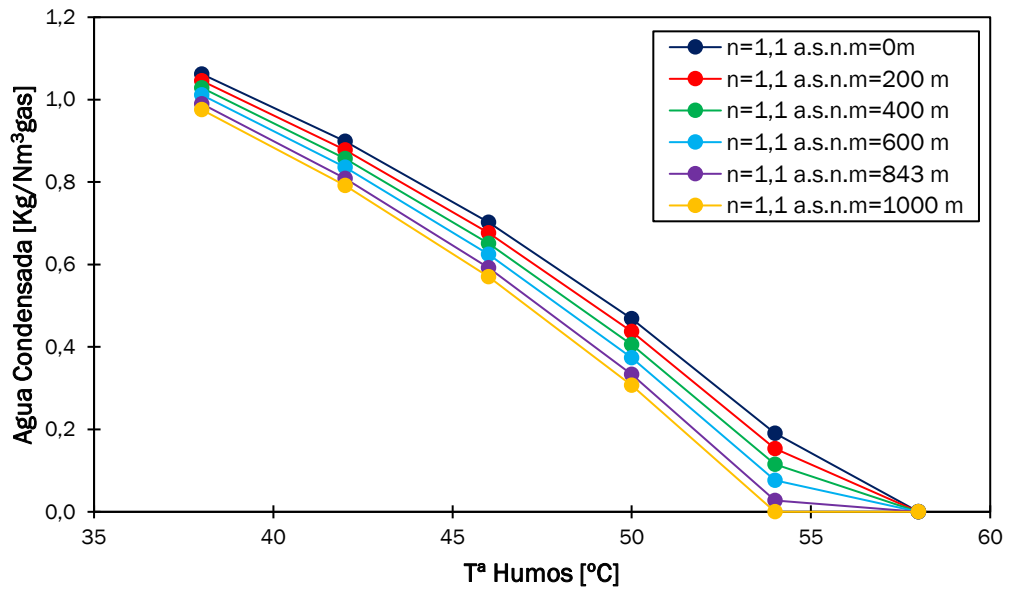


Figura VIII-20. Evolución de la masa de agua condensada para  $n=1,1$ .

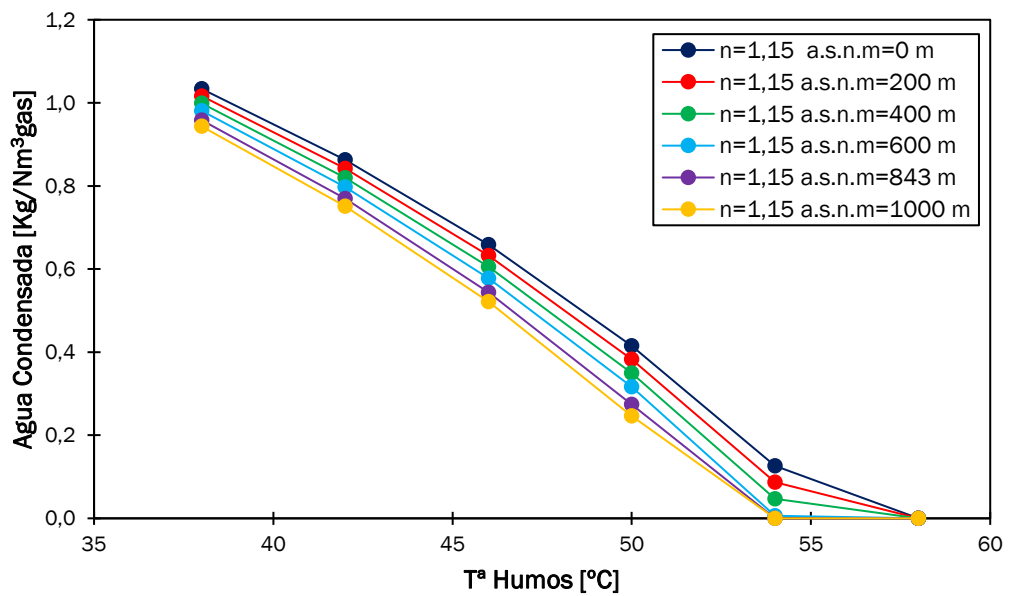


Figura VIII-21. Evolución de la masa de agua condensada para  $n=1,15$ .

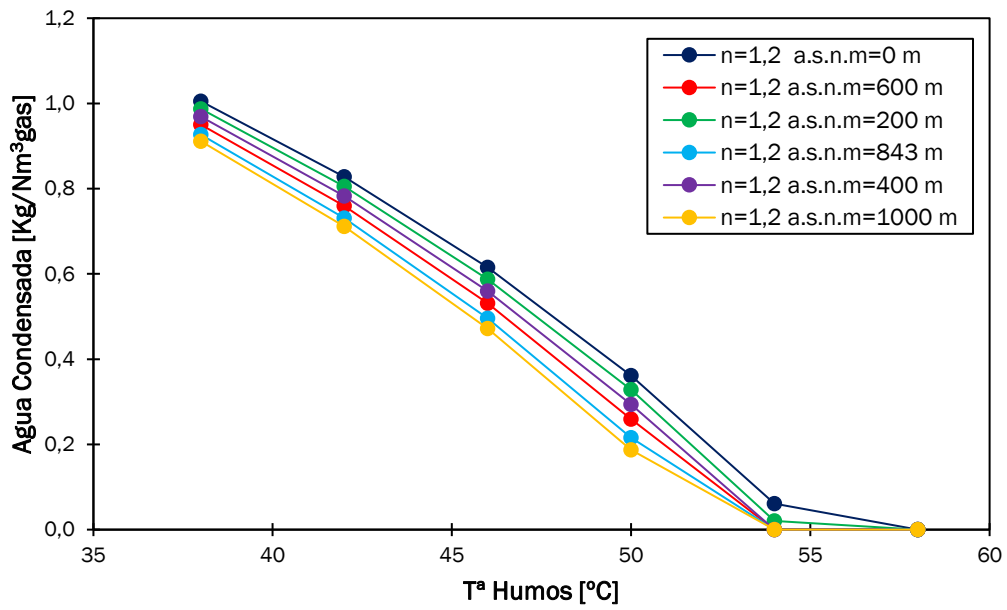


Figura VIII-22. Evolución de la masa de agua condensada para n=1,2.

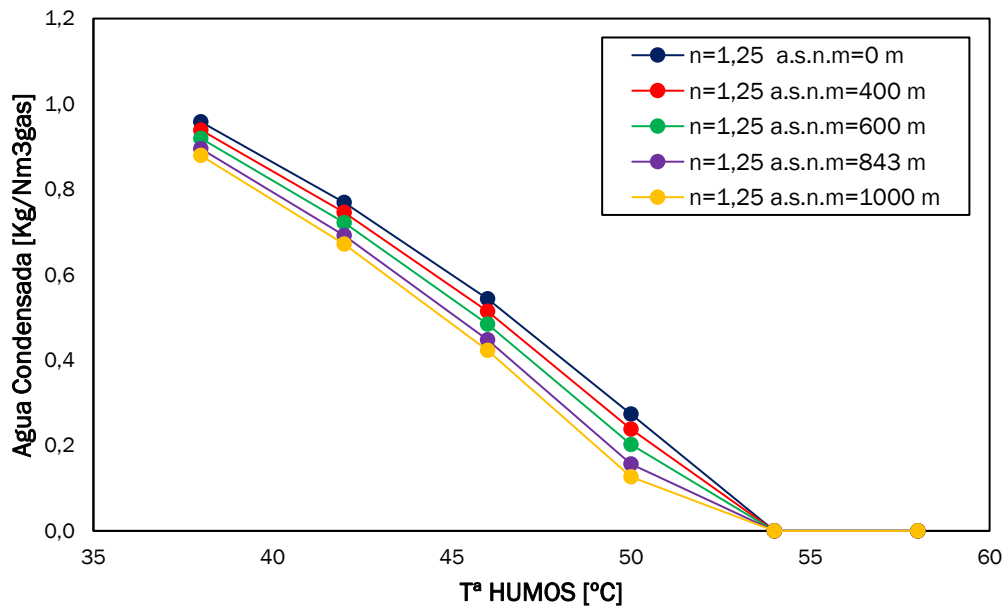


Figura VIII-23. Evolución de la masa de agua condensada para n=1,25.



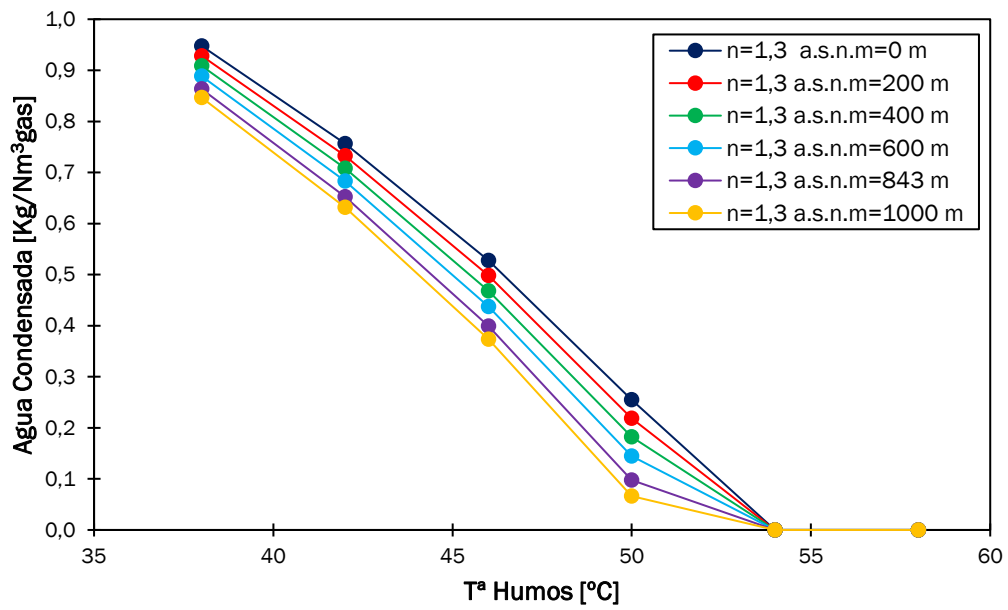


Figura VIII-24. Evolución de la masa de agua condensada para  $n=1,3$ .

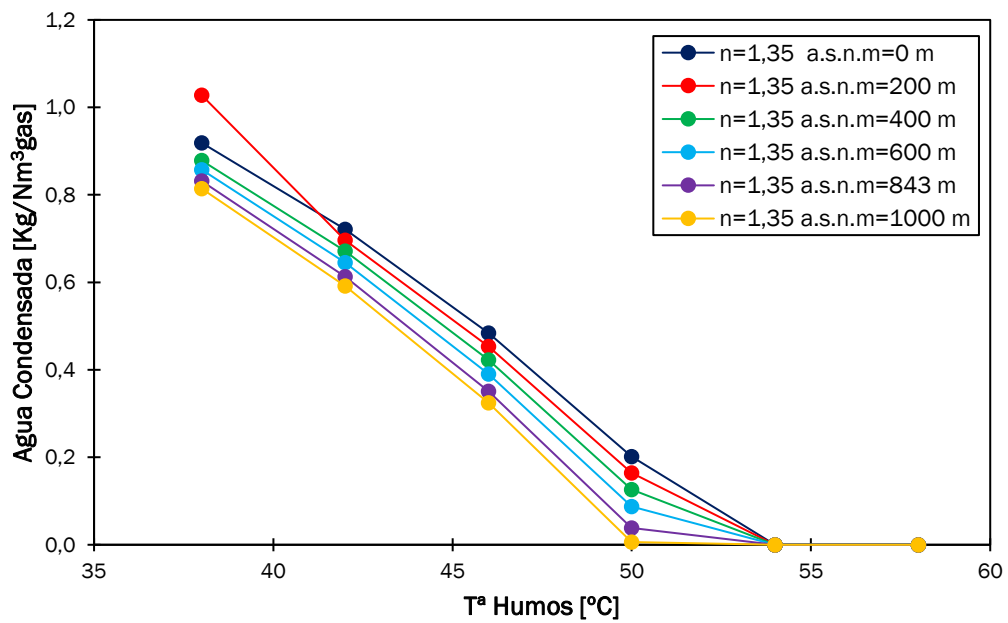


Figura VIII-25. Evolución de la masa de agua condensada para  $n=1,35$ .

A continuación, se pueden observar diferentes gráficas correspondientes a las medidas experimentales tomadas durante cinco semanas de nuestra caldera de condensación:

**SEMANA 1: 25 febrero - 5 de marzo.**

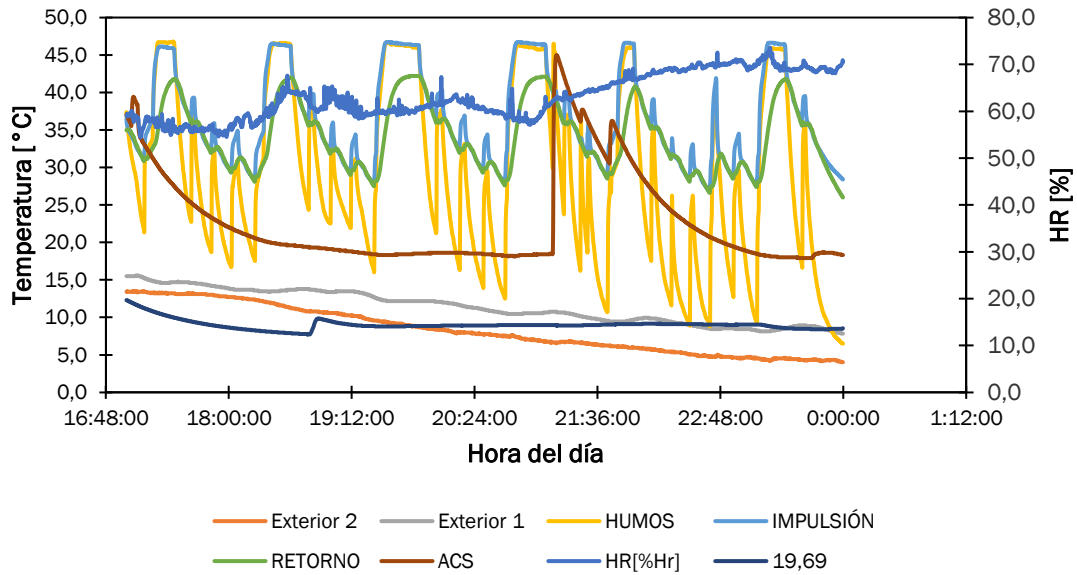


Figura VIII-26. Medidas experimentales 27 de febrero.

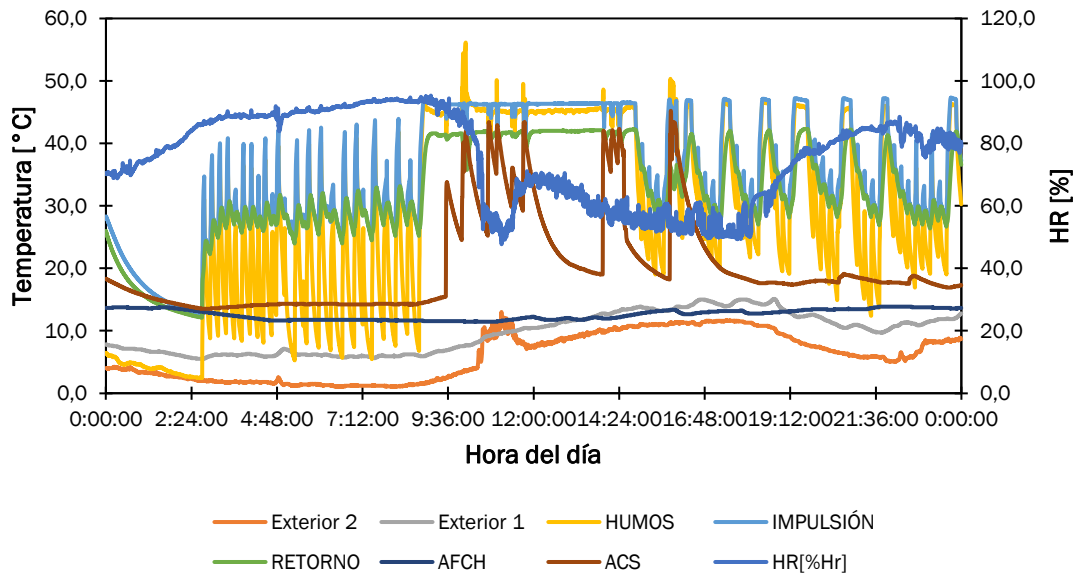


Figura VIII-27. Medidas experimentales 28 de febrero

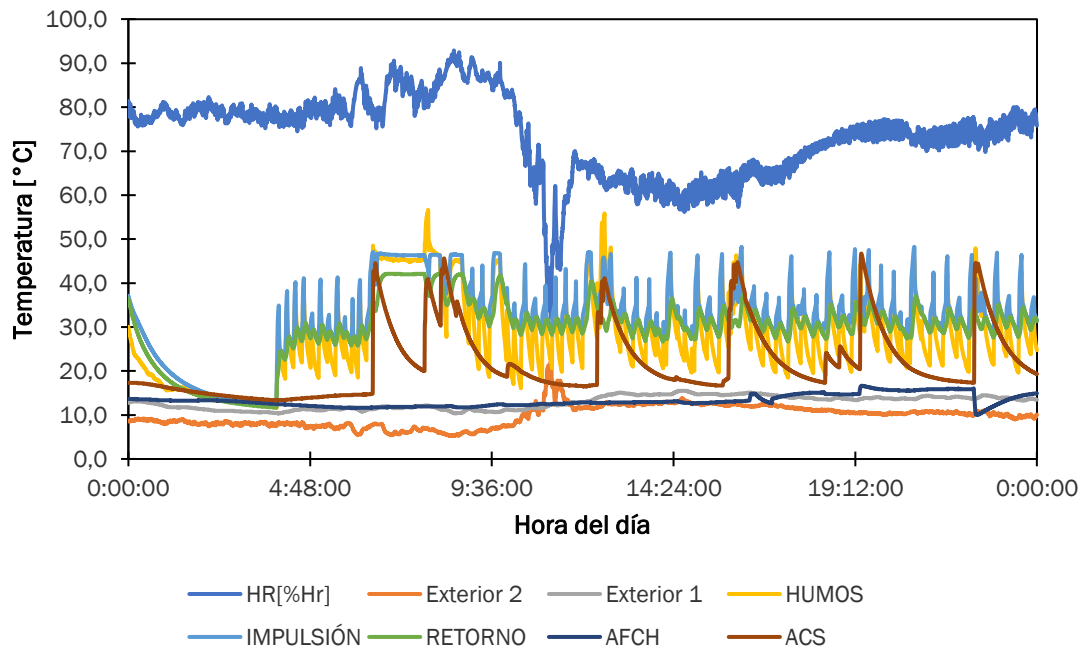


Figura VIII-28. Medidas experimentales 1 de marzo.

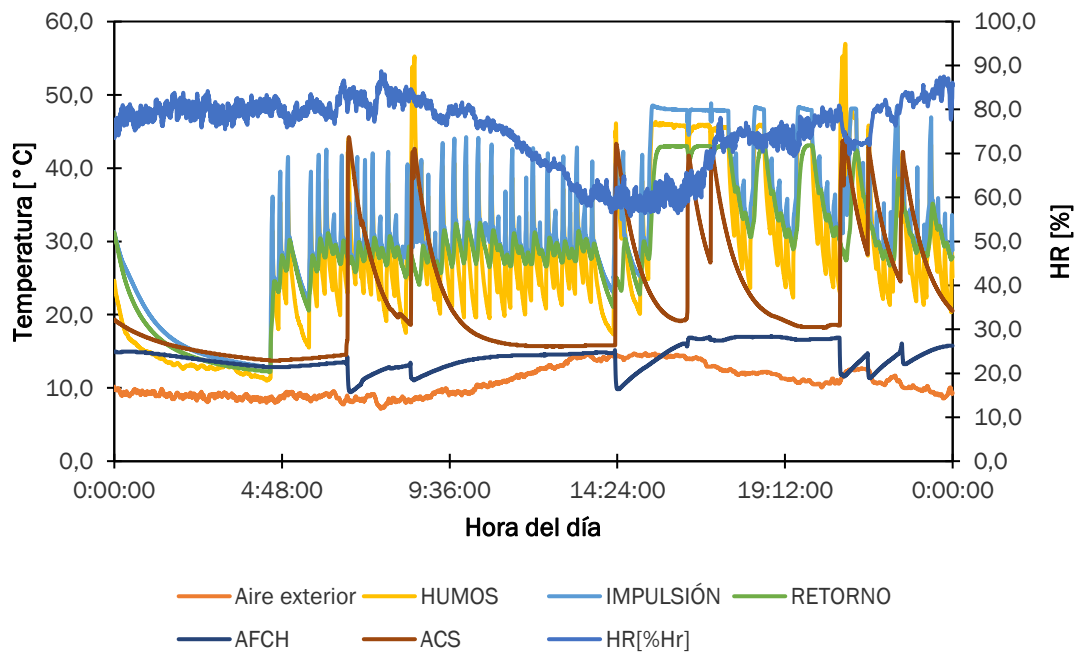


Figura VIII-29. Medidas experimentales 2 de marzo.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

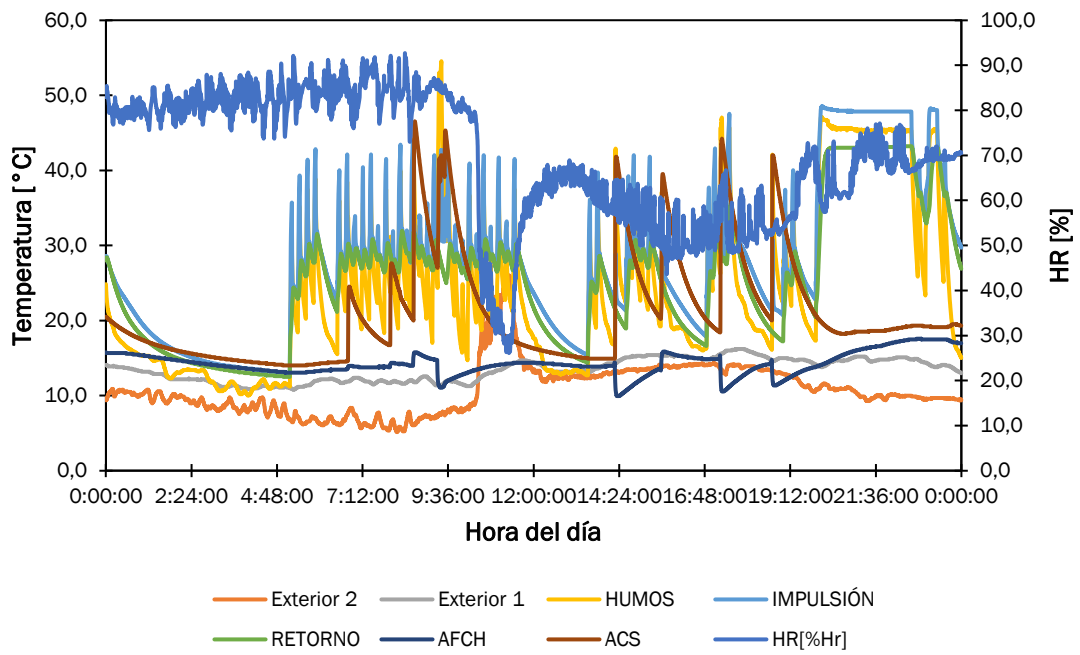


Figura VIII-30. Medidas experimentales 3 de marzo

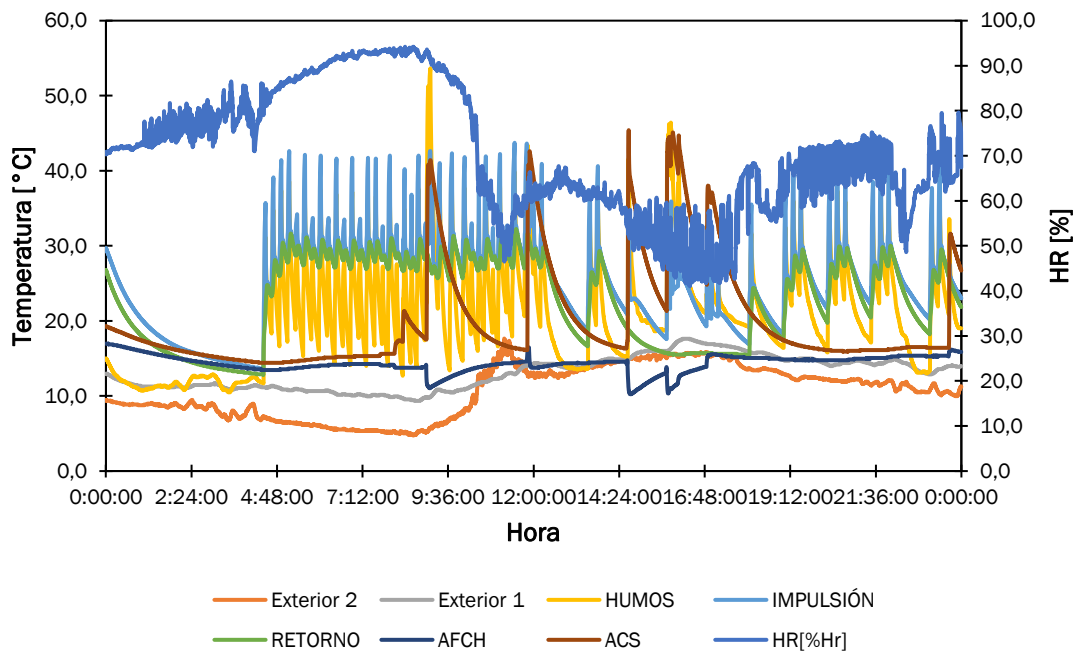


Figura VIII-31. Medidas experimentales 4 de marzo.

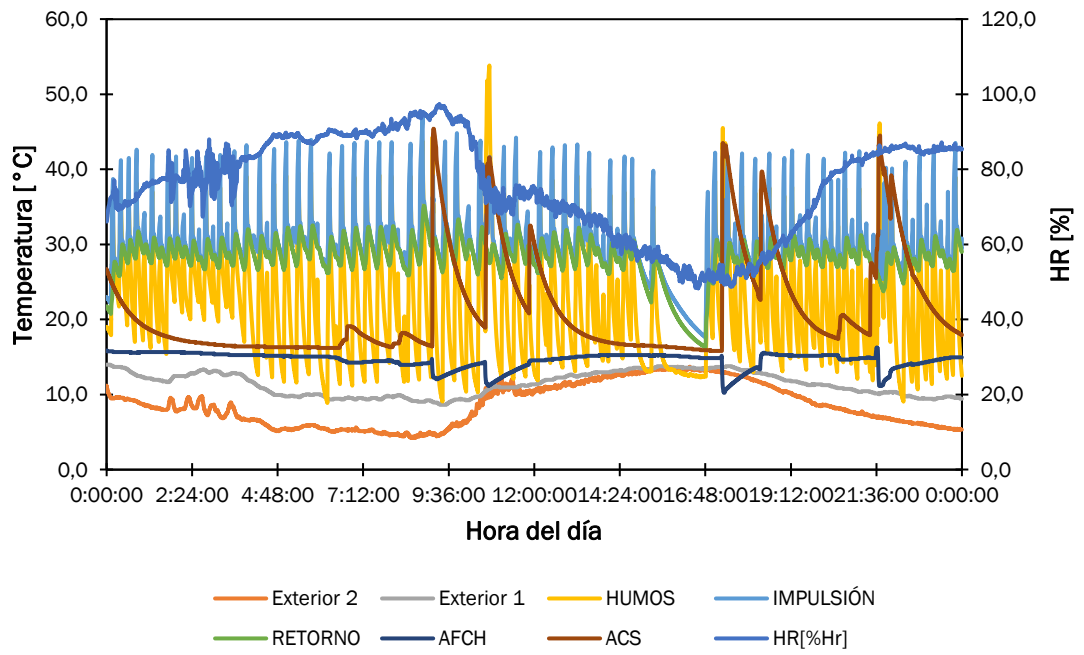


Figura VIII-32. Medidas experimentales 5 de marzo.

**SEMANA 2: 6-14 de marzo.**

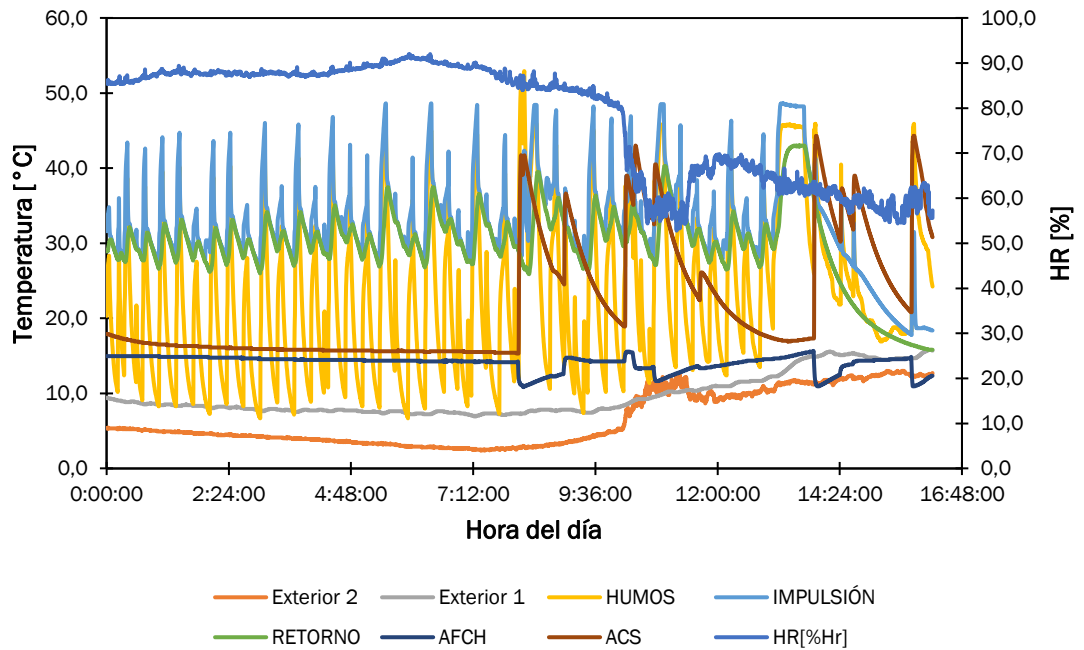


Figura VIII-33. Medidas experimentales 6 de marzo

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

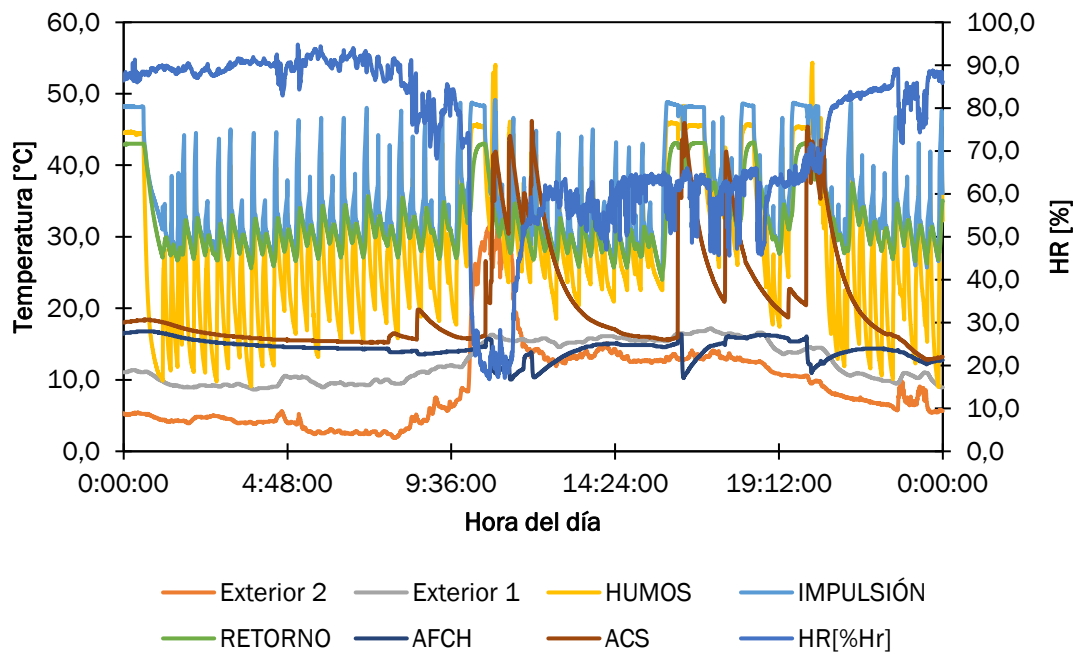


Figura VIII-34. Medidas experimentales 7 de marzo.

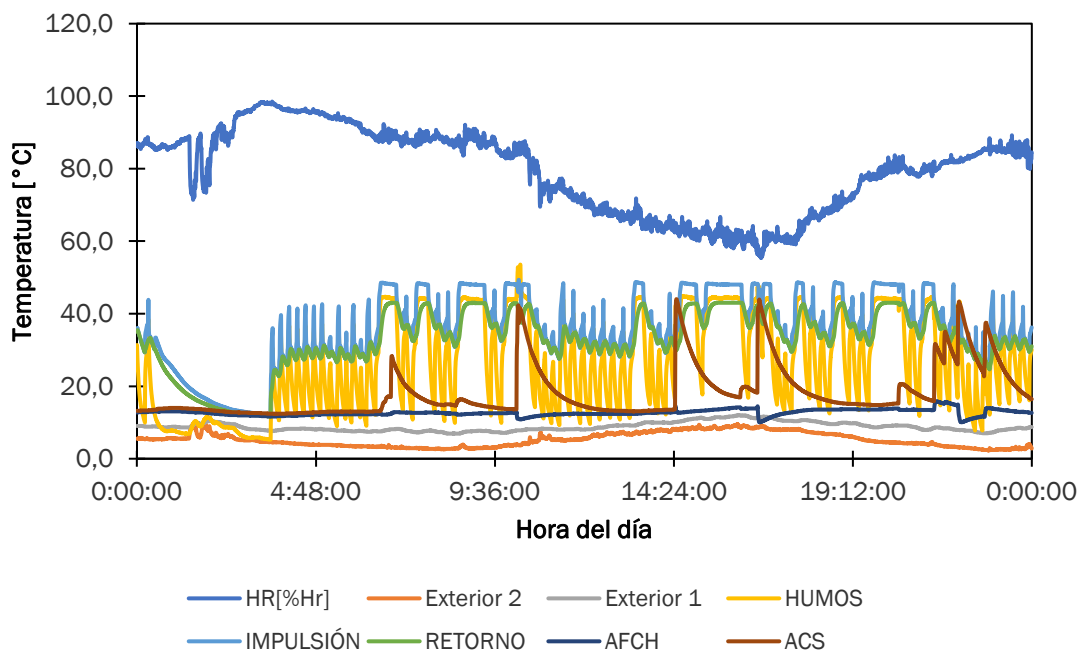


Figura VIII-35. Medidas experimentales 8 de marzo

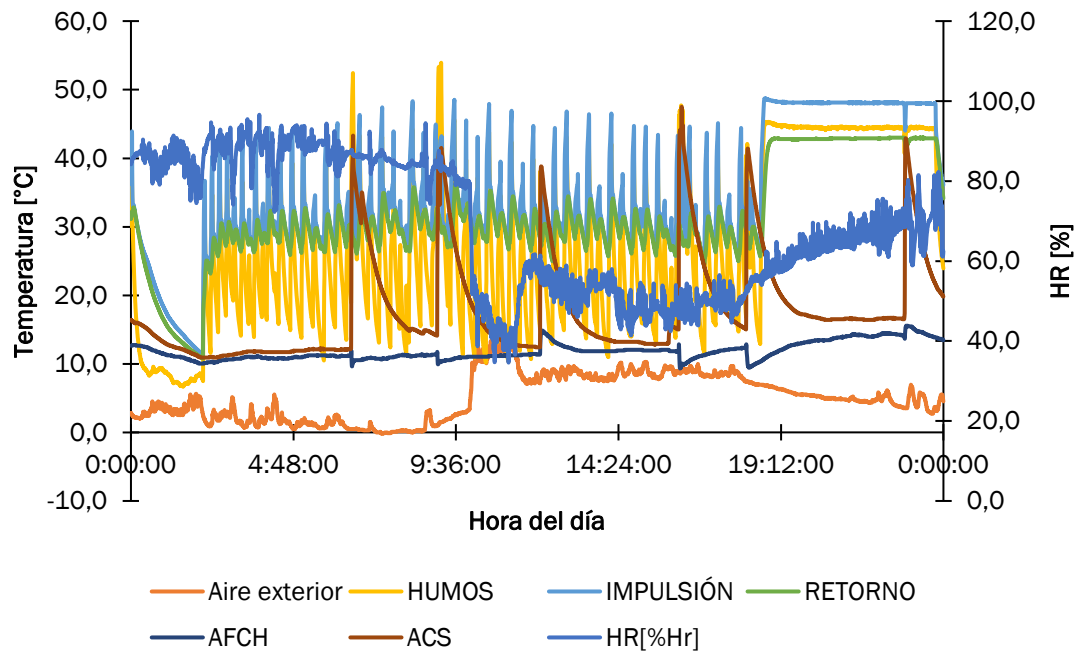


Figura VIII-36. Medidas experimentales 9 de marzo.

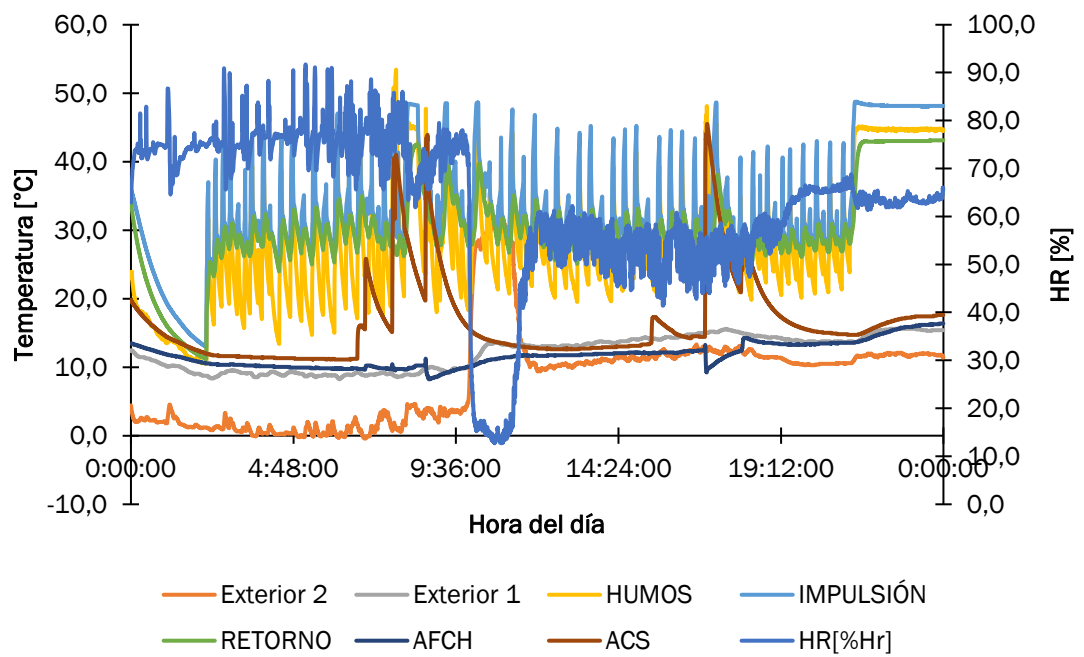


Figura VIII-37. Medidas experimentales 10 de marzo.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

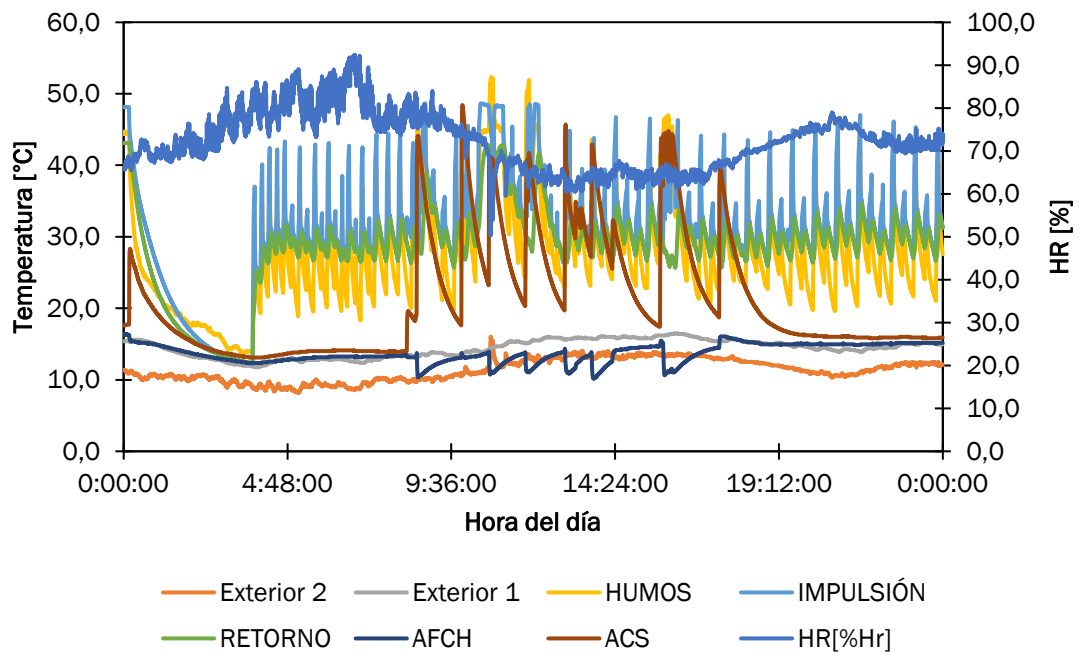


Figura VIII-38. Medidas experimentales 11 de marzo.

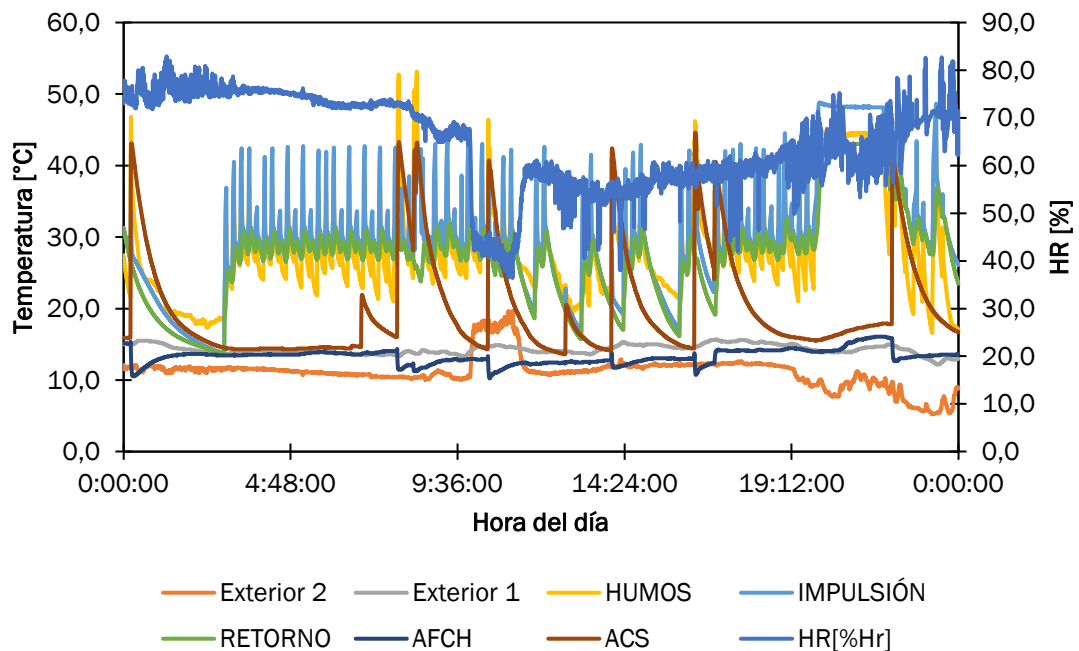


Figura VIII-39. Medidas experimentales 12 de marzo.



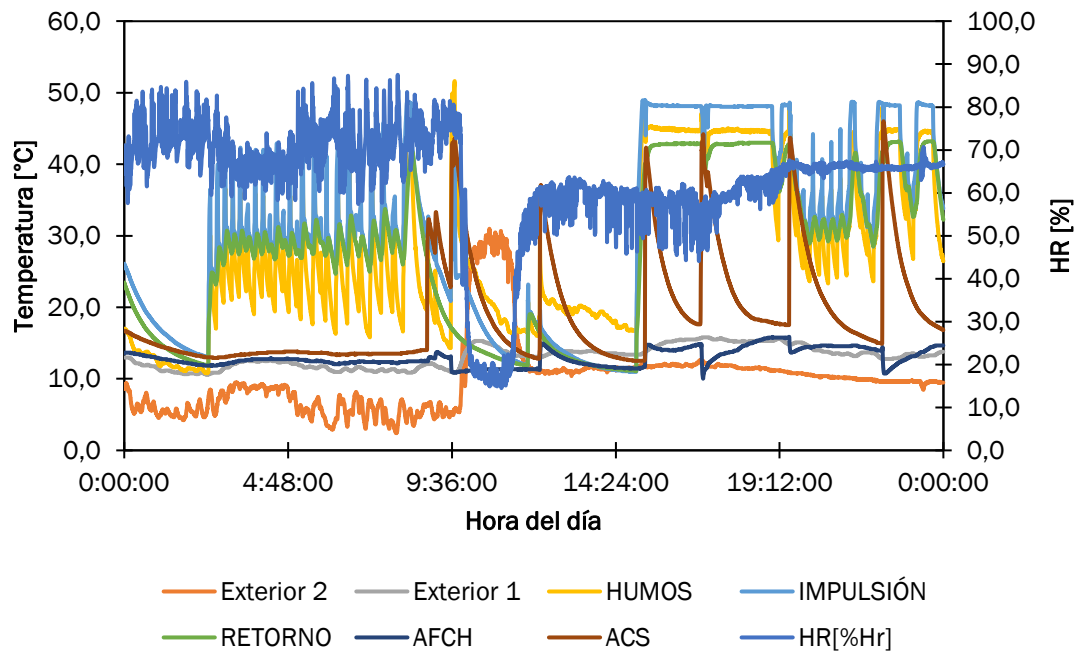


Figura VIII-40. Medidas experimentales 13 de marzo.

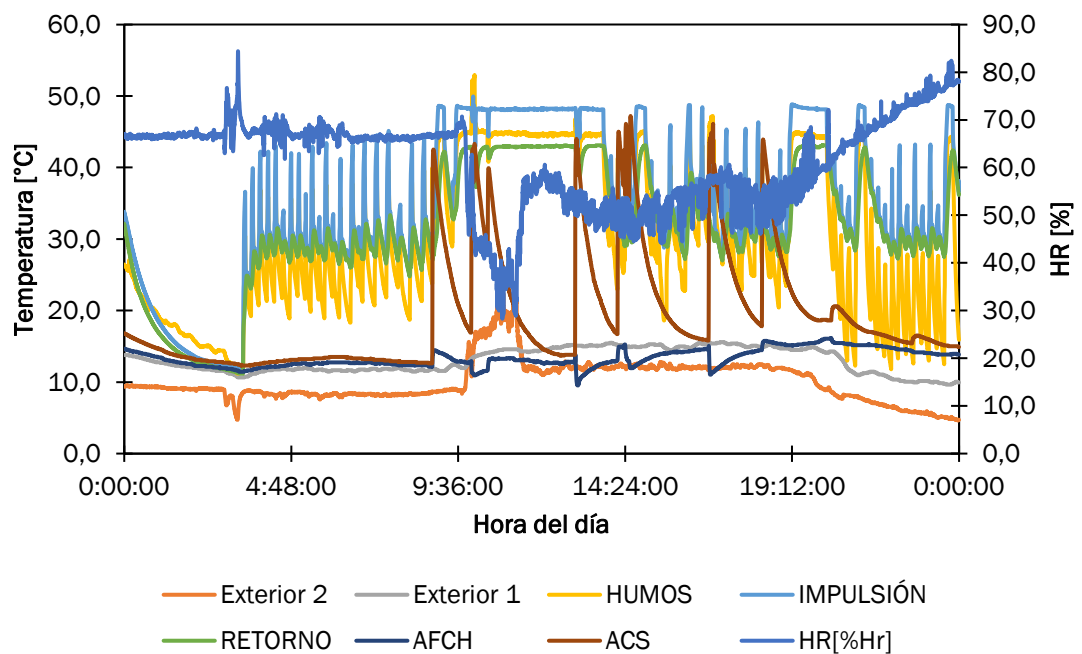


Figura VIII-41. Medidas experimentales 14 de marzo.

SEMANA 3: 15-21 de marzo.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

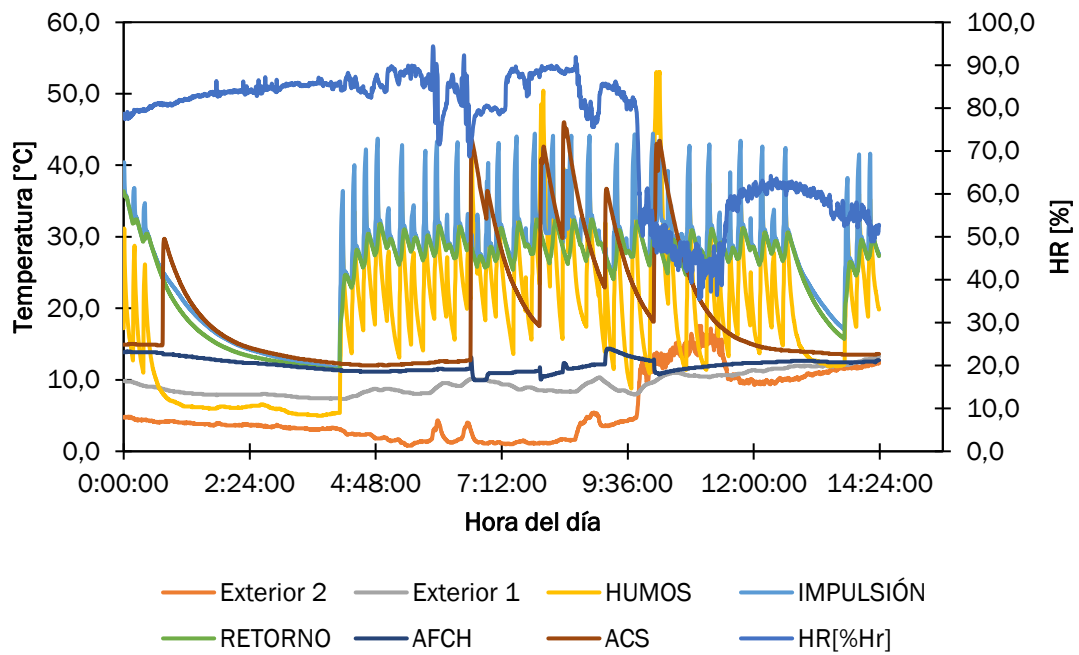


Figura VIII-42. Medidas experimentales 15 de marzo.

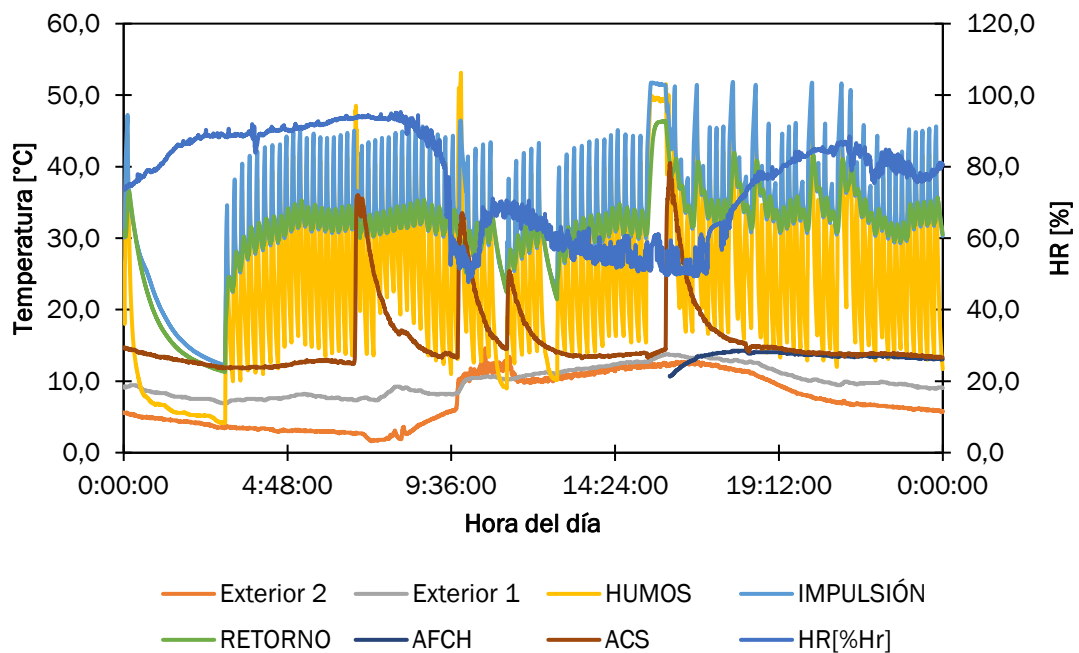


Figura VIII-43. Medidas experimentales 16 de marzo.

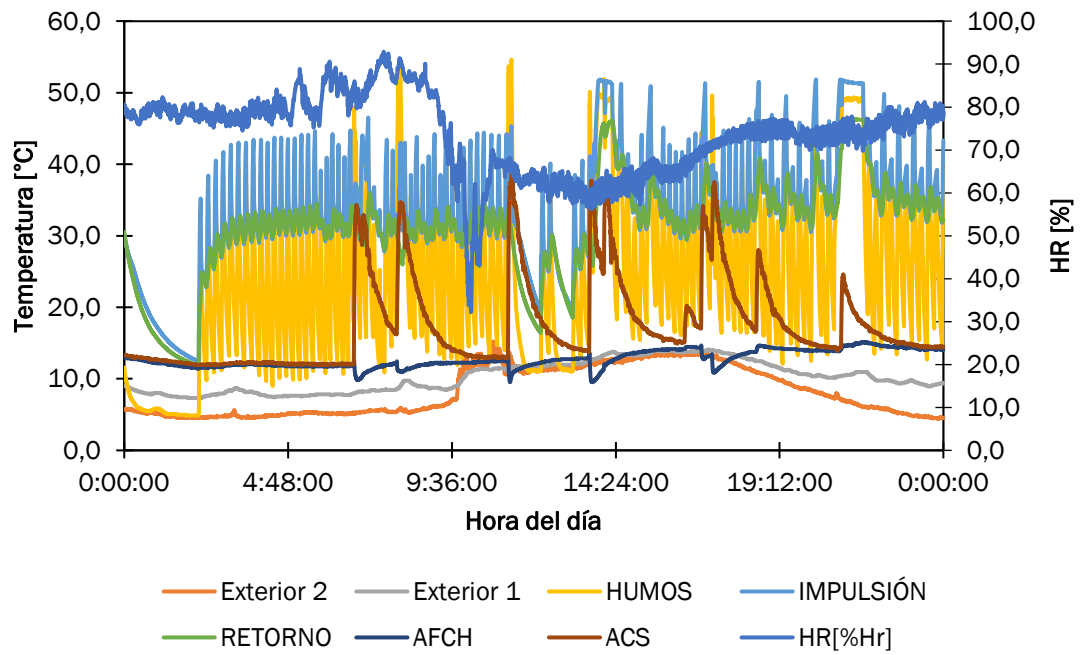


Figura VIII-44. Medidas experimentales 17 de marzo.

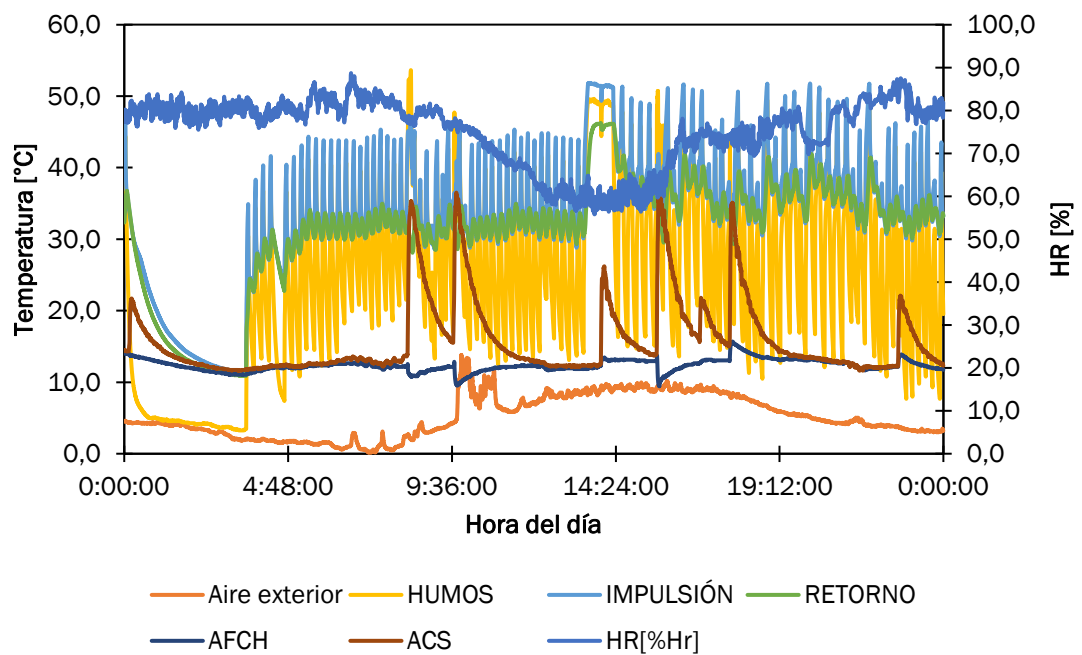


Figura VIII-45. Medidas experimentales 18 de marzo

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

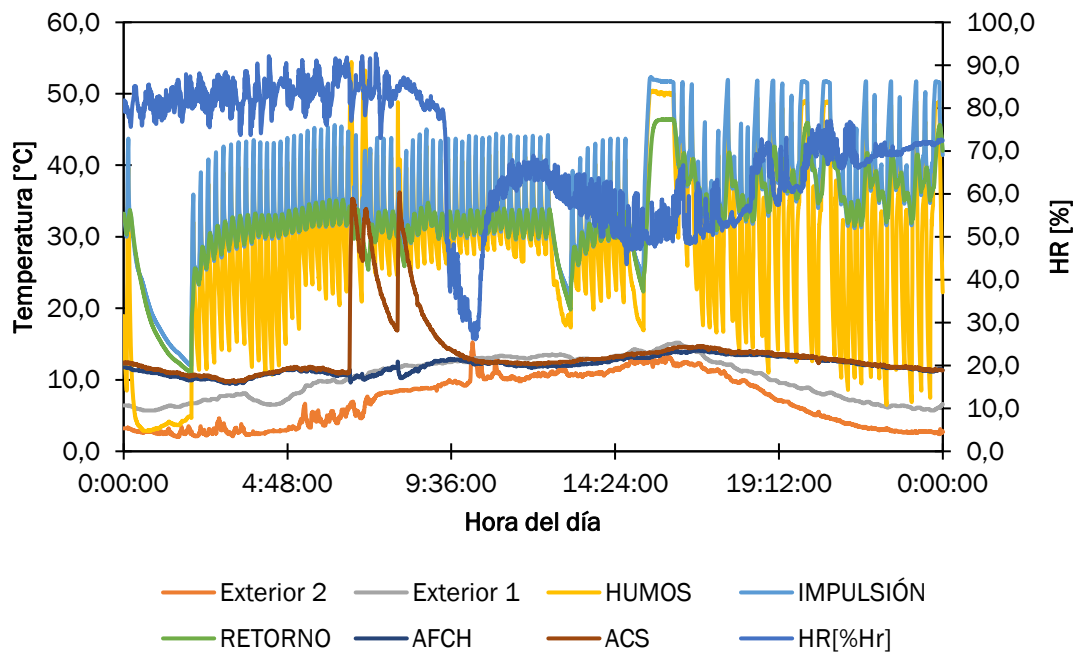


Figura VIII-46. Medidas experimentales 19 de marzo.

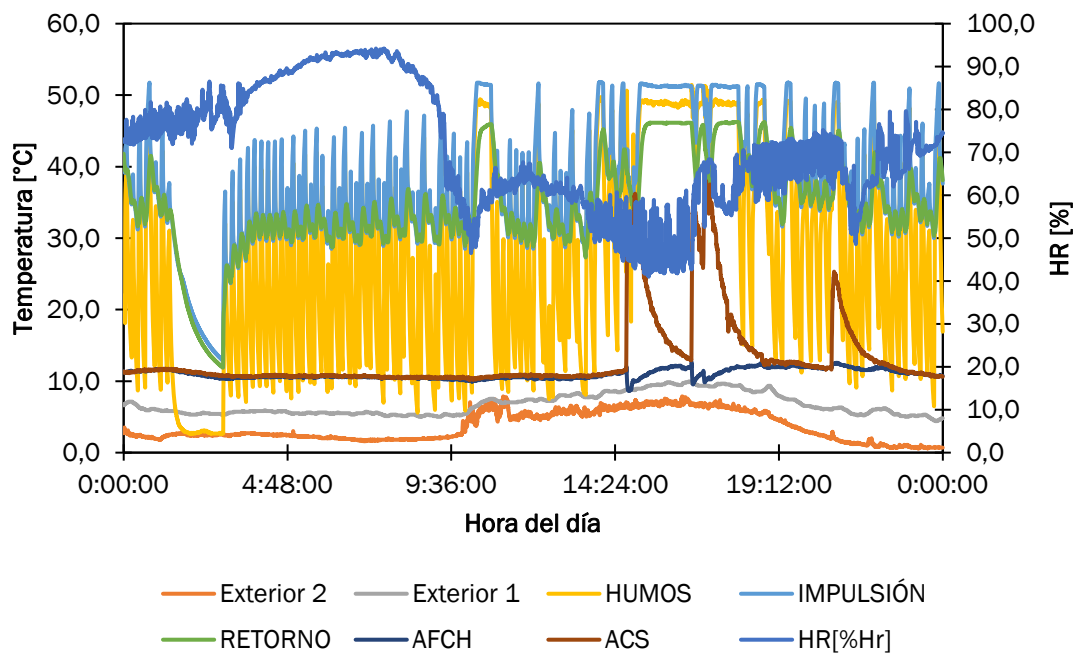


Figura VIII-47. Medidas experimentales 20 de marzo.

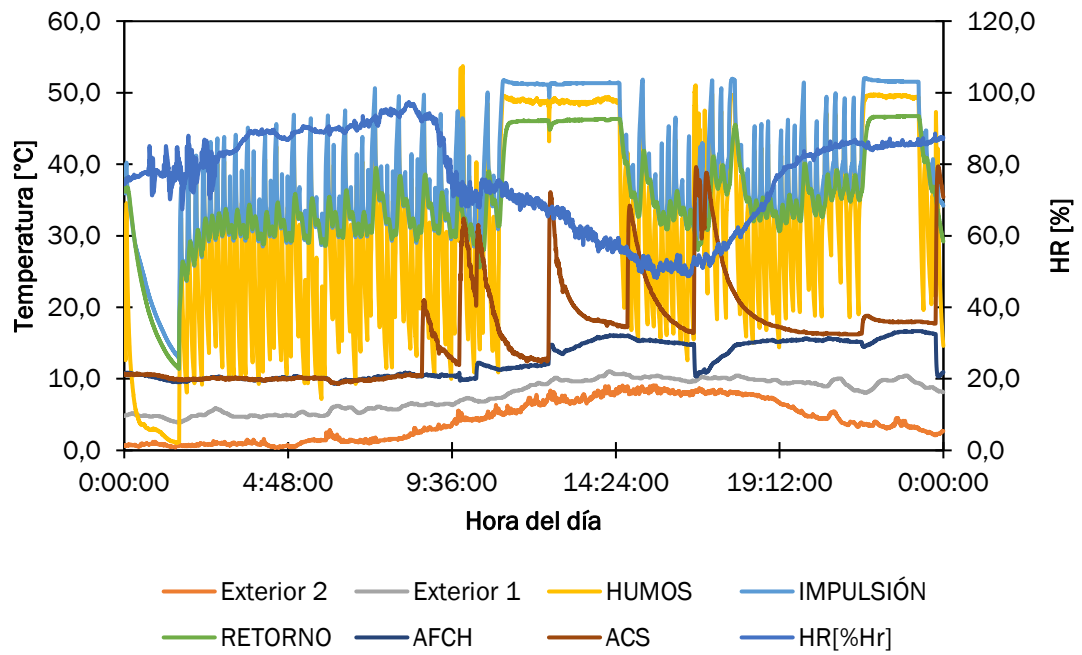


Figura VIII-48. Medidas experimentales 21 de marzo.

**SEMANA 4: 22-27 de marzo.**

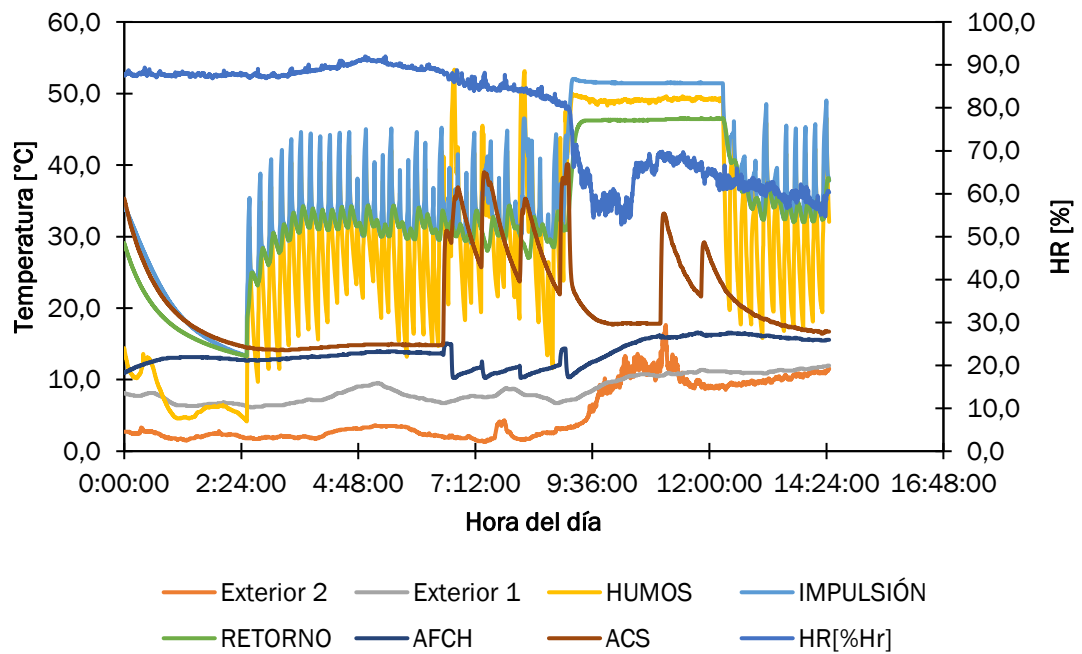


Figura VIII-49. Medidas experimentales 22 de marzo.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

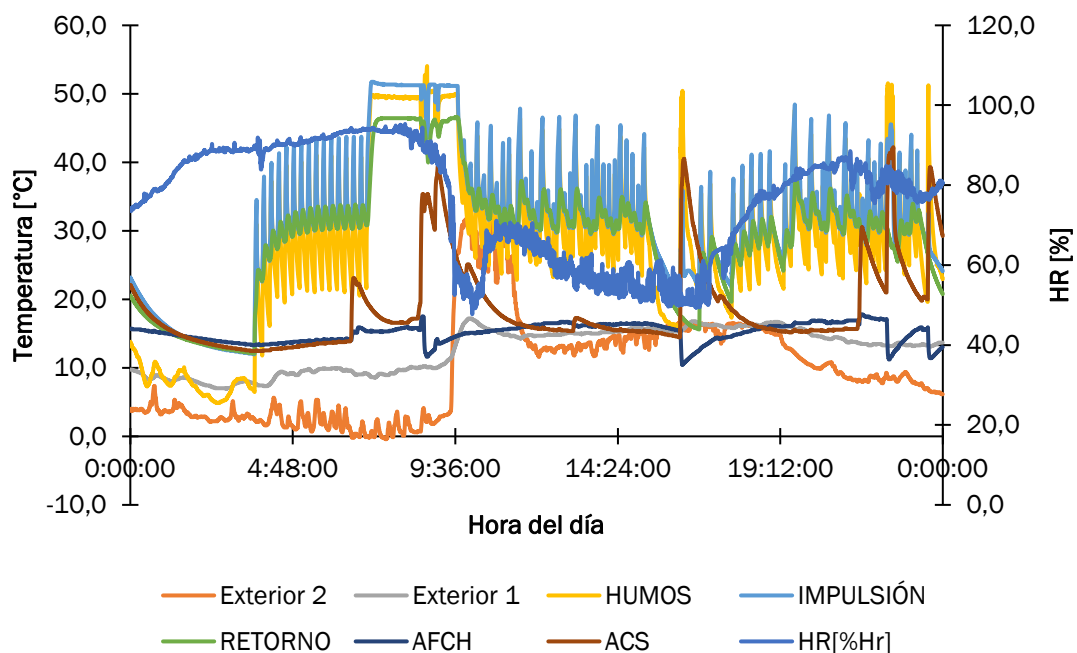


Figura VIII-50. Medidas experimentales 23 de marzo.

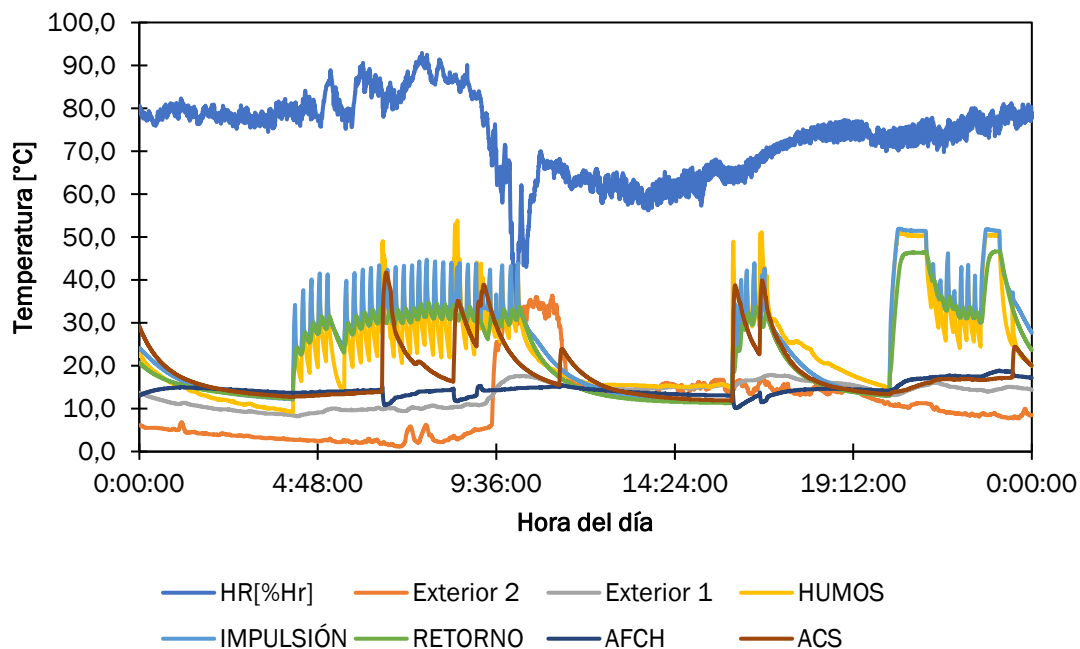


Figura VIII-51. Medidas experimentales 24 de marzo.

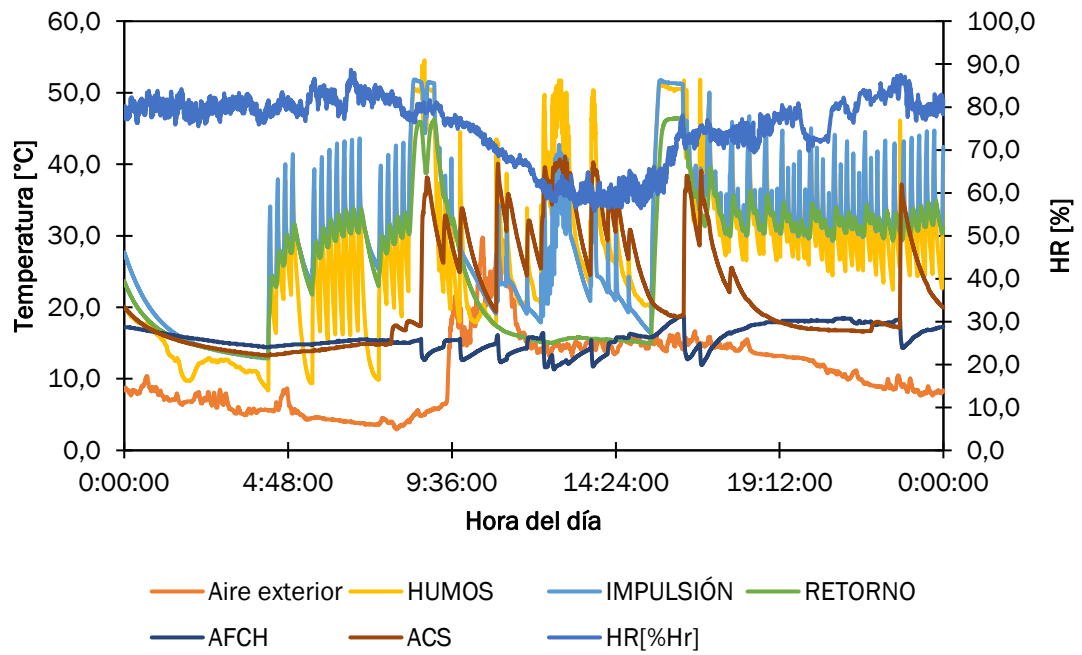


Figura VIII-52. Medidas experimentales 25 de marzo.

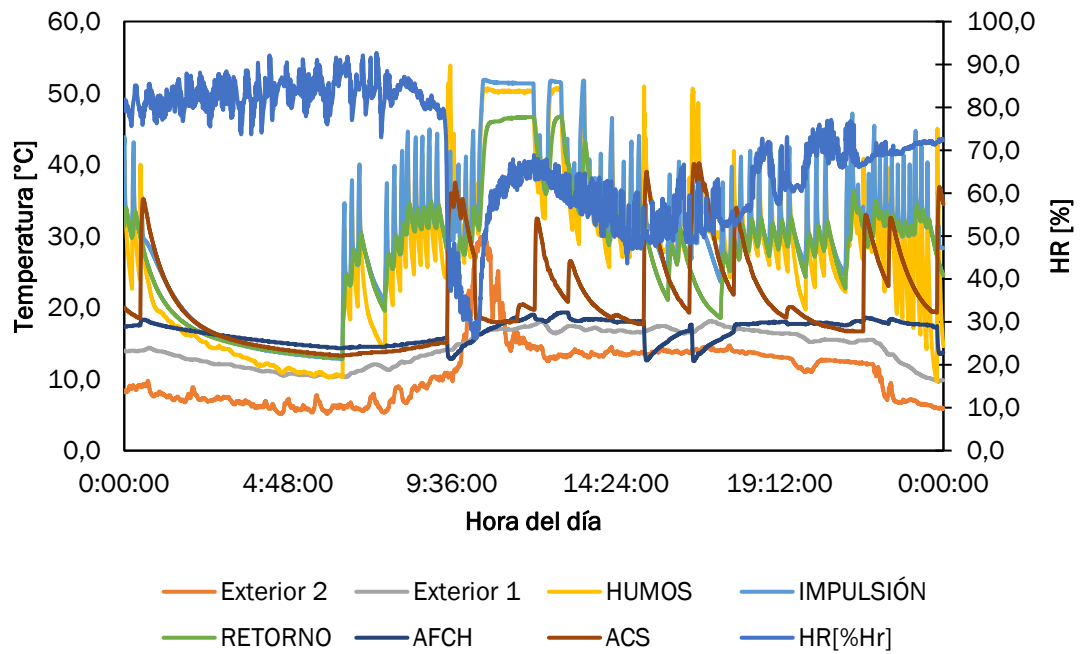


Figura VIII-53. Medidas experimentales 26 de marzo.

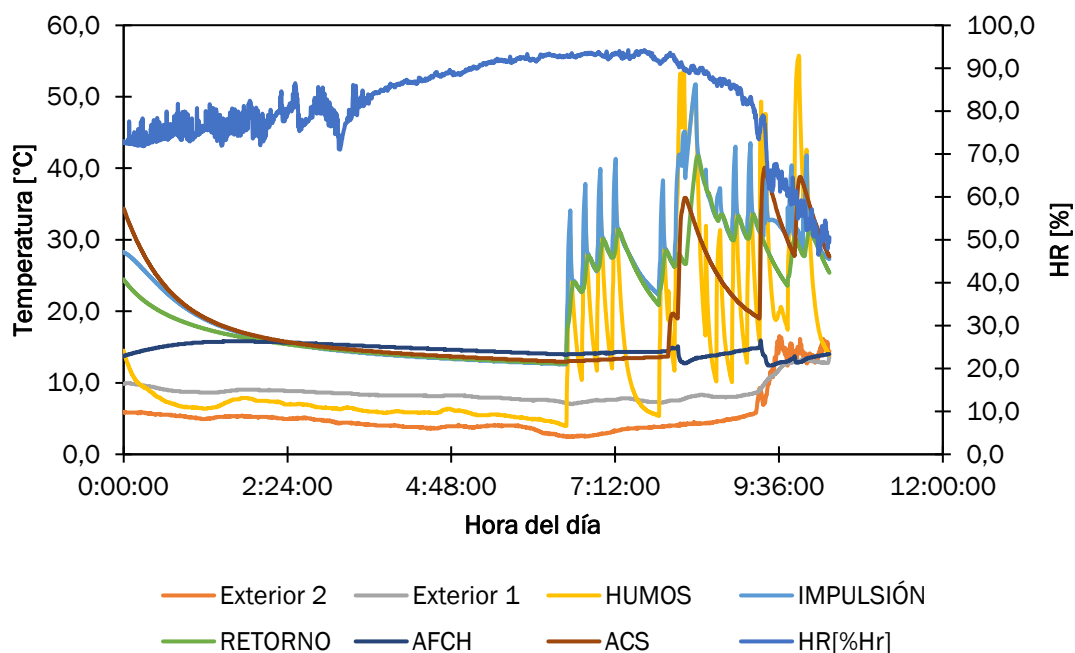


Figura VIII-54. Medidas experimentales 27 de marzo.

**SEMANA 5: 29-31 de marzo.**

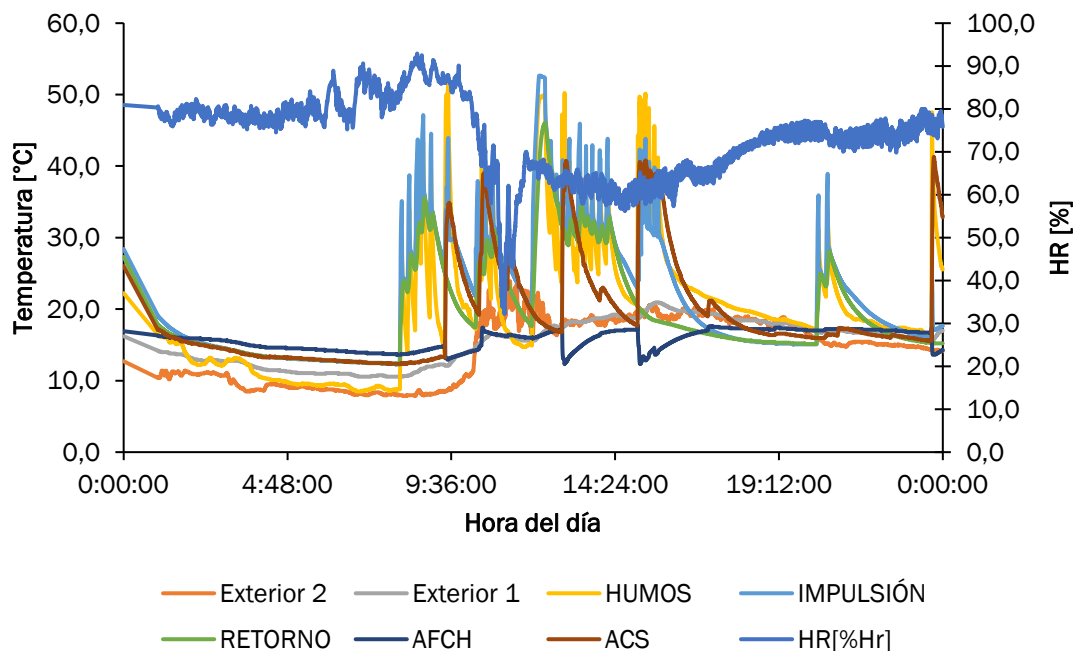


Figura VIII-55. Medidas experimentales 29 de marzo.



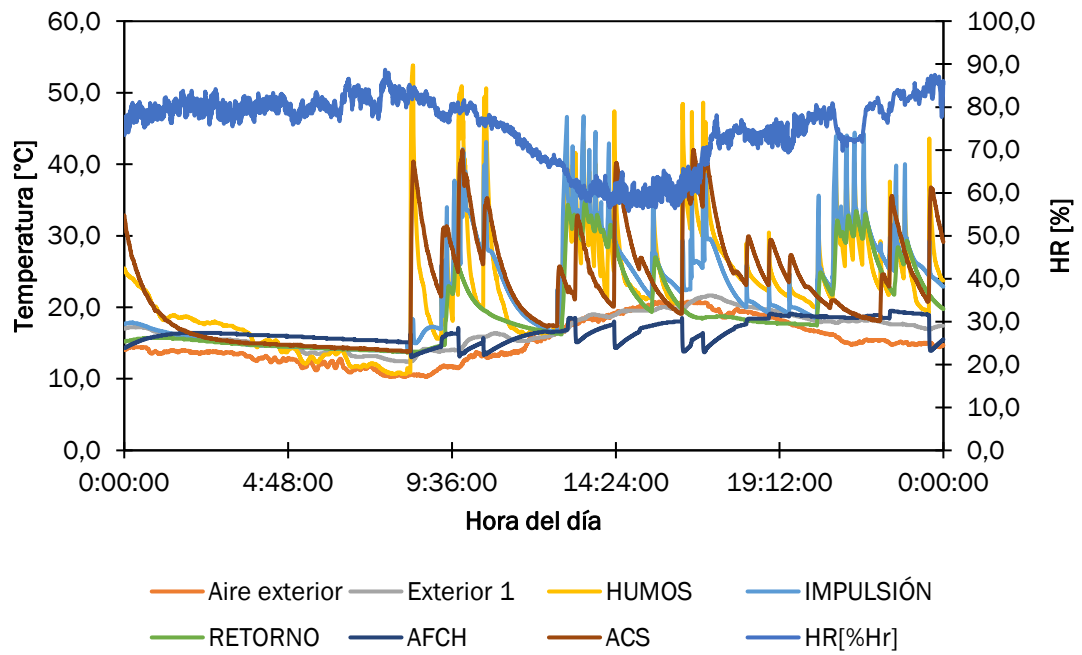


Figura VIII-56. Medidas experimentales 30 de marzo.

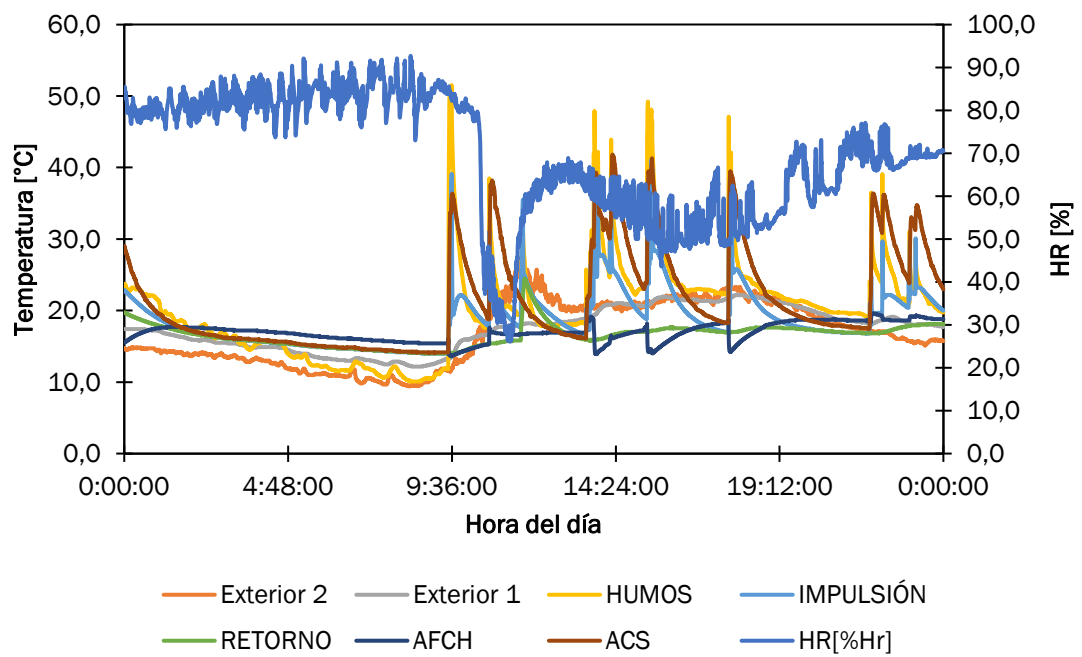


Figura VIII-57. Medidas experimentales 31 de marzo.

## ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

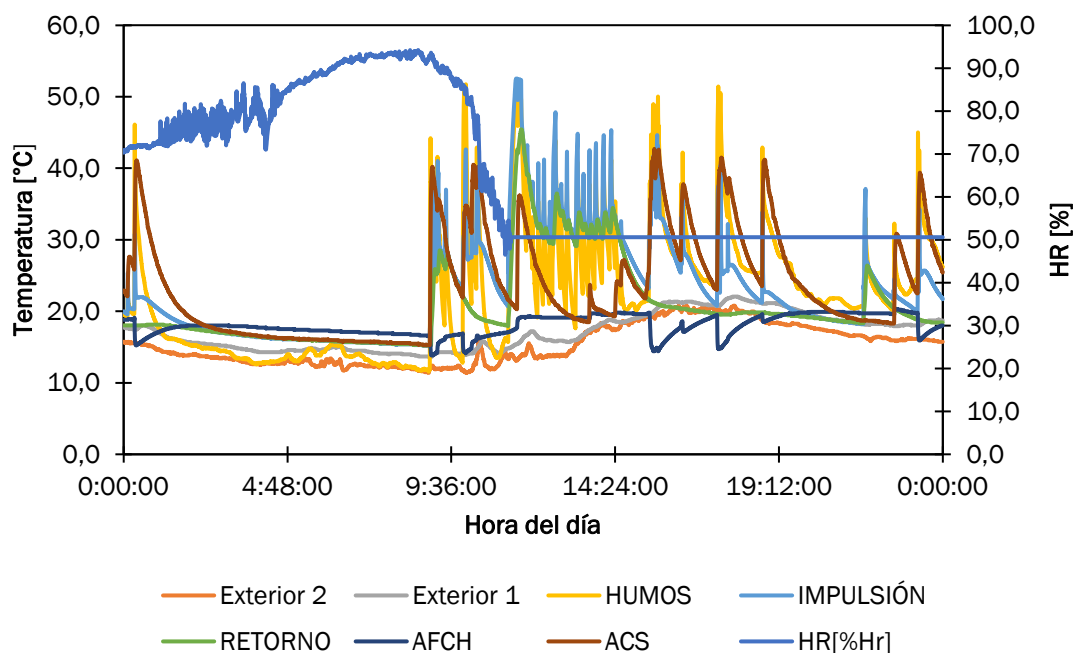


Figura VIII-58. Medidas experimentales 1 de abril.

## ANÁLISIS ORTOGONAL CRUZADO

Tabla VIII-1. Análisis para  $n=1,15$  y  $a.s.n.m=0m$

n	Altitud sobre el nivel del mar [m]	n=1,15 a.s.n.m=0 m			Rendimiento [%]
		Tª humos [°C]	m agua condensada [Kg/Nm <sup>3</sup> gas]		
1,15	0	38	1,034	105,424	
1,15	0	42	0,863	104,226	
1,15	0	46	0,659	102,830	
1,15	0	50	0,415	101,204	
1,15	0	54	0,126	99,313	
1,15	0	58	0	97,118	

Tabla VIII-2. Análisis para  $n=1,15$  y  $a.s.n.m=200m$ 

<b>n=1,15 a.s.n.m=200 m</b>						
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar</b>		<b>T<sup>a</sup> humos</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup>]</b>		<b>Rendimiento</b>
	<b>[m]</b>	<b>[°C]</b>		<b>gas</b>	<b>[%]</b>	
1,15	200	38	1,017	105,323		
1,15	200	42	0,842	104,102		
1,15	200	46	0,632	102,677		
1,15	200	50	0,383	101,017		
1,15	200	54	0,087	99,085		
1,15	200	58	0	96,842		

Tabla VIII-3. Análisis para  $n=1,15$  y  $a.s.n.m=400m$ 

<b>n=1,15 a.s.n.m=400 m</b>						
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar</b>		<b>T<sup>a</sup> humos</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup>]</b>		<b>Rendimiento</b>
	<b>[m]</b>	<b>[°C]</b>		<b>gas</b>	<b>[%]</b>	
1,15	400	38	0,999	105,220		
1,15	400	42	0,820	103,974		
1,15	400	46	0,606	102,519		
1,15	400	50	0,350	100,824		
1,15	400	54	0,047	98,851		
1,15	400	58	0	96,559		

Tabla VIII-4. Análisis para  $n=1,15$  y  $a.s.n.m=600m$ 

<b>n=1,15 a.s.n.m=600 m</b>						
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar</b>		<b>T<sup>a</sup> humos</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup>]</b>		<b>Rendimiento</b>
	<b>[m]</b>	<b>[°C]</b>		<b>gas</b>	<b>[%]</b>	
1,15	600	38	0,981	105,114		
1,15	600	42	0,798	103,843		
1,15	600	46	0,578	102,358		
1,15	600	50	0,317	100,627		
1,15	600	54	0,006	98,611		
1,15	600	58	0	96,269		

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

Tabla VIII-5. Análisis para  $n=1,15$  y  $a.s.n.m=843m$

<b>n=1,15 a.s.n.m=843 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,15	843	38	0,958	104,982
1,15	843	42	0,770	103,679
1,15	843	46	0,544	102,157
1,15	843	50	0,275	100,381
1,15	843	54	0	98,313
1,15	843	58	0	95,908

Tabla VIII-6. Análisis para  $n=1,15$  y  $a.s.n.m=1000m$

<b>n=1,15 a.s.n.m=1000 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,15	1000	38	0,944	104,895
1,15	1000	42	0,751	103,571
1,15	1000	46	0,521	102,025
1,15	1000	50	0,247	100,219
1,15	1000	54	0	98,115
1,15	1000	58	0	95,668

Tabla VIII-7. Análisis para  $n=1,2$  y  $a.s.n.m=0m$

<b>n=1,2 a.s.n.m=0 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,2	0	38	1,005	105,232
1,2	0	42	0,828	103,987
1,2	0	46	0,615	102,536
1,2	0	50	0,362	100,845
1,2	0	54	0,061	98,879
1,2	0	58	0	96,597

Tabla VIII-8. Análisis para  $n=1,2$  y  $a.s.n.m=200m$ 

<b>n=1,2 a.s.n.m=200 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,2	200	38	0,987	105,127
1,2	200	42	0,806	103,857
1,2	200	46	0,588	102,376
1,2	200	50	0,328	100,650
1,2	200	54	0,021	98,641
1,2	200	58	0	96,309

Tabla VIII-9. Análisis para  $n=1,2$  y  $a.s.n.m=400m$ 

<b>n=1,2 a.s.n.m=400 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,2	400	38	0,969	105,019
1,2	400	42	0,783	103,724
1,2	400	46	0,560	102,212
1,2	400	50	0,294	100,450
1,2	400	54	0	98,398
1,2	400	58	0	96,015

Tabla VIII-10. Análisis para  $n=1,2$  y  $a.s.n.m=600m$ 

<b>n=1,2 a.s.n.m=600 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,2	600	38	0,950	104,909
1,2	600	42	0,760	103,588
1,2	600	46	0,531	102,045
1,2	600	50	0,259	100,245
1,2	600	54	0	98,149
1,2	600	58	0	95,714

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

Tabla VIII-11. Análisis para  $n=1,2$  y  $a.s.n.m=843m$

<b>n=1,2 a.s.n.m=843 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,2	843	38	0,927	104,772
1,2	843	42	0,731	103,418
1,2	843	46	0,496	101,836
1,2	843	50	0,216	99,989
1,2	843	54	0	97,838
1,2	843	58	0	95,338

Tabla VIII-12. Análisis para  $n=1,2$  y  $a.s.n.m=1000m$

<b>n=1,2 a.s.n.m=1000 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,2	1000	38	0,911	104,681
1,2	1000	42	0,712	103,306
1,2	1000	46	0,472	101,698
1,2	1000	50	0,187	99,820
1,2	1000	54	0	97,633
1,2	1000	58	0	95,089

Tabla VIII-13. Análisis para  $n=1,25$  y  $a.s.n.m=0m$

<b>n=1,25 a.s.n.m=0 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,25	0	38	0,976	105,040
1,25	0	42	0,792	103,747
1,25	0	46	0,571	102,241
1,25	0	50	0,308	100,486
1,25	0	54	0	98,445
1,25	0	58	0	96,075

Tabla VIII-14. Análisis para  $n=1,25$  y  $a.s.n.m=200m$ 

<b>n=1,25 a.s.n.m=200 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,25	200	38	0,958	104,931
1,25	200	42	0,769	103,613
1,25	200	46	0,543	102,075
1,25	200	50	0,274	100,283
1,25	200	54	0	98,198
1,25	200	58	0	95,777

Tabla VIII-15. Análisis para  $n=1,25$  y  $a.s.n.m=400m$ 

<b>n=1,25 a.s.n.m=400 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,25	400	38	0,939	104,819
1,25	400	42	0,746	103,474
1,25	400	46	0,514	101,905
1,25	400	50	0,238	100,075
1,25	400	54	0	97,945
1,25	400	58	0	95,471

Tabla VIII-16. Análisis para  $n=1,25$  y  $a.s.n.m=600m$ 

<b>n=1,25 a.s.n.m=600 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,25	600	38	0,919	104,705
1,25	600	42	0,722	103,333
1,25	600	46	0,484	101,731
1,25	600	50	0,202	99,863
1,25	600	54	0	97,687
1,25	600	58	0	95,158

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

Tabla VIII-17. Análisis para  $n=1,25$  y  $a.s.n.m=843m$

<b>n=1,25 a.s.n.m=843 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,25	843	38	0,895	104,562
1,25	843	42	0,691	103,157
1,25	843	46	0,447	101,514
1,25	843	50	0,157	99,597
1,25	843	54	0	97,364
1,25	843	58	0	94,768

Tabla VIII-18. Análisis para  $n=1,25$  y  $a.s.n.m=1000m$

<b>n=1,25 a.s.n.m=1000 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,25	1000	38	0,879	104,468
1,25	1000	42	0,672	103,040
1,25	1000	46	0,423	101,371
1,25	1000	50	0,127	99,422
1,25	1000	54	0	97,151
1,25	1000	58	0	94,510

Tabla VIII-19. Análisis para  $n=1,3$  y  $a.s.n.m=0m$

<b>n=1,3 a.s.n.m=0 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,3	0	38	0,948	104,847
1,3	0	42	0,757	103,508
1,3	0	46	0,528	101,946
1,3	0	50	0,255	100,127
1,3	0	54	0	98,010
1,3	0	58	0	95,554



Tabla VIII-20. Análisis para  $n=1,3$  y  $a.s.n.m=200m$ 

<b>n=1,3 a.s.n.m=200 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,3	200	38	0,928	104,734	
1,3	200	42	0,733	103,368	
1,3	200	46	0,498	101,774	
1,3	200	50	0,219	99,916	
1,3	200	54	0	97,755	
1,3	200	58	0	95,244	

Tabla VIII-21. Análisis para  $n=1,3$  y  $a.s.n.m=400m$ 

<b>n=1,3 a.s.n.m=400 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,3	400	38	0,909	104,619	
1,3	400	42	0,708	103,225	
1,3	400	46	0,468	101,598	
1,3	400	50	0,182	99,701	
1,3	400	54	0	97,493	
1,3	400	58	0	94,927	

Tabla VIII-22. Análisis para  $n=1,3$  y  $a.s.n.m=600m$ 

<b>n=1,3 a.s.n.m=600 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,3	600	38	0,889	104,500	
1,3	600	42	0,683	103,078	
1,3	600	46	0,438	101,418	
1,3	600	50	0,145	99,480	
1,3	600	54	0	97,224	
1,3	600	58	0	94,603	

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

Tabla VIII-23. Análisis para  $n=1,3$  y  $a.s.n.m=843m$

<b>n=1,3 a.s.n.m=843 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,3	843	38	0,863	104,352	
1,3	843	42	0,652	102,895	
1,3	843	46	0,399	101,193	
1,3	843	50	0,098	99,205	
1,3	843	54	0	96,890	
1,3	843	58	0	94,198	

Tabla VIII-24. Análisis para  $n=1,3$  y  $a.s.n.m=1000m$

<b>n=1,3 a.s.n.m=1000 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,3	1000	38	0,847	104,255	
1,3	1000	42	0,632	102,774	
1,3	1000	46	0,374	101,044	
1,3	1000	50	0,067	99,023	
1,3	1000	54	0	96,668	
1,3	1000	58	0	93,930	

Tabla VIII-25. Análisis para  $n=1,35$  y  $a.s.n.m=0m$

<b>n=1,35 a.s.n.m=0 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,35	0	38	0,919	104,655	
1,35	0	42	0,721	103,268	
1,35	0	46	0,484	101,651	
1,35	0	50	0,201	99,768	
1,35	0	54	0	97,576	
1,35	0	58	0	95,032	

Tabla VIII-26. Análisis para  $n=1,35$  y  $a.s.n.m=200m$ 

<b>n=1,35 a.s.n.m=200 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,35	200	38	1,0281	105,4645	
1,35	200	42	0,6964	103,1236	
1,35	200	46	0,4536	101,4732	
1,35	200	50	0,1642	99,5496	
1,35	200	54	0	97,3112	
1,35	200	58	0	94,7117	

Tabla VIII-27. Análisis para  $n=1,35$  y  $a.s.n.m=400m$ 

<b>n=1,35 a.s.n.m=400 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,35	400	38	0,879	104,418	
1,35	400	42	0,671	102,975	
1,35	400	46	0,422	101,291	
1,35	400	50	0,126	99,327	
1,35	400	54	0	97,040	
1,35	400	58	0	94,383	

Tabla VIII-28. Análisis para  $n=1,35$  y  $a.s.n.m=600m$ 

<b>n=1,35 a.s.n.m=600 m</b>					
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>Tª humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>	
1,35	600	38	0,858	104,296	
1,35	600	42	0,645	102,823	
1,35	600	46	0,391	101,104	
1,35	600	50	0,087	99,098	
1,35	600	54	0	96,121	
1,35	600	58	0	94,047	

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN SOBRE EL RENDIMIENTO DE UNA CALDERA DE CONDENSACIÓN

Tabla VIII-29. Análisis para  $n=1,35$  y  $a.s.n.m=843m$

<b>n=1,35 a.s.n.m=843 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,35	843	38	0,832	104,143
1,35	843	42	0,613	102,634
1,35	843	46	0,351	100,871
1,35	843	50	0,039	98,813
1,35	843	54	0	96,415
1,35	843	58	0	93,628

Tabla VIII-30. Análisis para  $n=1,35$  y  $a.s.n.m=1000m$

<b>n=1,35 a.s.n.m=1000 m</b>				
<b>n</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar [m]</b>	<b>T<sup>a</sup> humos [°C]</b>	<b>m agua condensada [Kg/Nm<sup>3</sup> gas]</b>	<b>Rendimiento [%]</b>
1,35	1000	38	0,814	104,041
1,35	1000	42	0,592	102,509
1,35	1000	46	0,325	100,717
1,35	1000	50	0,006	98,625
1,35	1000	54	0	96,186
1,35	1000	58	0	93,351