

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR DE
SERVICIOS INDUSTRIALES DE BALANCE DE LA REFINERÍA DE
BARRANCABERMEJA DE ECOPETROL S.A.

JUAN CARLOS HERNÁNDEZ BOHÓRQUEZ
Ingeniero de Producción

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
MAESTRIA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR DE
SERVICIOS INDUSTRIALES DE BALANCE DE LA REFINERÍA DE
BARRANCABERMEJA DE ECOPETROL S.A.

JUAN CARLOS HERNÁNDEZ BOHÓRQUEZ
Ingeniero de Producción

Trabajo de aplicación presentado para optar el título Magíster en Ingeniería Química

Director
Dionisio Antonio Laverde C, Ph.D.
Universidad Industrial de Santander

Co-director
Julian Ernesto Jaramillo Ibarra, Ph.D
Universidad Industrial de Santander

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
MAESTRIA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Los tutores del programa Maestría en Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, por la calidad de docente que son, excelentes personas y el conocimiento que me transmitieron.

A Dionisio Antonio Laverde, Ph. D. y Julian Ernesto Jaramillo, Ph. D, Directores del estudio realizado, por sus valiosas orientaciones en el desarrollo del proyecto.

A Humberto Escalante, Ph. D. y David Fuentes, Ph. D, evaluadores del presente documento, por sus valiosos criterios, exigencias y aportes, para entregar el documento con la calidad requerida.

Orlando Díaz Montoya, gerente general GRB; Ernesto Gómez, gerente de Producción GRB; Jesús Joaquín Méndez, jefe de departamento de Servicios Industriales de Balance y Ángela Corrales líder de Excelencia GRB, de Ecopetrol S.A, por la confianza, apoyo y colaboración para la realización de la Maestría.

Todas las personas que de manera desinteresada contribuyeron a la elaboración y culminación de este trabajo.

DEDICATORIA

En este momento siento una gran satisfacción por la meta cumplida al lograr culminar mis estudios de Maestría en Ingeniería Química, este logro tan importante se lo dedico a Dios, quien me guío, me brindó las fortalezas y los medios para que se realizara, igualmente se lo dedico con mucho amor a mi esposa CARMEN ELENA y a mis hijos JUAN ESTEBAN Y JUAN DIEGO, quienes pasaron gran parte de su tiempo sin mi presencia, pero siempre entendieron la importancia de llevar a feliz término este estudio y a mi padre HEBERTO quien en el momento no está, pero quien siempre deseó lo mejor para mí.

Además quiero dedicar este logro a mis hermanos ORLENY, GLORIS, NILSON y KARINA, quienes me han apoyado siempre en todos mis proyectos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.1 ASPECTOS GENERALES DE LAS CALDERAS DE LA UNIDAD DE BALANCE	21
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR	26
1.3 SISTEMA DE CONTROL DE LA CALDERA	27
1.4 DESCRIPCIÓN DE LOS DESVIOS DE GASES ALTERNOS A LA RED DE GAS COMBUSTIBLE	32
1.4.1 Desvíos de Propano	32
1.4.2 Desvíos de GLP	32
1.4.3 Desvíos de Etano-Etileno	32
1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	32
2. OBJETIVO GENERAL	38
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	38
3. ESTADO DEL ARTE	39
4. MARCO TEÓRICO	44
4.1 PODER CALORÍFICO	44
4.2 TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA	45
4.3 EXCESO DE OXÍGENO	46
4.4 INFLUENCIA DE LA CARGA DE LA CALDERA	49
4.5 CÁLCULO DE AHORRO DE COMBUSTIBLE	49
4.6 EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN	50

4.7	ÍNDICE DE WOBBE	51
4.8	MODELO MATEMÁTICO DE REGRESIÓN	51
5.	METODOLOGÍA	53
5.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	53
5.2	VALIDACIÓN DE LOS DATOS	54
5.3	DESARROLLO DEL MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA	55
5.4	VALIDACIÓN DEL MODELO	58
5.5	BENEFICIO POR AHORRO POTENCIAL DE COMBUSTIBLE	60
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
6.1	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	61
6.1.1	Variable Temperatura de aire al calentador	61
6.1.2	Variable Temperatura de gases de chimenea	62
6.1.3	Temperatura de agua del economizador	62
6.1.4	Variable Temperatura del vapor Producto	63
6.1.5	Variable Flujo de gas combustible	64
6.1.6	Variable Exceso de Oxígeno	64
6.1.7	Variable Metano	65
6.1.8	Variable Etano	66
6.1.9	Variable Etileno	66
6.1.10	Variable Propano	67
6.1.11	Variable Propileno	68
6.1.12	Variable n-butano	68
6.1.13	Variable isobutano	69
6.1.14	Variable isopentano	70
6.1.15	Variable Hidrógeno	70
6.1.16	Variable Total Olefinas	71
6.1.17	Variable Poder calorífico	72

6.2	NORMALIDAD DE LOS CUANTILES	72
6.3	EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES	75
6.3.1	Efecto de los componentes del gas combustible sobre el poder Calorífico.	75
6.3.2	Efecto de los componentes del gas combustible sobre el índice de Wobbe.	82
6.3.3	Efecto de los componentes del gas combustible sobre la eficiencia de la caldera.	88
6.3.4	Efecto de las temperaturas de las etapas de la caldera sobre la eficiencia.	95
6.3.5	Efecto de la producción de la caldera sobre la eficiencia	98
6.3.6	Efecto del exceso de oxígeno sobre la eficiencia de la caldera	100
6.4	MODELO MATEMÁTICO PARA CÁLCULO DE EFICIENCIA	101
6.4.1	Modelo matemático para el cálculo del Poder calorífico	101
6.4.2	Modelo matemático para el cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas.	104
6.4.3	Modelo matemático para el cálculo de eficiencia combinando las variables físicas y sus componentes.	107
6.5.	VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	109
6.6.	HERRAMIENTA PARA CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA CALDERA	116
6.6.1.	Descripción del software de evaluación de la eficiencia de la caldera.	117
6.7.	BENEFICIO EN AHORRO POTENCIAL DE COMBUSTIBLE	118
7.	CONCLUSIONES	122
	BIBLIOGRAFIA	123
	ANEXOS	125

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de suministro de gas a las calderas de Balance	22
Figura 2. Esquemático de las calderas de Servicios Industriales de Balance	26
Figura 3. Diagrama del Master General de las calderas	28
Figura 4. Diagrama del Master Individual de las calderas	29
Figura 5. Comportamiento del poder calorífico del gas (BTU/Ft ³) del año 2015.	35
Figura 6. Comportamiento de componentes del gas (%mol) en el año 2015	35
Figura 7. Comportamiento del hidrógeno y el metano (%mol) en el año 2015	36
Figura 8. Componentes mayoritarios en los gases de combustión	47
Figura 9. Composición del gas de salida en función del exceso de aire para gas natural.	47
Figura 10. Pérdidas en la caldera en función del exceso de aire	48
Figura 11. Relación teórica entre la carga y el exceso de oxígeno	49
Figura 12. Ahorro potencial de combustible con respecto al exceso de oxígeno.	50
Figura 13. Metodología utilizada para obtener la eficiencia de calderas	53
Figura 14. Simulación del proceso de generación de vapor de la caldera en Aspen Hysys.	59
Figura 15. Estadístico descriptivo para la variable temperatura de entrada de aire al calentador.	61
Figura 16. Estadístico descriptivo para la variable temperatura de gases de chimenea.	62
Figura 17. Estadístico descriptivo para la variable temperatura de agua del economizador.	63
Figura 18. Estadístico descriptivo para la variable temperatura de vapor Producto.	63

Figura 19. Estadístico descriptivo para la variable flujo de gas	64
Figura 20. Estadístico descriptivo para la variable Exceso de oxígeno	65
Figura 21. Estadístico descriptivo para la variable Metano	65
Figura 22. Estadístico descriptivo para la variable Etano	66
Figura 23. Estadístico descriptivo para la variable Etileno	67
Figura 24. Estadístico descriptivo para la variable Propano	68
Figura 25. Estadístico descriptivo para la variable Propileno	68
Figura 26. Estadístico descriptivo para la variable n-butano	69
Figura 27. Estadístico descriptivo para la variable isobutano	69
Figura 28. Estadístico descriptivo para la variable isopentano	70
Figura 29. Estadístico descriptivo para la variable hidrógeno	71
Figura 30. Estadístico descriptivo para la variable Total Olefinas	71
Figura 31. Estadístico descriptivo para la variable Poder Calorífico	72
Figura 32. Normalidad de los cuantiles de las variables	73
Figura 33. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de metano.	76
Figura 34. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de etano.	76
Figura 35. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de etileno.	77
Figura 36. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de propano.	78
Figura 37. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de propileno.	78
Figura 38. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de n-butano.	79
Figura 39. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de isobutano.	79
Figura 40. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de isopentano.	80

Figura 41. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de total olefinas.	81
Figura 42. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de hidrógeno.	81
Figura 43. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de metano.	82
Figura 44. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de etano.	83
Figura 45. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de etileno.	83
Figura 46. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de propano.	84
Figura 47. Variación del índice de Wobbe con respecto a composición de propileno.	84
Figura 48. Variación del índice de Wobbe con respecto a composición de n-butano.	85
Figura 49. Variación del índice de Wobbe con respecto a composición de Isobutano.	85
Figura 50. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de isopentano.	86
Figura 51. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición del total de olefinas.	86
Figura 52. Variación del índice de Wobbe con respecto a composición de Hidrógeno.	87
Figura 53. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de metano	88
Figura 54. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de etano	89
Figura 55. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de etileno	89
Figura 56. Variación de la eficiencia con respecto a la composición del propano	90
Figura 57. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de Propileno.	90

Figura 58. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de n-butano.	91
Figura 59. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de Isobutano.	92
Figura 60. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de Isopentano.	92
Figura 61. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de total olefinas.	93
Figura 62. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de Hidrógeno.	93
Figura 63. Variación de la eficiencia con respecto al poder calorífico del gas	94
Figura 64. Variación de la eficiencia con respecto a la temperatura de aire al calentador.	96
Figura 65. Variación de la eficiencia con respecto a la temperatura de gases de Chimenea.	96
Figura 66. Variación de la eficiencia con respecto a la temperatura de agua del economizador.	97
Figura 67. Variación de la eficiencia con respecto a la temperatura del vapor Producto.	98
Figura 68. Variación de la eficiencia con respecto a la producción de vapor	99
Figura 69. Variación de la eficiencia con respecto al gas consumido	99
Figura 70. Variación de la eficiencia con respecto al exceso de oxígeno	100
Figura 71. Pruebas de validación del modelo para la variable metano	110
Figura 72. Pruebas de validación del modelo para la variable etano	111
Figura 73. Pruebas de validación del modelo para la variable total olefinas	111
Figura 74. Pruebas de validación del modelo para la variable temperatura de gases de chimenea.	112
Figura 75. Pruebas de validación del modelo para la variable temperatura de agua de economizador .	112

Figura 76. Pruebas de validación del modelo para la variable flujo de gas Combustible	113
Figura 77. Pruebas de validación del modelo para la variable exceso de Oxigeno.	113
Figura 78. Pantalla de inicio del software para cálculo de eficiencia	117
Figura 79. Registro de composición del gas	119
Figura 80. Registro de la carga de la caldera	119
Figura 81. Registro de Exceso de Oxigeno	120
Figura 82. Visualización Eficiencia de la caldera	120

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla1. Características de diseño de las calderas de Servicios Industriales de la unidad de Balance.	23
Tabla 2. Características de diseño de los quemadores	24
Tabla 3. Cromatografía del gas combustible durante pruebas de diseño	33
Tabla 4. Promedio de flujo y eficiencia de las calderas en el año 2015	34
Tabla 5. Variables utilizadas para la determinación del Modelo	57
Tabla 6. Condiciones de los flujos de entrada al proceso	60
Tabla 7. Resumen Modelo N°1 para cálculo de Poder calorífico del gas	102
Tabla 8. Resumen Modelo N°2 para cálculo de Poder calorífico del gas	103
Tabla 9. Resumen Modelo N°3 para cálculo de Poder calorífico del gas	103
Tabla10. Resumen Modelo N°4 para cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas.	104
Tabla 11. Resumen Modelo N°5 para cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas.	105
Tabla 12. Resumen Modelo N°6 para cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas.	106
Tabla 13. Resumen Modelo N°7 para el cálculo de eficiencia de la caldera	107
Tabla 14. Resumen Modelo N°8 para el cálculo de eficiencia de la caldera	108
Tabla 15. Resumen Modelo N°9 para el cálculo de eficiencia de la caldera	109
Tabla16. Composiciones del gas utilizado para la validación del cálculo de eficiencia de la caldera.	115
Tabla 17. Resultado de la evaluación del cálculo de eficiencia de la caldera	116
Tabla 18. Resultado del ahorro potencial de combustible del caso estudio	121
Tabla 19. Beneficio económico por ahorro potencial de gas en las calderas	121

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES	125

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA CALDERA ACUATUBULAR DE LA UNIDAD DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE BALANCE EN LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA DE ECOPETROL S.A.

AUTOR: JUAN CARLOS HERNANDEZ BOHORQUEZ.

PALABRAS CLAVES: CALDERAS, QUEMADORES, EFICIENCIA, EXCESO DE OXIGENO, METANO, ETANO, PROPANO, PROPILENO, BUTANOS, OLEFINAS, PODER CALORIFICO, COMBUSTIÓN.

La eficiencia es un pilar fundamental para garantizar la competitividad de las empresas, la globalización requiere que la gestión energética sea un factor clave a considerar en el desempeño de las unidades para mejorar sus indicadores de costos. El presente estudio presenta una propuesta para optimizar el proceso de combustión de las calderas de la unidad de Balance de la refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol S.A.

Para tal fin, se evaluó el método con el que se realiza la medición de eficiencia energética de las calderas en la unidad, la composición del gas que se quema, el impacto que ocasiona en la eficiencia la presencia de gases de etano, etileno, propano, GLP (gas licuado del petróleo) y PGR (propileno grado refinería) a la red de gas combustible y se propuso un modelo adecuado para medición de eficiencia en la unidad.

El estudio comienza con la explicación del sistema de suministro de gas a las calderas y del proceso; posteriormente se estudiaron las diferentes variables físicas de la caldera, así como los componentes del gas combustible de carga y su incidencia en la eficiencia. Después se propone un modelo para el cálculo de eficiencia aplicable a las calderas de Servicios Industriales de Balance, en donde se considere el efecto que genera los cambios que ocurren en la composición del gas y finalmente se simula en la herramienta Aspen hysys el proceso de la caldera con el modelo propuesto incorporado para el cálculo de eficiencia.

En las conclusiones se deja en evidencia las afectaciones que presentan los desvíos de gases alternos no controlados de etano- etileno, propanos, GLP y PGR, en la eficiencia de la caldera. Sin embargo, también se concluyó que estos desvíos realizándose de manera controlada y manteniendo unas composiciones adecuadas pueden mejorar la eficiencia de combustión de la caldera.

* Tesis de Maestría.

** Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química. Directores: Dionisio Antonio Laverde C, Ph.D; Julian Ernesto Jaramillo Ibarra, Ph.D.

SUMMARY

TITLE: ENERGY ASSESSMENT OF A WATER TUBE BOILER IN BALANCES INDUSTRIAL SERVICES UNIT OF THE ECOPETROL S.A. BARRANCABERMEJA REFINERY

AUTHOR: JUAN CARLOS HERNANDEZ BOHORQUEZ.

KEYWORDS: BOILERS, BURNERS, EFFICIENCY, OXYGEN EXCESS, METHANE, ETHANE, PROPANE, PROPYLENE, BUTANES, OLEFINS, HEATING VALUE, COMBUSTION

Efficiency is a key to ensuring the competitiveness of enterprises; globalization requires that energy management is a key factor to consider in performing units to improve its cost indicators. This study presents a proposal to optimize the combustion process of the boiler unit Balance of Barrancabermeja refinery Ecopetrol S.A.

On this way, the method used to measure energy efficiency of the boiler in the unit was checked, the composition of the fuel gas, the impact generated in the efficiency by the presence of gases ethane, ethylene, propane, LPG was evaluated (liquefied petroleum gas) and RGP (refinery grade propylene) to the fuel gas system, and a suitable model for measuring efficiency in the unit was proposed.

The study begins with the explanation of the system of gas supply to the boilers and process; then the different physical variables of the boiler and fuel gas components and its impact on efficiency were studied. a model to calculate the applicable efficiency boilers Industrial Services Balance, where the effect generated by the changes occurring in the gas composition and finally simulated in Aspen tool HYSYS considered is then proposes the process kettle with built proposed for calculating efficiency model.

At conclusions is evident the effects that present alternative deviation uncontrolled gases ethane ethylene, propane or LPG and RPG in boiler efficiency. However, it was also concluded that these diversions carried out in a controlled manner while maintaining adequate can improve the combustion efficiency of the boiler compositions.

* Master's Thesis

** Faculty of physical chemistry Engineering. Department of Chemical Engineering. Directors: Dionisio Antonio Laverde C, Ph.D; Julian Ernesto Jaramillo Ibarra, Ph.D.

INTRODUCCION

Una adecuada gestión energética en los sistemas de generación de vapor, va orientada a optimizar los consumos de combustibles con el objeto de lograr el más alto desempeño económico de la compañía, por tal razón la eficiencia en una caldera es fundamental para disminuir el consumo de gas en la unidad y por tanto el costo del mismo.

La Planta Eléctrica U-2950 de la Unidad de Balance suministra el 70% de la energía consumida en la Gerencia Refinería Barrancabermeja de Ecopetrol S.A y el 40% de la energía eléctrica generada en la U-2950 se realiza por medio de generadores eléctricos cuya fuerza motriz es desarrollada con turbinas de vapor; el vapor es producido en las calderas de la misma unidad, las cuales utilizan como combustible el gas de la refinería. Teniendo en cuenta que el costo del gas representa el 75% de los costos del departamento de Servicios Industriales de la unidad de Balance, es fundamental la optimización de su consumo y por tanto lograr la mayor eficiencia de la caldera juega un papel muy importante para la rentabilidad de la planta y su competitividad.

En los últimos años el departamento de Servicios Industriales se ha retado al aumento de la eficiencia de sus equipos, basados en una política energética de minimización de consumos y optimización de sus procesos. Se ha observado que en el cálculo de eficiencia térmica que se realiza en el sistema de control distribuido (DCS) de las calderas, se presenta que algunas de las mediciones no son correctas, debido a que las dos únicas variables de la fórmula para su cálculo son la temperatura de chimenea y el exceso de oxígeno, entonces si la caldera presenta algún error o alteración en una de estas dos variables, el resultado de la eficiencia es en gran medida afectado en el cálculo, como se ha visto en algunos datos históricos de desempeño de la unidad.

En el presente documento se propone un modelo matemático para calcular la eficiencia en una caldera acuotubular de la unidad de Balance, con base a un estudio realizado a las principales variables del proceso y en donde se consideró el efecto que genera los diferentes desvíos de gases alternos que se realizan a la red de gas combustible que se quema en las calderas.

Se tomó como caso de estudio una caldera de la unidad, escogiéndose la que presentaba las mejores condiciones de operación, mantenimiento y datos más confiables; a la cual se le realizó a sus variables un análisis estadístico, aplicando técnicas numéricas con modelos de regresión lineal y valorando la significancia de los coeficientes, se obtuvo el modelo matemático de cálculo de eficiencia. Dicho modelo fue validado con los históricos de la planta comparando la eficiencia con las obtenidas en el cálculo, como también con la las eficiencias arrojadas en el sistema de control distribuido (DCS) de las calderas en el proceso en línea. Posteriormente se desarrolló una herramienta en Aspen Hysys para el cálculo de la eficiencia de la caldera, donde se incorporó el modelo matemático validado.

Finalmente se expone la importancia de aplicar una política energética en las calderas, los beneficios que se obtienen en su aplicación y lo más importante es que el estudio demuestra que no se requiere una inversión adicional para lograr una mayor eficiencia en las calderas, diferente a la implementación de una cultura energética, fundamentada en el entendimiento y aplicación de buenas prácticas del control del proceso de combustión.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. ASPECTOS GENERALES DE LAS CALDERAS DE LA UNIDAD DE BALANCE

Ecopetrol S.A. cuenta con dos refinerías, las cuales se encuentran ubicadas en las ciudades de Barrancabermeja y Cartagena. La refinería de Barrancabermeja está localizada en la ciudad del mismo nombre, en la región central de Colombia, a orillas del río Magdalena, la principal arteria fluvial del país, la cual tiene capacidad de 250 kbpd (kilo barriles por día) y la responsabilidad de generar el 75% de la gasolina, combustóleo, ACPM y demás combustibles que el país requiere, así como el 70% de los productos petroquímicos que circulan en el mercado nacional. La refinería tiene un área de 254 hectáreas, en las que se distribuyen más de 50 plantas y unidades de proceso, tratamiento, servicios y control ambiental. La refinería cuenta además, con facilidades auxiliares que son equipos y procedimientos no directamente involucrados con la refinación pero que adelantan funciones vitales para su operación. Tal es el caso de las calderas, la planta de hidrógeno, los sistemas de enfriamiento, los sistemas de recuperación de azufre y los sistemas de tratamiento de residuos o de control de la contaminación.

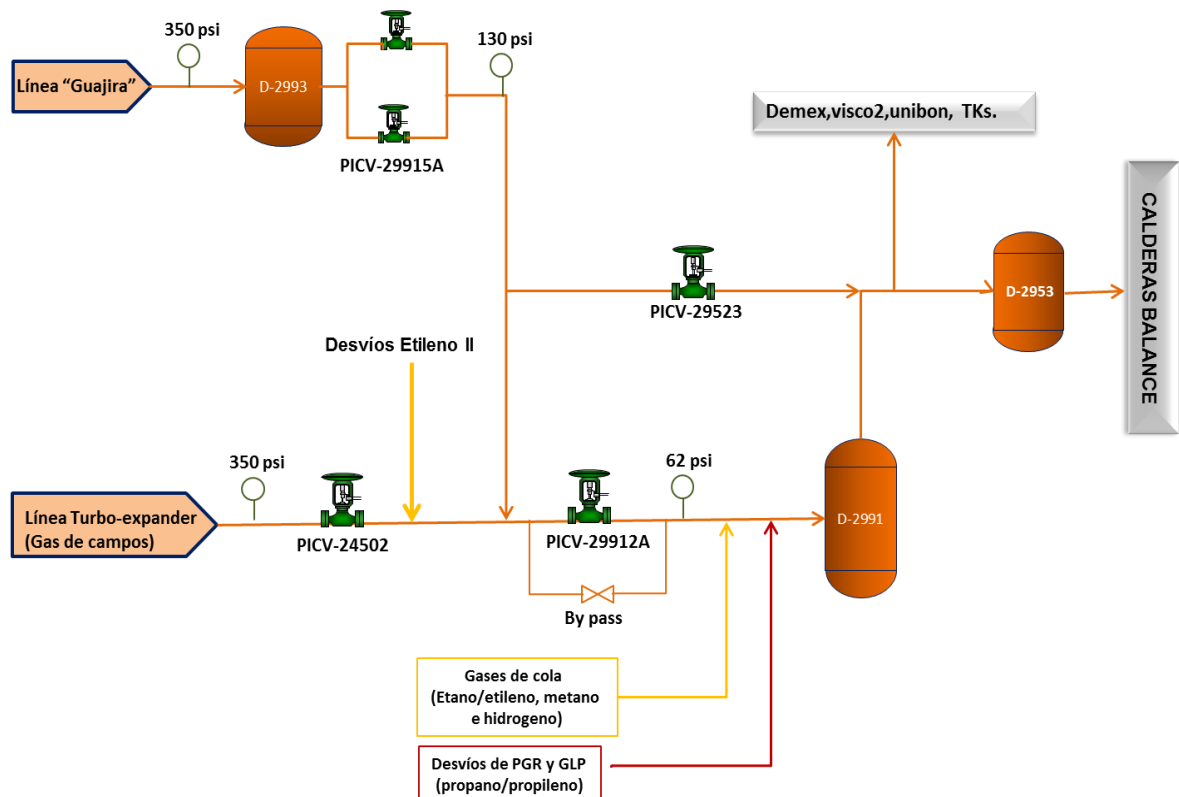
La refinería de Barrancabermeja en el año de 1979, con el objeto de aumentar su capacidad de producción, puso en operación la Unidad de Balance; esta unidad cuenta con las plantas de Demex, Viscosreductora, Hidrógeno, Unibón, unidades de tratamiento como Amina, Merox, Azufre y la Unidad de Cracking UOP I.

La producción de vapor en una refinería es sumamente importante para el desarrollo de los procesos de refinación, manejo de tanques, uso en actividades de mantenimiento y para la generación de energía eléctrica. Para lograr el abastecimiento necesario de vapor en los diferentes bloques de la Unidad de Balance, el área de servicios industriales cuenta con cinco calderas acuotubulares capaces de generar aproximadamente 325 klbh (Kilo libra por hora) de vapor de 600 psig cada una; es decir, una capacidad instalada de 1625 klbh.

Los diferentes componentes de una caldera no sólo deben funcionar conforme a su diseño, sino que también deben ser incorporadas al proceso, de manera que se transfiera la máxima cantidad posible de energía térmica en su proceso de producción de vapor, permitiendo así una producción energética de vapor eficiente y eficaz.

En la refinería, la energía requerida en las diferentes calderas es suministrada por la combustión de mezclas de gases. En la figura 1 se presenta el diagrama de suministro de gas a las calderas de la Unidad de Balance, donde se puede observar que el gas combustible que alimenta las calderas proviene del tambor D-2991 de la Unidad de Cracking UOP I y a las calderas llega después de pasar por el tambor D-2953.

Figura 1. Diagrama de suministro de gas a las calderas de Balance.



Las calderas de Balance son acuatubulares tipo "D", de alta presión, diseñadas y fabricadas por Distral S.A. En la tabla 1 de la página siguiente se relacionan las

principales características de diseño de la caldera y en la tabla 2 los datos de diseño de los quemadores que tienen instalados. Aunque las calderas llegaron con la opción de quemar combustóleo, en la actualidad el combustible líquido no se utiliza por aspectos de regulación ambiental.

Tabla1. Características de diseño de las calderas de Servicios Industriales de Balance

Característica	Valor	Unidad
Tipo	Acuotubular Tipo D	
Fabricante	Distral	
Combustibles típicos	Gas de Refinería y Fuel oil	
Fecha de fabricación	1978-1986	
Capacidad de generación de vapor sobrecalentado	325000	Lb/hr
Presión máxima de diseño del domo de vapor	750	Psig
Presión del TV a máxima producción con gas	650	Psig
Presión del vapor sobrecalentado	600	Psig
Temperatura del vapor sobrecalentado	750	°F
Temperatura de agua de alimentación	260	°F
Presión del agua de alimentación	800	Psig
Flujo nominal de aire de combustión a la caldera	106,3	MPCED
Flujo nominal de gas combustible a la caldera	10,94	MPCED
Flujo de gases de chimenea	421,2	klbh
Voltaje del motor del ventilador de tiro forzado (VTF)	4160	Volts
Potencia del motor	690	HP
Boiler Design Duty (base HHV)	472	MBTU/h
Eficiencia global de la unidad (HHV: 900.7 BTU/pie3)	82,98	%
Eficiencia global de la unidad (LHV)	92,13	%
Presión del horno u hogar	4	in H2O
Superficie de convección de la caldera	21788	ft ²
Superficie de paredes de agua en el hogar proyectadas	3607	ft ²
Superficie del Sobrecalentador de vapor	3599	ft ²
Superficie del economizador	3610	ft ²
Superficie del calentador de aire	30600	ft ²
Volumen total del hogar	15642	ft ³
Ancho del hogar	25,6	ft
Profundidad del hogar	19,5	ft
Altura del hogar	30,3	ft

Tabla 2. Características de diseño de los quemadores

Característica	Valor	Unidad
Tipo	MSC ² -575	
Fabricante	Hamworthy Peabody	
Combustible	Gas Combustible	
Burner Design Duty (base HHV)	118	MBTU/h
Flujo nominal de combustible por quemador	2.73	MPCED
Flujo nominal de aire de combustión por quemador	26.6	MPCED
Exceso de aire	10	%
Temperatura de aire de combustión	325	°F
Perdida de tiro del registro (RDL) del WBX al Horno	32,0	"H2O
Perdida de tiro del registro (RDL) por diseño	4,75	"H2O
Turndown	10:01	NA
Presión del combustible en el quemador	10	Psig

Los principales componentes de las calderas de Balance son:

Hogar. Comprende el compartimiento principal en donde se produce la combustión, está conformado por la tubería pantalla, tubería lateral, colectores, piso, pared refractaria y quemadores.

Pre-calentador de aire. Sección de tubería ubicada inmediatamente después del ventilador de tiro forzado, cuya función principal es precalentar el aire frío.

Calentadores de aire. Sección de tubería ubicada después del pre-calentador de aire, cuya finalidad es la de calentar el aire, aprovechando el calor de los gases de combustión antes de pasar por la chimenea.

Chimenea. Ducto a través del cual los gases de combustión son emitidos al ambiente, luego de haber entregado gran parte de su energía calorífica en su recorrido desde el hogar hasta la atmósfera.

Súper-calentador. Es una tubería en forma de serpentines ubicada detrás del hogar, que conduce el vapor saturado desde el tambor de vapor, lo recalienta en

una o dos etapas y posteriormente lo lleva hacia los cabezales de salida. Por lo general esta tubería tiene una metalurgia más elevada que el resto de la caldera.

Economizador. Conjunto de tubería ubicada en la parte posterior del hogar cuya función es calentar el agua de entrada a la caldera, antes de que llegue al tambor de vapor, aprovechando la salida de los gases calientes. Este componente está formado por dos cabezales y serpentines de tubería aleteada.

Tambor de Vapor. Es un recipiente ubicado en la parte superior de la caldera en donde ocurre la separación del agua y del vapor por intermedio de unas láminas separadoras de humedad que evitan el arrastre de líquido al súper-calentador. Posee una entrada de agua de alimentación y unos tubos de salida de vapor hacia el súper-calentador. Tiene boquillas de purga continua y de control de nivel. Todos los tubos bajantes y elevadores se interconectan a este tambor con el de lodos.

Tambor de Lodos. Los tambores de lodos son recipientes colectores de los tubos bajantes y elevadores cuya función es distribuir uniformemente el flujo de agua a través de los colectores laterales. De este recipiente se realizan las “purgas” intermitentes o extracciones de fondo. Normalmente existen dos tipos de purgas, una continua y la otra intermitente, estas sirven para controlar el contenido de sólidos disueltos en el agua de calderas.

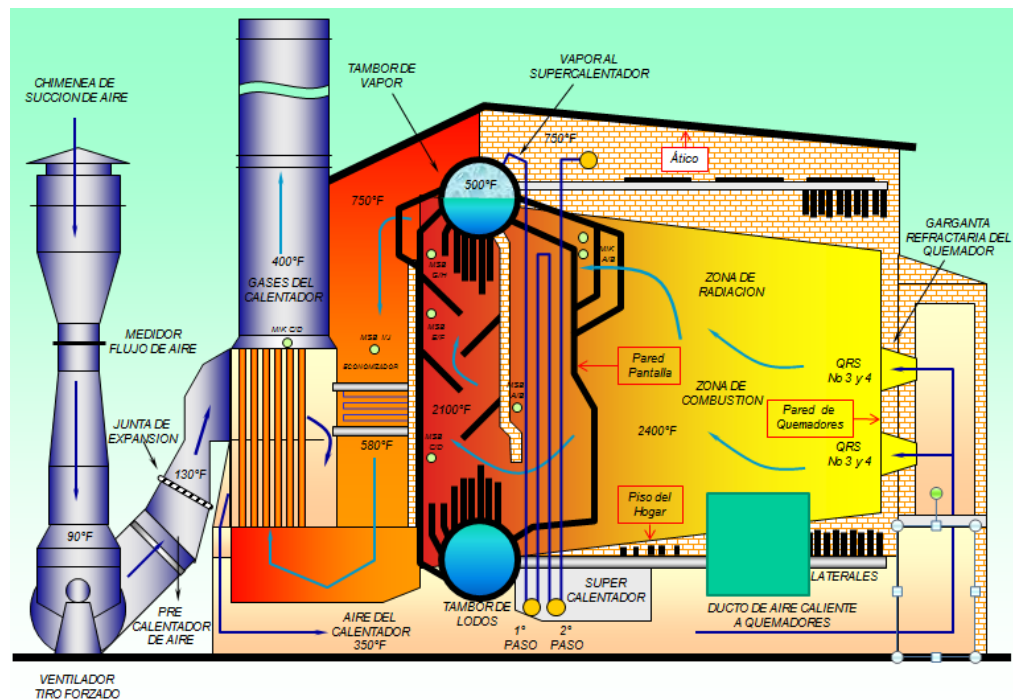
Quemadores. Son equipos destinados a introducir continuamente combustible dentro del horno para mantener una combustión controlada. Estos dispositivos son diseñados para controlar y realizar una combustión efectiva, permitiendo la preparación, mezcla, distribución uniforme y quema del combustible con aire dentro del hogar de la caldera.

Ventiladores. Los ventiladores se clasifican en los de Tiro Forzado y en los de Tiro Inducido. Los ventiladores de tiro forzado son necesarios para suministrar el aire que requiere la combustión dentro del hogar, generando presión positiva. Los de tiro inducido son los encargados de retirar los gases de combustión desde la cámara, promoviendo una presión negativa o de succión.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR

En la figura 2 se representan esquemáticamente las partes de una caldera acuotubular utilizadas para la generación de vapor de 600 psig, para los diferentes procesos de la unidad de Balance de la refinería de Barrancabermeja.

Figura 2. Esquemático de las calderas de Servicios Industriales de Balance.



El proceso de producción de vapor inicia con la entrada de agua desmineralizada a las calderas por el economizador, donde se aumenta la temperatura del agua al aprovechar el intercambio de calor con los gases de combustión que provienen de la zona de combustión de la caldera y se desplazan hacia la chimenea.

Posteriormente, inicia una circulación natural por diferencias de densidades, en donde el agua en el tambor de vapor pasa al tambor de lodos a través de la tubería (tubos bajantes o tubos de agua) que los comunica. Del tambor de lodos salen dos cabezales laterales a partir de los cuales se conforman las paredes laterales del hogar de la caldera; otras tuberías salen directamente del tambor de lodos, formando la pared de pantalla, pared de quemadores, piso del hogar y ático

(tubos elevadores o generadores de vapor) que en conjunto, forman el hogar de la caldera. Los tubos generadores son calentados principalmente por la radiación que produce la quema del combustible en el hogar, haciendo que en su interior se genere vapor húmedo.

El vapor producido pasa a través de unos paneles secadores ubicados en la parte superior del interior del tambor de vapor para obtener un vapor seco. Finalmente, el vapor pasa por los tubos del súper calentador a fin de aumentar su temperatura, aprovechando la energía de los gases de combustión en la zona de convección de la caldera. El vapor sobrecalentado sale de la caldera hacia el cabezal de vapor de 600 psig (libras por pulgada cuadrada manométricas), para ser distribuido a los usuarios, a lo largo de la unidad de balance.

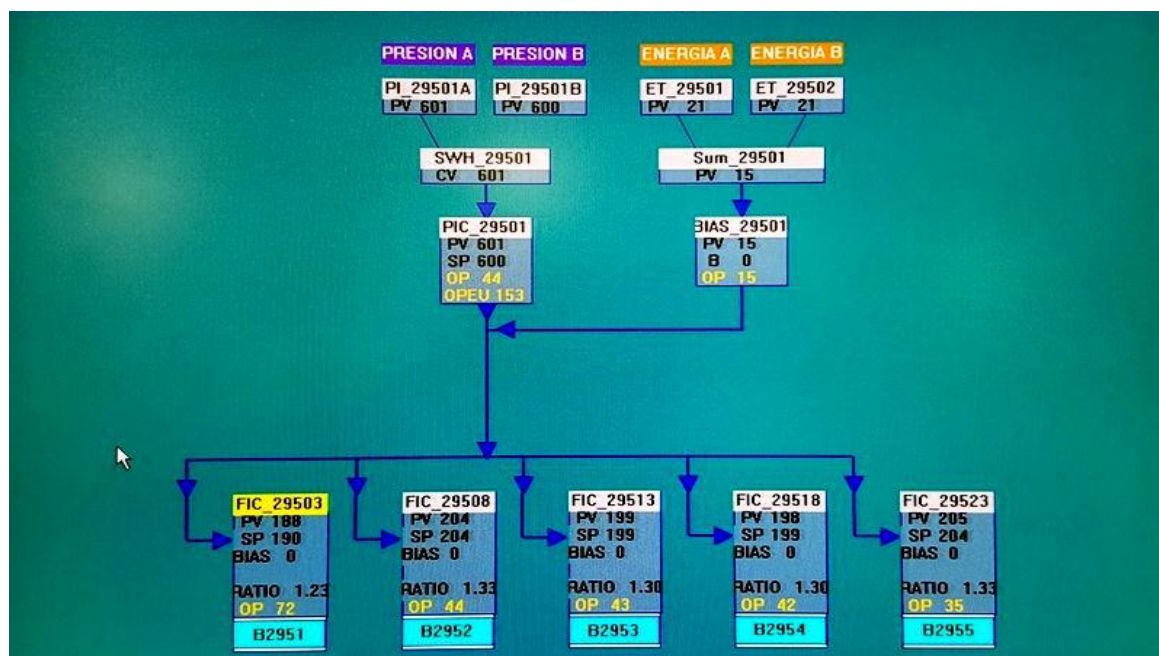
El aire con que se produce la combustión proviene directamente de la atmósfera y entra a la caldera a temperatura ambiente por el ventilador de tiro forzado, el aire regulado accede al pre-calentador de aire por el lado externo de los tubos, donde hace intercambio con vapor de 50 psig, para aumentar levemente su temperatura; posteriormente continúa al calentador de aire en donde el aire se dirige por el lado externo de los tubos, para ganar temperatura de los gases de combustión que circulan por entre los tubos del calentador de aire. El aire es conducido a través de un ducto llamado caja de aire para finalmente llegar a los quemadores, entrando así al hogar de la caldera, donde se origina la combustión al mezclarse con el gas combustible.

1.3. SISTEMA DE CONTROL DE LA CALDERA

Sistema de Control Distribuido (DCS). Es un conjunto de componentes diseñados para proveer la funcionalidad y el control a los procesos relacionados con la generación de vapor. Los componentes integrados al sistema son: los Módulos de Alto Desempeño (HPM), las Estaciones de Trabajo o Estaciones GUS, los Módulos de Interfaz (NIM), El Módulo de Historia (HM), los Sistemas de Falla Segura (FSC) y las redes de conectividad (UCN y LCN). Este sistema de control trabaja con una sola base de datos integrada para todas las señales, variables, objetos gráficos, alarmas y eventos del sistema.

Master General de las calderas. Es el sistema de control de presión del cabezal de vapor de 600 psig, el rango de operación normal es de 590 psig a 610 psig. El objetivo principal del funcionamiento de las calderas es garantizar que el sistema de control sea capaz de mantener la presión del cabezal de vapor de 600 psig con cualquier demanda de producción a la que sea sometido y hacerlo de forma eficiente; esto se logra a través del Master General de las calderas o Sistema Maestro, el cual distribuye la demanda de vapor de forma optimizada, enviando una señal de salida en unidades de ingeniería (OPEU) al Master Individual de las calderas que estén operando en modo cascada, ajustando el rendimiento de la planta. La figura 3 muestra la arquitectura del Master General.

Figura 3. Diagrama del Master General de las calderas



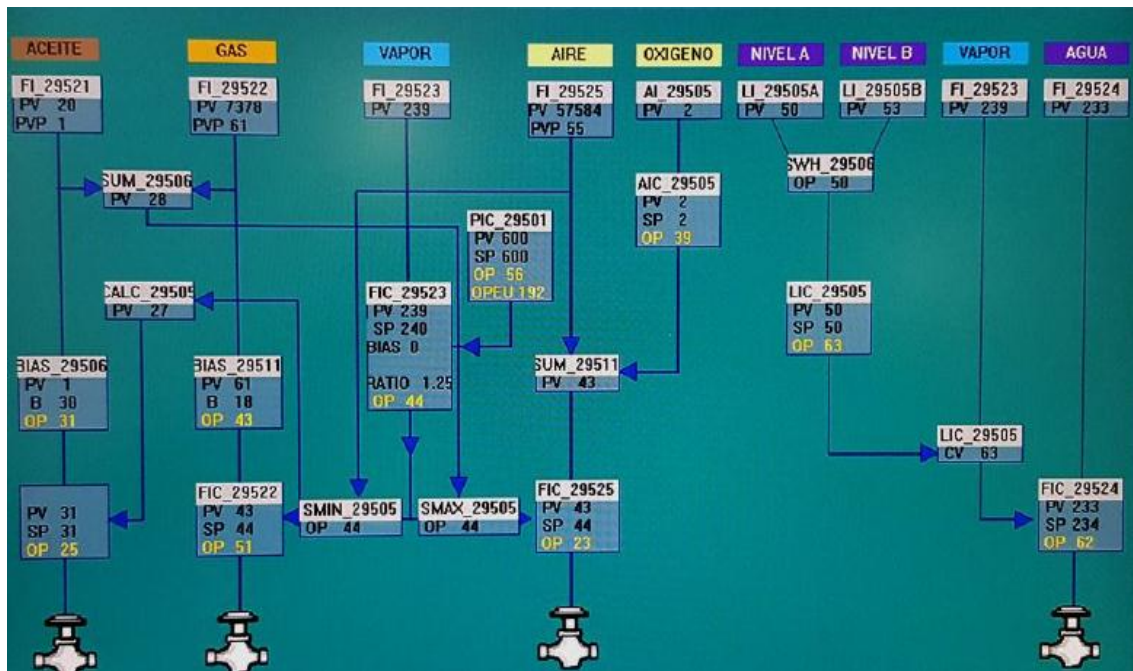
Fuente. DCS de Servicios industriales de Balance.

Master Individual (MI). El rango de operación normal es de 180 klb/h a 300 klb/h. La figura 4 muestra el diseño del sistema de control individual de la caldera. Este sistema controla la producción de vapor de la caldera, en función a los cambios de presión del cabezal de vapor de 600 psig medido con los transmisores de presión y de acuerdo con las variaciones en la demanda. Por tanto, un aumento en la

demanda de vapor ocasiona una disminución de la presión del cabezal, el controlador del Master General envía la señal de disminución de presión del vapor del cabezal al Master Individual de las calderas y estos responden aumentando las entradas de combustible, aire y agua. A medida que aumenta el régimen de estas entradas, se recuperará la presión de vapor y se estabilizará en el punto de ajuste.

La segunda entrada de control al Master Individual proviene del transmisor de flujo de vapor producto el cual puede cambiar su valor por varios factores, ya sea por el cambio del poder calorífico del gas combustible, cambio en la presión de gas combustible, variación de nivel de la caldera, apagado de quemadores, en el cambio de quemadores, etc.

Figura 4. Diagrama del Master Individual de las calderas



Fuente. DCS de Servicios industriales de Balance.

El Master individual de las calderas funciona en tres (3) modos de operación:

- **Modo Cascada.** Controla la producción de vapor de la caldera de acuerdo a la demanda del Master General, a través de la regulación automática de gas combustible y aire.
- **Modo Automático.** Genera una carga fija individual de vapor sin conexión con el Master General, pero manteniendo el control sobre los lazos de control de combustión de la caldera. La carga base o carga individual se fija a través del Set Point del controlador de generación de vapor de la caldera.
- **Modo Manual.** La producción de vapor es ajustada por el operador de la consola de vapor, a través de las manipulaciones de las señales de salida a las válvulas de control de combustibles y el dámper a los cuales se determina un valor fijo de apertura.

Sistema de control de flujo de aire de combustión. El rango de operación normal es de 35 MPCED a 105 MPCED (Millones de pies cúbicos estándar día). Este controla el flujo de aire de combustión de la caldera, recibe la señal proporcional (%) de salida del transmisor de flujo de aire de la caldera, la compara con la señal de salida del controlador del master individual y ajusta el set point del controlador del mecanismo regulador del dámper (Mecanismo ubicado en la succión del ventilador de tiro forzado de la caldera que sirve para regular el flujo de aire para la combustión), para admitir aire de acuerdo a la demanda de vapor.

Sistema de control de flujo de gas combustible. El rango de operación normal es de 6 MPCED a 12 MPCED (Millones de pies cúbicos estándar día). Este controla el flujo de gas combustible hacia los quemadores, recibe la señal proporcional (%) de salida del transmisor de flujo de gas de la caldera, la compara con la señal de salida del controlador del master individual y ajusta el set point del controlador de la válvula de control para moverla y así admitir gas a la caldera de acuerdo a la demanda de vapor.

Sistema de control de nivel de agua de la caldera. El rango de operación normal es de 45% a 55%. Controla el nivel de agua en el domo superior de la caldera. El controlador de nivel de agua recibe la señal de salida del transmisor de

nivel y envía una señal de salida. La señal de salida del controlador de nivel junto con la señal del transmisor de flujo de vapor producto de la caldera entran a un bloque de cálculo que emite una señal por adelanto, la cual es la entrada al elemento final de control (válvula de entrada de agua) con el fin de optimizar el tiempo de respuesta del controlador de nivel ante cambios bruscos en la demanda de vapor.

Sistema de control de flujo de agua de alimentación a la caldera. El rango de operación normal es de 180 a 300 klb/h. Este regula el flujo de agua del sistema de la caldera, recibe la señal del controlador de nivel y del transmisor de flujo de vapor y envía la señal de ajuste a la válvula de control de nivel, para aumentar o disminuir el flujo de agua de acuerdo a la demanda de vapor.

Control de exceso de oxígeno. El rango de operación normales de 1.0% a 3 % de exceso de oxígeno. Este controla la concentración neta de O₂ en los gases de combustión de la caldera. Cuando el controlador opera en modo automático recibe la salida del analizador de O₂, y modifica automáticamente la señal de entrada del controlador de entrada de aire que corrige la desviación a través del dámper. Cuando opera en modo manual puede modificar la apertura del dámper a través del ingreso de un valor calculado por el operador de la consola.

Analizador de oxígeno. La caldera utiliza un transmisor de O₂ tipo Oxymitter 4000 de Rosemount, diseñado para medir la concentración neta de oxígeno en el gas de combustión. La sonda está posicionada dentro de un ducto de escape y realiza su trabajo sin el uso de un sistema de muestreo. El equipo mide el porcentaje de oxígeno mediante la lectura del voltaje desarrollado a través de una celda electroquímica calentada, la cual consiste de un pequeño estabilizador itria, disco de zirconio. Ambos lados de este disco tienen una capa porosa con electrodos metálicos. El control electrónico integral sondea la temperatura y proporciona una salida aislada, 4-20 mA, que es proporcional a la concentración de oxígeno medido. La sonda está diseñada para operar dentro de los límites de temperatura de proceso que van desde 0°C hasta 704°C (32°F a 1300°F).

1.4. DESCRIPCIÓN DE LOS DESVIOS DE GASES ALTERNOS A LA RED DE GAS COMBUSTIBLE

1.4.1. Desvíos de Propano. La operación de desvío de propano a la red de gas combustible se realiza en las unidades de ruptura catalítica, normalmente en esta unidad la corriente de propano se desvía a la red de gas combustible de 75 psig por altos inventarios o por fallas en la calidad del producto. Este desvío alterno de gas se entiende en la refinería como una mezcla de Propano y Propileno.

1.4.2. Desvíos GLP. Se origina normalmente en las unidades de ruptura catalítica buscando mejorar el poder calorífico de la red de gas combustible de manera controlada y se requiere el paso del producto por un vaporizador que garantiza el estado gaseoso y minimiza la presencia de butano líquido en la red de gas combustible. Este desvío está compuesto principalmente por butano normal (60%), propano (9%), iso-butano (30%) y etano (1%).

1.4.3. Desvíos de Etano-Etileno. El etano etileno desviado a la red de gas combustible puede realizarse en condiciones normales desde las unidades de craqueo catalítico o desde la planta de Etileno. Desde las unidades de craqueo se puede desviar una mezcla aproximadamente de 50% de etano y 50% de etileno; desde la planta de Etileno se puede desviar Etano, Etileno o la mezcla anteriormente mencionada.

1.5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las calderas de Servicios Industriales de la unidad de Balance fueron diseñadas para trabajar con una eficiencia entre 87.92 y 88.65% basado en el PCI del gas combustible, tomando como referencia un gas combustible con la cromatografía mostrada en la tabla 3.

Tabla 3. Cromatografía del gas combustible de pruebas de diseño

Composición	% Volumen (mol)
H ₂	12
CH ₄	81
C ₂ H ₆	2
C ₃ H ₈	1
C ₄ H ₁₀	1
C ₅ H ₁₂	<1
H ₂ S	0
S (grains/100CF)	45
N ₂	0.3
O ₂	<1
CO	<1

Fuente. TPL de las calderas de la U2950 de Ecopetrol S.A.

El cálculo de eficiencia térmica en el DCS (Sistema de Control Distribuido) de las calderas de Servicios Industriales de Balance tiene configurada la siguiente fórmula:

$$n = \left(0.97 - \frac{20.7}{20.7 - \%exc} * \frac{T_{chim}}{3750} \right) * 100 \quad (1)$$

En donde T_{chim} es la temperatura a la salida de la chimenea (°F), y % exc es el porcentaje de exceso de oxígeno (%) medido a la salida de la chimenea, 3750 representa la temperatura adiabática de llama, 0.97 porque se estiman pérdidas de calor de 3%.

La temperatura adiabática de llama es considerada constante en la fórmula, lo cual en la realidad no ocurre, porque esta temperatura varía con la carga de la caldera y con la composición del gas de quema, aunque 3750°F es un valor promedio muy aproximado para obtener la eficiencia en este tipo de calderas, de acuerdo a estudios realizados por Shell Global Solutions a calderas similares en las empresas que ellos han asesorado en el mundo y fueron los especialistas de dicha empresa quienes incorporaron la fórmula a la refinería, durante el proceso de optimización que Ecopetrol S.A contrató con Shell entre los años 2001 y 2006.

Es importante aclarar que dicha fórmula puede tener un porcentaje de error entre 1% y 2% de la eficiencia real, aun así, dicho cálculo es el dato oficial con que se mide el desempeño de las calderas de Balance en la Gerencia Refinería Barrancabermeja (GRB).

En la tabla 4 se presenta las eficiencias de las calderas de la unidad de Balance del año 2015, resultados calculados de acuerdo a la fórmula predeterminada en el DCS.

Tabla 4. Promedio de flujo y eficiencia de las calderas en el año 2015.

Caldera	Producción (Klb/h)	Eficiencia de calderas (%)		
	Flujo Promedio año 2015	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio año 2015
SB-2951	190,58	90,4	90,94	90,43
SB-2952	225,07	84,45	88,15	87,08
SB-2953	224,5	85,09	86,79	85,94
SB-2954	222,66	84,35	85,77	84,86
SB-2955	225,73	84,21	86,4	85,51

Fuente. DCS de Servicios industriales de Balance.

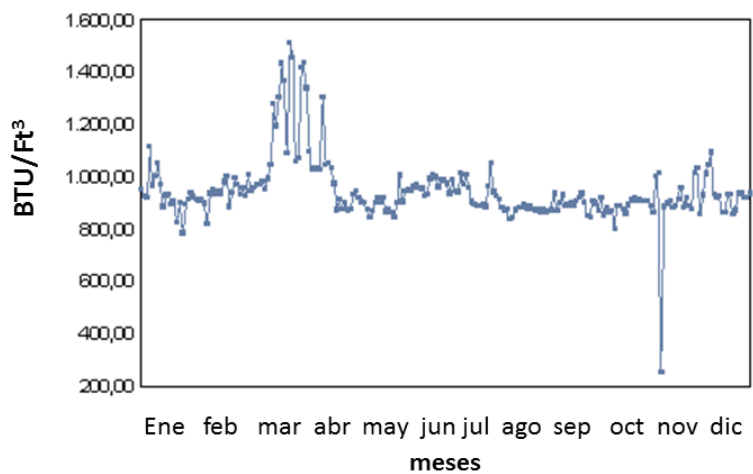
¿Es confiable la medición de la eficiencia de las calderas de Servicios industriales de la unidad de Balance?

Aunque la caldera SB-2951 en el cálculo de eficiencia térmica del DCS presenta la mayor eficiencia, este valor de eficiencia térmica no es correcto, debido a que la caldera tiene algunos tubos del calentador de aire rotos, permitiendo el flujo de aire frío hacia la chimenea, por lo cual se afecta la lectura real de la temperatura de salida de gases por la chimenea y por consiguiente el cálculo se ve alterado, teniendo en cuenta que en la fórmula sólo se consideran como variables el exceso de oxígeno en la caldera y la temperatura de gases de chimenea.

En la figura 5 se presenta el comportamiento en el último año del poder calorífico del gas combustible que se quema en las calderas de balance y en las figuras 6 y 7 el comportamiento de los componentes del gas. La figura 5 muestra que el

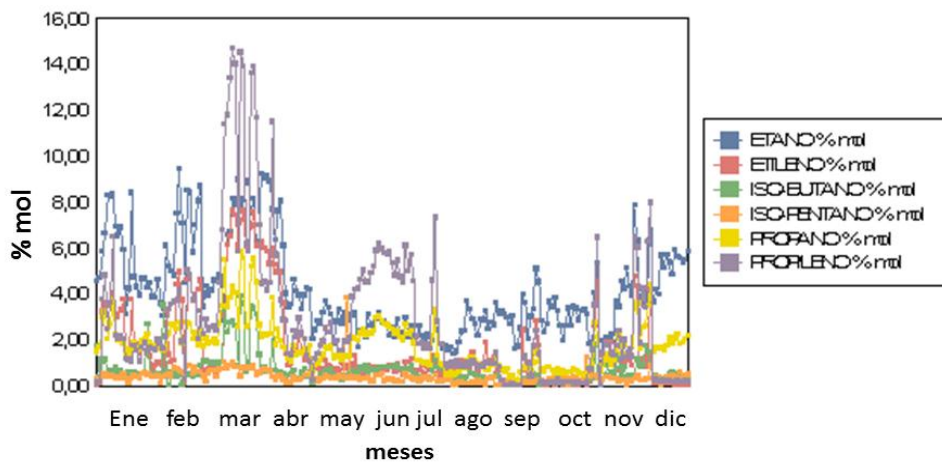
poder calorífico es muy variante, debido a que el gas combustible es una mezcla de gas natural de campos en combinación con el gas de refinería y esta mezcla varía de acuerdo a los desvíos de gases alternos que realizan en el cabezal de suministro de gas dependiendo de las necesidades de la refinería; estos desvíos de gases alternos generalmente son de gas propano licuado (GLP), etano etileno, propileno grado refinería (PGR), entre otros, bien sea por altos inventarios o porque están fuera de especificaciones para la venta.

Figura 5. Comportamiento del poder calorífico del gas (BTU/Ft³) en el año 2015.



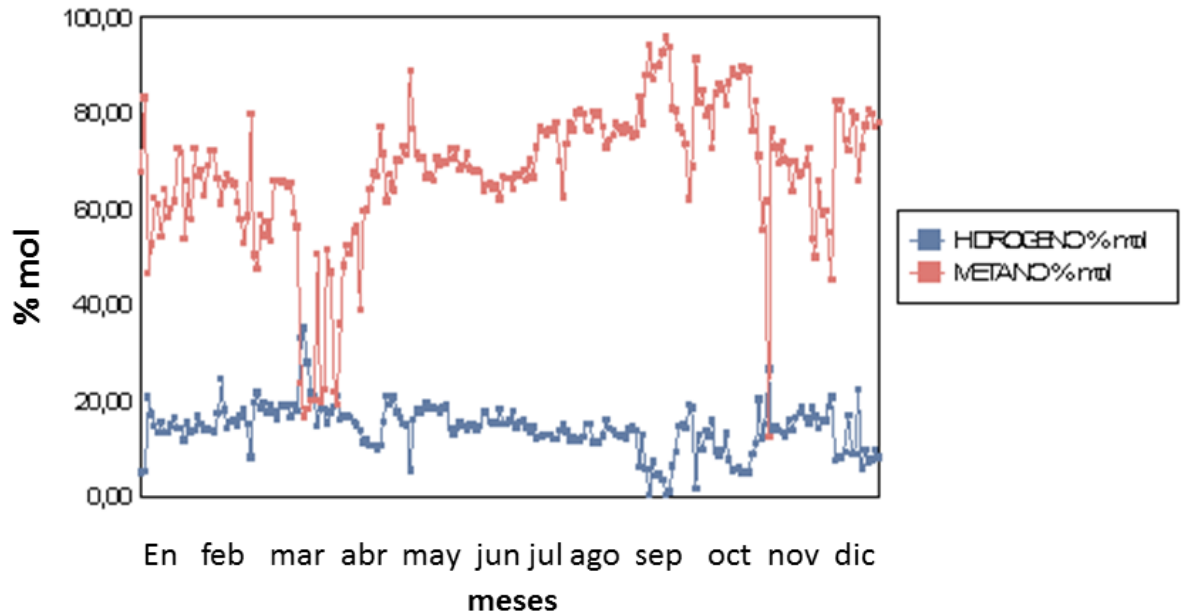
Fuente. Herramienta CDLAB de Ecopetrol S.A.

Figura 6. Comportamiento de componentes del gas (%mol) en el año 2015.



Fuente. Herramienta CDLAB de Ecopetrol S.A.

Figura 7. Comportamiento del hidrógeno y metano del gas (%mol) en el año 2015.



Fuente. Herramienta CDLAB de Ecopetrol S.A.

Cuando estos desvíos de gases alternos se realizan, la eficiencia en las calderas varía y lo más relevante es que cuando hay valores muy altos del poder calorífico del gas combustibles, se ha observado que los índices energéticos presentan un aumento (Millones de BTU de consumo de gas/ kilo-libras de vapor generado), mientras que la eficiencia algunas veces disminuye.

De acuerdo a lo anterior, se requiere realizar un estudio de las eficiencias térmicas de las calderas, teniendo en cuenta que con los cálculos de eficiencias actuales además de que no se está cumpliendo con las eficiencias esperadas, éstas no son completamente creíbles.

¿Es posible generar un modelo para cálculo de eficiencia que involucre variables de composición del gas y otras variables físicas, para las calderas de Servicios Industriales de la unidad de Balance?

Para solucionar la incertidumbre en la medición de la eficiencia se propuso un modelo para el cálculo de eficiencia aplicable a las calderas de Servicios

Industriales de Balance, en donde se consideró el efecto que genera los diferentes desvíos de gases alternos que se hacen a la red de gas combustible que se quema en la caldera. Para llegar al modelo se estudiaron las diferentes variables físicas del proceso de intercambio de calor ocurridos en la caldera para producir el vapor y los componentes del gas combustible con su incidencia en la eficiencia; adicional se aplicaron procedimientos estadísticos de regresión para encontrar el modelo que más se ajustó a la unidad.

2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia térmica de las calderas de Servicios Industriales de la unidad de Balance, teniendo en cuenta la variabilidad de las propiedades fisicoquímicas del cabezal de suministro de gas combustible a la unidad y su impacto en el desempeño de la planta.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar estadísticamente el comportamiento de las variables del proceso de generación de vapor y su correlación con la eficiencia de la caldera, e identificar aquellos componentes del gas que más inciden en su desempeño.
- Proponer una metodología para evaluar la eficiencia térmica de las calderas de Servicios Industriales de Balance, utilizando métodos de cálculo estadísticos para definir el modelo de eficiencia y seleccionando el más adecuado para la planta.
- Desarrollar la simulación del comportamiento de la eficiencia térmica de las calderas en la herramienta de software de trabajo Aspen Hysys; incorporando en éste el modelo matemático de eficiencia seleccionado para la unidad.

3. ESTADO DEL ARTE

En la combustión de combustibles gaseosos, existe una amplia diversidad de compuestos que pueden ser utilizados en procesos de combustión, dependiendo de la fuente de origen y su disponibilidad. Desde inicios del siglo XX se conocen estudios sobre los efectos del cambio de la fuente de combustible y su efecto en los quemadores, así como la eficiencia del proceso de combustión; en general estos estudios se han centrado en el desarrollo de índices que permitan diferenciar los combustibles y se han probado en diferentes equipos con combustibles de composición variable.

Los primeros estudios fueron desarrollados en 1920 por el físico italiano Goffredo Wobbe [16], quien originó “el índice de Wobbe” (poder calorífico dividido entre la raíz cuadrada de la gravedad específica), el cual describe la habilidad del gas para liberar calor al quemador como una función de su densidad. El índice de Wobbe es calculado mediante la ecuación (2) y ha sido considerado el parámetro más eficiente para describir la intercambiabilidad de un amplio rango de gases [1]. Además se reconoce como un buen indicador de rendimiento similar para gases de una composición similar [16].

$$IW = \frac{PCI}{\sqrt{DR}} \quad (2)$$

Donde DR es la densidad relativa del gas y PCI es el poder calorífico inferior del combustible.

En 1946, American Gas Association, publicó el boletín numero 36 [2], cuyo objetivo principal fue el desarrollo de un método que pudiera predecir con confianza qué gases podrían sustituir el gas natural o las mezclas de gases de alto poder calorífico (superior a los 800 BTU/pe³). Además, se desarrollaron tres índices para describir adecuadamente el rendimiento de la llama del quemador, estos índices fueron: el índice de elevación, el índice de retroceso y el índice de puntas amarillas.

En 1989 Steinmetz [13,14], detalla cómo los países de Europa Occidental adoptaron las pruebas a principios de 1970 para un rendimiento basado en dispositivos de ajustes y limitar la composición del gas, Steinmetz compara los resultados de la utilización de algunos métodos desarrollados en Europa y los Estados Unidos que relacionan el funcionamiento de los equipos con la composición del gas combustible.

Daniel Montaña [8], en el año 2011, analizó las propiedades de las mezclas de gas combustible y evaluó su impacto en la eficiencia de combustión. Este estudio no recomienda la intercambiabilidad de gases (de gas natural a gas de refinería) dado que afecta significativamente la eficiencia. De hecho, los resultados de este estudio muestran que cuando las mezclas superan el 6% de la composición de etano-etileno y 6% de propano-propileno, el índice de Wobbe tiene un comportamiento inestable.

Oscar Cala [3] analizó el efecto del cambio de composición del gas combustible sobre las características del proceso de combustión en hornos de la industria de refinación del petróleo. Se evaluó el poder calorífico, el índice de Wobbe (IW) y el exceso de oxígeno para mezclas combustibles de composiciones variables. Mediante simulación computacional del proceso de combustión se calculó la temperatura adiabática de llama, la eficiencia de combustión y la composición de los productos de combustión. Se evaluaron mezclas de gases combustibles con poderes caloríficos entre 800-2500 BTU/ft³ y se compararon con la combustión del gas natural. Se registró un aumento en la temperatura adiabática de llama, aire teórico y emisiones de CO₂, mientras que la eficiencia disminuyó en función de la composición de hidrógeno. Adicionalmente, se desarrolló un índice de eficiencia energética (IE) mediante lógica difusa y modelamiento matemático utilizando como variables el Índice de Wobbe (IW) y la temperatura adiabática de llama (T). Dicho índice tuvo en cuenta el efecto de la composición del gas combustible, permitiendo la toma de decisiones en cuanto al uso del gas de refinería; las mezclas de gases con valores del IE mores de 6.5 pueden considerarse favorables para el proceso de combustión, aumentado la eficiencia y disminuyendo las emisiones de contaminantes.

Hseih utilizó el modelo de entradas y salidas indirecto descrito en la norma ASME PTC 4.1 [5], el cual es considerado uno de los modelos más generales para el cálculo de la eficiencia térmica en hornos y se define como:

$$n = \frac{PCI - Q_{chimenea}}{PCI} * 100 \quad (3)$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior del combustible y el $Q_{chimenea}$ es el calor perdido en la chimenea.

Serrano y Carranza [12], tuvieron en cuenta en su modelo el poder calorífico superior (PCS) del combustible a la entrada del proceso, además la eficiencia del horno está asociada a la energía química que se transforma en calentamiento de los productos de combustión.

$$n = \frac{PCS - (H_{prod} - H_{Reac})}{PCS} * 100 \quad (4)$$

Donde PCS es el poder calorífico superior del combustible, H_{prod} es la entalpía de los productos, H_{Reac} es la entalpía de los reactivos.

Meza [7], analiza la eficiencia en la combustión de gas de refinería en hornos tipo cabina, teniendo en cuenta el exceso de aire y las temperaturas de chimenea y adiabática de llama.

$$n = 97 - \left(100 * \frac{21}{21 - \%exc} * \frac{\frac{T_{chim} - 32}{1,8}}{T_{adia}} \right) \quad (5)$$

En donde T_{chim} es la temperatura a la salida de la chimenea ($^{\circ}F$), T_{adia} es la temperatura adiabática de llama ($^{\circ}C$) y % exc es el porcentaje de exceso de aire.

UPME y COLCIENCIAS [15], Para el cálculo de la eficiencia energética del generador de vapor utilizan como referencia el Código PTC 4.1 del ASME, para unidades de generación de vapor. El código PTC 4.1 establece dos métodos para

determinar la eficiencia: El método de pérdidas de calor y el de entradas y salidas (Directo).

El método de pérdidas de calor hace referencia a la determinación de la eficiencia mediante la sustracción en porcentaje de la suma de las pérdidas medidas en la caldera. En el método de pérdidas de calor la eficiencia es cuantificada mediante la siguiente expresión:

$$Eficiencia = (1 - Pérdidas) \times 100\% \quad (6)$$

El método directo o energía que entrega la caldera en el vapor contra la energía entregada a la caldera. En el método de entradas y salidas la eficiencia es cuantificada mediante la siguiente expresión:

$$Eficiencia = \frac{Q \text{ Aprovechado}}{Q \text{ suministrado}} * 100 \quad (7)$$

Dichos métodos permiten calcular la eficiencia térmica y su aplicación varía del tipo de horno o caldera. Cuando se evalúa la eficiencia de la combustión se debe tener en cuenta que los modelos que se utilizan presentan limitaciones, puesto que hay muchas variables que influyen en el proceso y su éxito depende de identificar muy bien las variables que se deben tener en cuenta para cada caso en particular.

En el análisis se puede observar que la ecuación (3) es más simple que la ecuación (4), puesto que no requiere conocimiento de datos termodinámicos, sin embargo estas dos ecuaciones no tiene en cuenta las pérdidas por radiación y convección que se presentan por las paredes de las cámaras de combustión. La ecuación (5) en cambio sí considera unas pérdidas de calor del 3% y la ecuación (6) requiere su cálculo aumentando su complejidad.

Actualmente no se conoce en la Gerencia Refinería Barrancabermeja un estudio serio sobre eficiencia de calderas, tampoco sobre el impacto que ocasionan los diferentes desvíos alternos que se realizan a la red de gas combustible y su influencia en el desempeño de los generadores de vapor. La mayoría de los

documentos consultados sobre los impactos de la composición y calidad del gas, se han centrado es en el impacto del H₂S sobre la metalurgia de los equipos de combustión, debido a las consecuencias corrosivas que han ocurrido en los tubos de las calderas de Servicios Industriales de la unidad de Balance.

6. MARCO TEÓRICO

La evaluación de la eficiencia térmica de las calderas es muy importante, debido a que el consumo del gas combustible puede incrementar los costos de producción de vapor de la unidad. Al comparar la eficiencia, es importante diferenciar si la eficiencia está basada en el Poder Calorífico Superior (PCS) o poder calorífico inferior (PCI) del combustible.

4.1. PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de un combustible es la máxima cantidad de calor que se puede obtener de él cuando se quema en forma completa y sus productos son enfriados hasta la temperatura original de la mezcla aire-combustible.

Entre los productos de la combustión está presente vapor de agua, el cual dependiendo de la temperatura de los productos, puede permanecer como vapor, puede condensar parcialmente o condensar completamente. Como el vapor al condensar libera calor, mientras más condensado se forme, mayor calor se está obteniendo del combustible. Esto permite diferenciar entre el poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior (PCS). El PCI indica la cantidad de calor que puede proporcionar el combustible cuando toda el agua en los productos permanece como vapor, mientras el PCS refleja el calor que puede liberar el combustible cuando toda el agua en los productos condensa [11].

El Poder calorífico es la variable más importante del proceso, porque depende directamente de la composición y mide el contenido energético por unidad de masa o volumen del combustible desprendido en una reacción de combustión. Para mezclas gaseosas está definido así:

$$PC = \sum y_i PC_i \quad (8)$$

Donde y_i es la fracción molar del componente i y PC_i es el poder calorífico del componente i , la magnitud del poder calorífico puede variar de acuerdo a como se

mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI).

Desde el punto de vista de la combustión, el PCI es el que habitualmente da una idea más real del proceso de combustión, dado que en la mayoría de aplicaciones la temperatura de los humos a la salida de la caldera (Temperatura de chimenea > 100 °C) hace que el agua formada en la combustión escape en forma de vapor a la atmósfera. No ocurre así con las calderas de condensación, cuya denominación proviene de hacer enfriar los gases de combustión antes de su expulsión a la atmósfera con el objeto de condensar al vapor de agua y recuperar el calor latente de transformación vapor/líquido.

El Poder calorífico del gas combustible afecta el rendimiento del horno incluyendo las características de la combustión (longitud de llama, estabilidad de la llama y temperatura), la eficiencia térmica y las emisiones, por lo tanto es un parámetro de vital importancia para el estudio de la combustión.

4.2. TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA

La máxima temperatura que pueden alcanzar los productos de la combustión se conoce como temperatura de llama adiabática, la cual es la temperatura alcanzada cuando se quema un combustible en aire u oxígeno sin ganancia o pérdida de calor. La máxima temperatura adiabática de llama se obtiene cuando se quema el combustible con la cantidad teóricamente necesaria de oxígeno. El procedimiento de cálculo de la temperatura de llama adiabática, considerando los fenómenos de disociación, se lleva a cabo por iteración de la temperatura de los productos hasta que se cumpla la siguiente expresión:

$$H_{reactantes} = H_{productos} \quad (9)$$

En la ecuación (10) la $H_{reactantes}$ se refiere a la entalpía del combustible y del aire que hacen parte del proceso de combustión. Cuando toda esta energía es empleada para elevar la temperatura de los humos de combustión, sin pérdidas de

calor hacia el medio, los productos alcanzarán una entalpía $H_{\text{productos}}$ igual a la de los reactantes, y por ende, obtendrán su máxima temperatura.

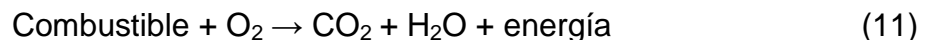
La cantidad de aire teórica necesaria para garantizar la combustión completa para el gas es calculada mediante la ecuación:

$$A_0 = \frac{1}{0.21} (2CH_4 + 3.5 C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6.5C_4H_{10} + 3 C_2H_4 + 4.5 C_3H_6 + 0.5H_2) \quad (10)$$

Donde $CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, C_2H_4, C_3H_6$ y H_2 es la fracción molar de cada compuesto en el gas combustible.

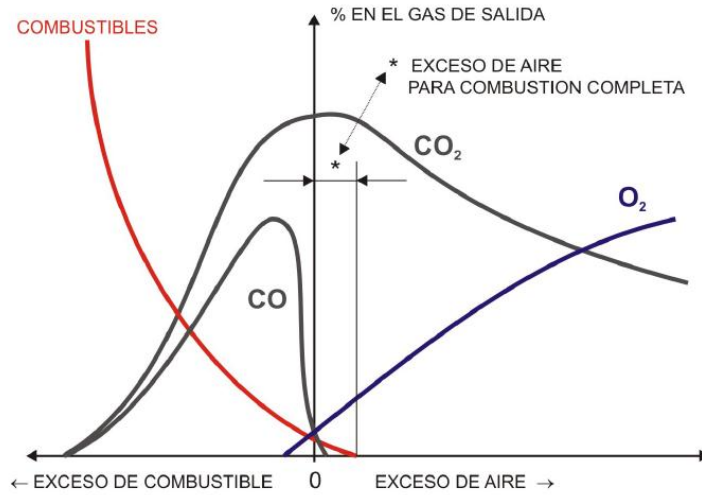
4.3. EXCESO DE OXIGENO

Cuando se que quema un hidrocarburo, el hidrógeno contenido en éste se combina con el oxígeno del aire para producir agua, el carbón se combina con el oxígeno del aire para formar bióxido de carbono y además se liberará energía en forma de calor. La ecuación química de combustión de forma simplificada se puede expresar de la siguiente forma:



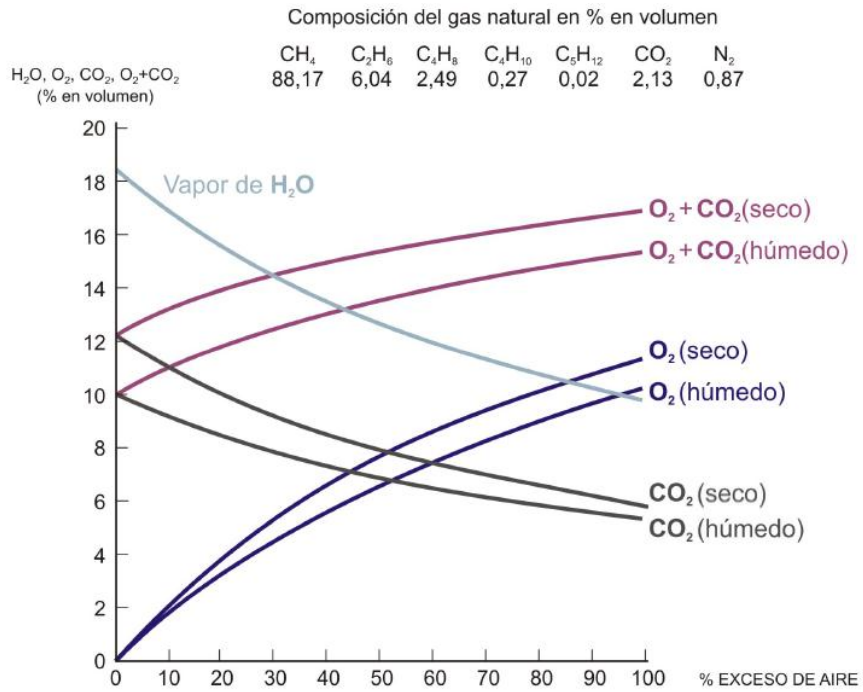
La figura 8, presenta la relación que hay en la composición del gas en función de la cantidad de aire suministrada para la combustión. La gráfica muestra que es posible lograr una combustión completa garantizando un exceso de oxígeno, por tanto, hay que optimizar este exceso de oxígeno puesto que excesos muy grandes ocasionan disminución de la temperatura de llama, la velocidad de transferencia de calor en la caldera también disminuye y la temperatura de salida de los gases de chimenea aumenta, disminuyendo la eficiencia de la caldera. Bajos excesos pueden ocasionar combustión incompleta favoreciendo la producción de monóxido de carbono y combustible sin quemar, lo cual reduce también la eficiencia de la caldera.

Figura 8. Componentes mayoritarios en los gases de combustión.



Fuente. Bela G.Lipták [6].

Figura 9. Composición del gas de salida en función del exceso de aire.



Fuente. Dukelow, S.G. [4].

También se puede utilizar la siguiente fórmula para calcular el exceso de aire:

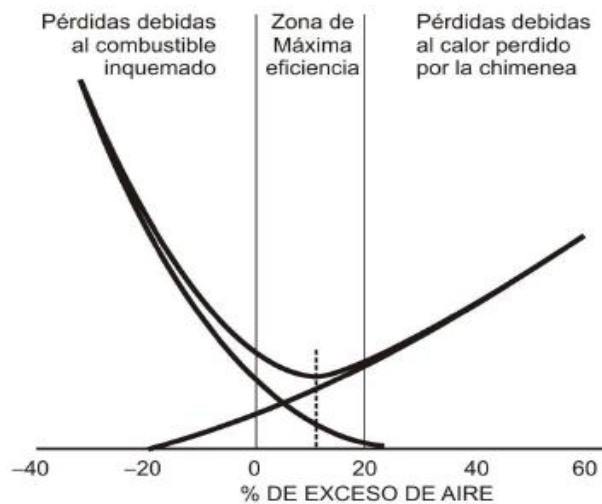
$$\text{Exceso de aire} = K * \left(\frac{21}{21 - \%O_2} - 1 \right) * 100 \quad (12)$$

Donde K es una constante equivalente para gas natural de 0.90.

El porcentaje de oxígeno (O₂) en los gases de combustión que salen por la chimenea se puede usar para determinar el porcentaje de exceso de aire. La figura 9 representa la composición del gas de salida por la chimenea en función del exceso de aire.

La optimización del exceso de aire permite minimizar las pérdidas de calor de la caldera bien sea, por combustibles no quemados por insuficiencia de oxígeno o por las altas temperatura de salida por la chimenea de los gases de combustión excesos grandes de aire. La figura 10 muestra la relación de las pérdidas de calor con respecto al exceso de oxígeno.

Figura 10. Pérdidas en la caldera en función del exceso de aire.

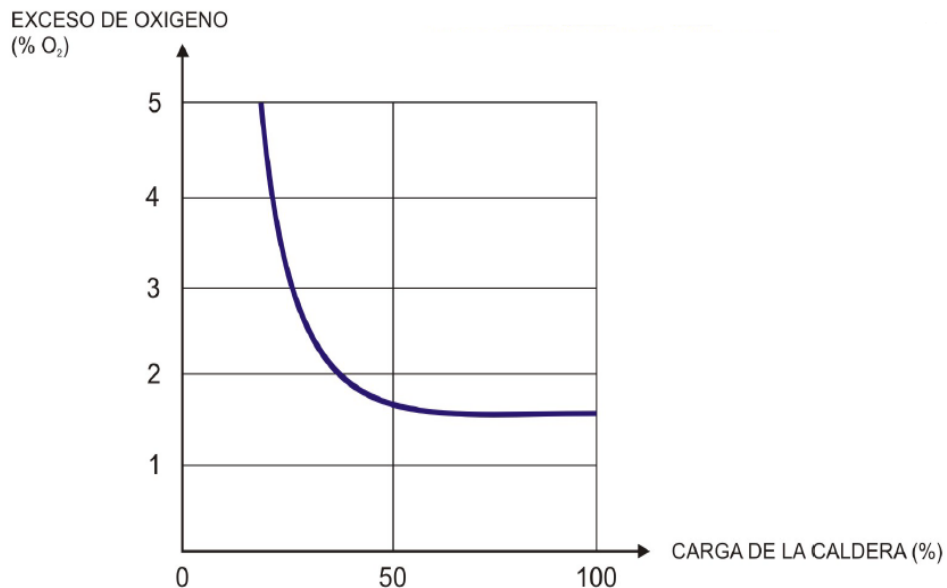


Fuente. Bela G.Lipták [6].

4.4. INFLUENCIA DE LA CARGA DE LA CALDERA

La carga de la caldera también es un factor importante para el rendimiento, a bajas cargas la velocidad en el quemador disminuye, por lo que la circulación de gases se reduce mientras que el volumen de la caldera se mantiene constante, reduciéndose la eficiencia en la mezcla aire combustible. Para controlar este fenómeno se debe aumentar el exceso de oxígeno a bajas producciones de la caldera. La figura 11 muestra la relación entre la carga y el exceso de oxígeno.

Figura 11. Relación teórica entre la carga y el exceso de oxígeno.



Fuente. Bela G.Lipták [6].

La cantidad de energía que se pierde a través de la chimenea es función de la cantidad de exceso de aire y de la temperatura de salida de los gases. La temperatura de salida es consecuencia de la carga, la infiltración de aire y estado de las superficies de transferencia de calor.

4.5. CÁLCULO DE AHORRO DE COMBUSTIBLE

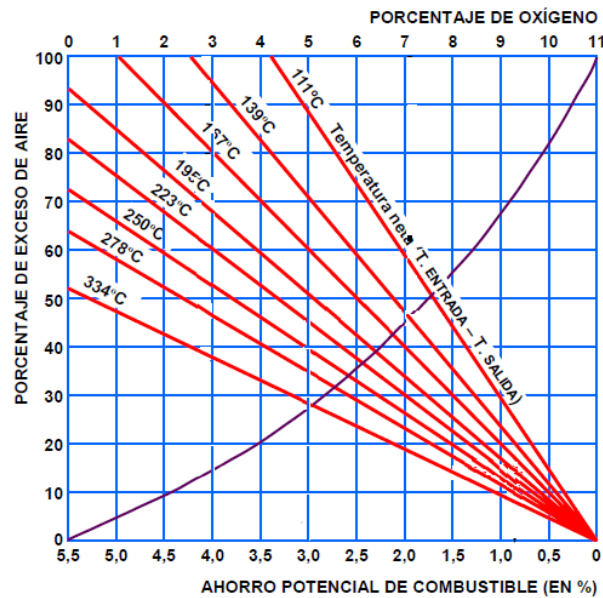
La figura 12 presenta la tabla para calcular el ahorro potencial de combustible en función del exceso de aire en la caldera y temperatura. Mediante esta tabla se

puede estimar el ahorro en combustible al realizar una adecuada optimización de la caldera.

Si se tienen las siguientes condiciones operativas:

Variable	Unidad	Lectura antes del ajuste	Lectura después del ajuste
Oxígeno	%	7,1	2,9
Temperatura neta	°C	222	198

Figura 12. Ahorro potencial de combustible con respecto al exceso de oxígeno.



Fuente. Bela G.Lipták [6].

El ahorro potencial de combustible utilizando la tabla, después de realizado el ajustes sería de 2.7%.

4.6. EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

La eficiencia de la combustión es uno de los principales indicadores del desempeño de los equipos generadores de vapor. Por medio de ésta se pueden tomar decisiones para ajustes operacionales, mantenimiento e identificar oportunidades para ahorrar energía y minimizar costos.

Uno de los métodos más difundidos en la industria para medir eficiencia en los generadores de vapor, es considerar sólo las pérdidas de energía por la chimenea y el exceso de oxígeno utilizado en el proceso de combustión, puesto que hacer una evaluación global puede resultar a veces algo costoso y dispendioso, por la instrumentación requerida, procedimientos y competencia del personal.

En todo caso hay que tener en cuenta que la eficiencia de la combustión depende de la carga o nivel de producción, el exceso de oxígeno que se controla, el tipo de combustible y las pérdidas de calor por radiación y convección.

4.7. INDICE DE WOBBE

El índice de Wobbe describe la habilidad del gas para liberar calor al quemador como una función de su densidad, dicho índice tiene en cuenta el efecto de la composición y el poder calorífico inferior (PCI). Se puede tener dos combustibles con diferentes composiciones y PCI, aunque con el mismo índice de Wobbe, por lo que presentarían características similares para la combustión debido a sus propiedades de intercambiabilidad. El cálculo del índice de Wobbe fue explicado con la ecuación (2).

4.8. MODELO MATEMÁTICO DE REGRESIÓN

Se puede comprender la relación de dos o más variables y relacionarse mediante ecuaciones, una variable en relación con otra variable se denomina regresión lineal y una variable en relación con varias variables se denomina regresión múltiple.

La regresión se define como un procedimiento mediante el cual se trata de determinar si existe o no relación de dependencia entre dos o más variables. Es decir, conociendo los valores de una variable independiente, se trata de estimar los valores, de una o más variables dependientes. La regresión en forma gráfica, trata de lograr que una dispersión de las frecuencias sea ajustada a una línea recta o curva.

Coefficiente de Regresión. Indica el número de unidades en que se modifica la variable dependiente "Y" por efecto del cambio de la variable independiente "X" o viceversa en una unidad de medida.

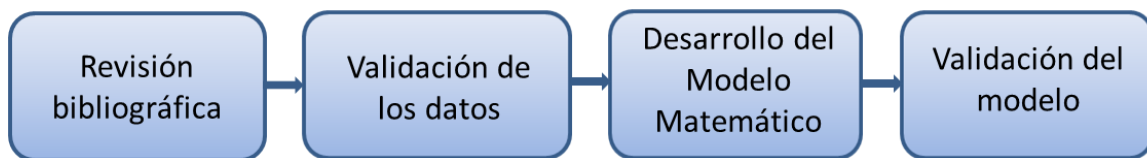
Clases de coeficiente de Regresión. El coeficiente de regresión puede ser: Positivo, Negativo y Nulo. Es positivo cuando las variaciones de la variable independiente X son directamente proporcionales a las variaciones de la variable dependiente "Y"; es negativo, cuando las variaciones de la variable independiente "X" son inversamente proporcionales a las variaciones de las variables dependientes "Y" y es nulo o cero, cuando entre las variables dependientes "Y" e independientes "X" no existen relación alguna.

7. METODOLOGÍA

Con el objeto de encontrar un modelo para el cálculo de eficiencia aplicable a las calderas de Servicios Industriales de Balance, en donde se consideró el efecto que genera los diferentes desvíos de gases alternos de refinería a la red de gas combustible, se estudiaron las diferentes variables físicas del proceso de intercambio de calor ocurridos en la caldera para producir el vapor y los componentes del gas combustible de carga con su incidencia en las eficiencias de las calderas.

Se escogió como caso de estudio la caldera SB-2952, por ser el generador de vapor que presentaba las mejores condiciones de operación, mantenimiento y confiabilidad en las mediciones de los datos de las variables. Con el análisis realizado y aplicando técnicas numéricas se obtuvo el modelo matemático de cálculo de eficiencia, el cual fue validado con los históricos de la planta comparando la eficiencia registradas con las obtenidas en el modelo y también con la las eficiencias arrojadas en el sistema de control distribuido (DCS) de las calderas en el proceso en línea. Posteriormente se desarrolló una herramienta para el cálculo de eficiencia de las calderas. La figura 13 presenta las etapas de la metodología utilizada.

Figura 13. Metodología utilizada



5.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una revisión bibliográfica sobre los criterios necesarios para determinar la eficiencia térmica de una caldera acuotubular. Se estudiaron conceptos sobre las características de la combustión, poder calorífico inferior y superior, composición del gas, índice de Wobbe, aire teórico, temperatura adiabática de llama, pérdidas de los diferentes elementos y eficiencia. [3].

5.2. VALIDACIÓN DE LOS DATOS

Durante esta etapa se realizó una validación de los datos del proceso de combustión de la caldera, principales variables operativas como temperaturas de entrada de aire y de los gases de combustión en los diferentes puntos de intercambio de calor, temperatura de entrada de agua a la caldera, temperatura de la salida de vapor, el flujo de gas, el flujo de vapor, la composición del gas combustible y el poder calorífico del gas; durante un periodo de tiempo de doce meses, información que fue recopilada desde enero de 2015 hasta diciembre de 2015. Estos datos fueron tabulados estadísticamente para determinar incidencias del proceso y los impactos que estas variables generan en la eficiencia de la caldera.

En el proceso de validación de los datos estadísticos inicialmente se realizó una depuración de los mismos, con la finalidad de identificar datos errados o existencia de duplicados, para así evitar fallas en la ejecución de los programas y tener una información más confiable y veraz. Con la información obtenida sobre cada una de las variables objeto de estudio, se realizó el análisis estadístico univariante, utilizando las principales medidas de tendencia central y variabilidad, y multivariantes, para determinar la relación existente entre las distintas variables.

Inicialmente se realizó un análisis previo y exploratorio de los datos de las variables objetos de estudio con el propósito de eliminar inconsistencias observadas, detectar errores de digitación, evaluar la magnitud de datos ausentes y la presencia de valores atípicos ya sea por estar la caldera en mantenimiento o algún instrumento de medición en falla. Esta revisión permitió eliminar el 12% de los datos que presentaban algunas de las características mencionadas, quedando conformada la base de datos de estudio por 14 variables físicas del proceso de combustión de la caldera, 18 variables de la composición del gas combustible que se quema y 232 observaciones. En el anexo 1 se presenta los datos de las observaciones estudiadas en el presente documento, debe consultar la tabla 6 para identificar la representación de cada variable.

A nivel univariante se presentaron los principales estadísticos descriptivos: media, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación (CV), mínimo, máximo y rango, así como los histogramas de frecuencia y diagramas de cajas para las variables:

- Variables físicas de la caldera: Temperatura de aire al calentador, temperatura de gases de chimenea, temperatura de agua del economizador, flujo de gas, porcentaje de exceso de oxígeno y poder calorífico. Datos que fueron tomados del sistema de control distribuido (DCS) de las calderas y el poder calorífico fue medido en el laboratorio central de la refinería de Barrancabermeja mediante el procedimiento de norma ASTM D3588-98.
- Variables de composición del gas: Metano, etano, etileno, propano, propileno, n-butano, isobutano, isopentano, hidrógeno, total olefinas. Datos que fueron tomados de las mediciones de cromatografía del gas combustible de entrada a la caldera, cromatografías que fueron realizadas en el laboratorio principal de la refinería de Barrancabermeja bajo el procedimiento de norma ASTM D1945-14, utilizando el cromatógrafo de gases modelo 7890A de marca Agilent con serial US11451020.

Para la prueba de normalidad del conjunto de datos estudiados se utilizó la técnica gráfica de “Normalidad de los cuantiles”. Este gráfico probabilístico normal permitió comparar la distribución empírica de los datos con la distribución normal. La construcción del gráfico de probabilidad normal se realizó a través de los cuantiles de la normal estándar, de forma que se aceptó la hipótesis de normalidad de los datos, siempre que los puntos en el gráfico tuvieron un comportamiento “suficientemente rectilíneo”.

5.3 DESARROLLO DEL MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA

Para la obtención del modelo se relacionaron las variables que presentaban mayor correlación (multicolinealidad) para facilitar el modelo, quedando la base de datos

del estudio en 5 variables físicas del proceso y 10 variables de composición del gas.

Para el desarrollo de las correlaciones necesarias para obtener el modelo de la eficiencia de la caldera, se partió de un modelo de regresión lineal generalizado de la forma [9]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (13)$$

Donde Y representa la matriz de los datos calculados de la eficiencia, X_1 representa la matriz de la variable número 1 y X_2 la matriz de la variable número 2 de los datos registrados y los términos β_0 a β_k son parámetros desconocidos y que se calculan mediante el método de mínimos cuadrados.

Para elegir el modelo más adecuado, se evaluaron las correlaciones de las diferentes variables donde se tuvo en cuenta el efecto simultáneo de las variables más influyentes del proceso de combustión y transferencia de calor sobre la eficiencia de la caldera. Se realizó un análisis estadístico de los coeficientes generados en Excel, en donde se utilizaron los criterios del valor del cuadrado del coeficiente de correlación R^2 , de multicolinealidad para determinar el grado en el que el efecto de una variable puede ser prevista por las otras variables del proceso, y la prueba estadística "P", con lo que se evaluaba si es o no estadísticamente significativa la mejora que experimenta el sumatorio de residuales al cuadrado, al pasar de una ecuación de menos parámetros a otra de más, con un nivel de confianza del 95%, de esta forma si $P < 0.05$ se aceptó el valor del nuevo modelo y si $P > 0.05$ se continuó con el modelo inicial [8] y la comparación entre los datos generados por el modelo y los obtenidos en el proceso de la caldera.

La construcción del modelo matemático se realizó a través de la herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel en conjunto con el software Rcommander, lo cual facilitó la evaluación ágil del sistema de ecuaciones.

De acuerdo al modelo estudiado y dado en la ecuación (12), se desarrollaron las correlaciones necesarias para obtener la eficiencia de la caldera el cual se dividió en tres etapas:

- Primero se escogió el modelo de regresión lineal generalizado para el cálculo del poder calorífico a partir de los componentes del gas, determinándose así cuáles son los componentes de mayor impacto en esta variable;
- después se escogió el modelo de regresión lineal para el cálculo de la eficiencia teniendo en cuenta sólo las variables físicas y
- finalmente se integraron estos dos modelos en uno sólo para desarrollar un modelo de cálculo de eficiencia donde se tiene en cuenta la composición del gas y las variables físicas conjuntamente. En la tabla 6 se relacionan las variables que se utilizaron para determinar los modelos y cómo se representan.

Tabla 6. Variables utilizadas para la determinación del Modelo

Representación	Variable	Representación	Variable
C ₁	METANO % mol	X ₁	PODER CALORIFICO
C ₂	ETANO % mol	X ₂	TEMPERATURA DE AIRE AL CALENTADOR
C ₃	ETILENO % mol	X ₃	TEMPERATURA DE AIRE DEL CALENTADOR
C ₄	PROPANO % mol	X ₄	TEMPERATURA DE GASES ENTRADA ECONOMIZADOR
C ₅	PROPILENO % mol	X ₅	TEMPERATURA DE GASES SALIDA ECONOMIZADOR
C ₆	N-BUTANO % mol	X ₆	TEMPERATURA DE GASES A CHIMENEA
C ₇	ISO-BUTANO % mol	X ₇	TEMPERATURA DEL AGUA AL ECONOMIZADOR
C ₈	ISO-PENTANO % mol	X ₈	TEMPERATURA DEL AGUA DE ECONOMIZADOR
C ₉	HIDROGENO % mol	X ₉	TEMPERATURA DEL VAPOR GENERADO
C ₁₀	OXIGENO % mol	X ₁₀	FLUJO AGUA DE ALIMENTACION
C ₁₁	NITROGENO % mol	X ₁₁	FLUJO VAPOR PROD. DE 600 #
C ₁₂	MONOXIDO DE CARBONO % mol	X ₁₂	FLUJO DE GAS COMBUSTIBLE
C ₁₃	DIOXIDO DE CARBONO % mol	X ₁₃	FLUJO AIRE DE ENTRADA
C ₁₄	H ₂ S % mol	X ₁₄	EXCESO DE OXIGENO
C ₁₅	TOTAL OLEFINAS % mol	Y	EFICIENCIA

En cada una de dichas etapas se realizaron ajustes con modelos de Regresión Lineal valorando la significancia de los coeficientes, la bondad del ajuste y la magnitud del error de estimación, para evaluarlos y así seleccionar el modelo que mejor se ajustó al presente caso estudio.

5.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo se utilizaron diferentes procedimientos estadísticos mediante los supuestos normalmente aplicados en los métodos de regresión como fueron el supuesto de linealidad, supuesto de homocedasticidad, supuesto de residuos constantes y el supuesto de normalidad de los residuos; los cuales fueron presentados con los gráficos correspondientes para cada una de las variables explicativas del modelo. Para la construcción de los gráficos se utilizaron los datos de las variables de la caldera de los históricos que se tienen del año 2015 y los proyectados por el modelo.

Posteriormente se realizó una serie de verificaciones en las condiciones reales de operación de la unidad, comprobándose que efectivamente las eficiencias obtenidas en el modelo son consistentes con las reales. Después se incorporó dicho modelo en la herramienta de software Aspen Hysys para simular el proceso y se realizó el modelamiento para el cálculo de eficiencia de las calderas de servicios industriales de la unidad de Balance.

Con el modelo escogido se simularon casos comunes de operación en función de las mezclas de gases alternos que se desvían por oportunidad a la red de gas combustible de la unidad de Balance y los cambios de cambios de composición en el gas combustible, verificando así las variaciones que ocasionan estos desvíos en las eficiencias de las calderas .

La simulación del proceso de combustión se realizó mediante modelos químicos y termodinámicos usando el software comercial Aspen Hysys 8.8; se seleccionó la ecuación de estado Peng Robinson por ser un paquete de fluidos muy adecuado de acuerdo a su naturaleza para aplicaciones en gas y petróleo, el cual garantiza la precisión de la misma para una gran variedad de sistemas en un amplio rango de condiciones con un alto grado de eficiencia y confiabilidad.

En la figura 14 se muestra el esquema utilizado en la simulación. Se utilizó como cámara de combustión un reactor tipo "batch". Las corrientes de gas y aire son llevadas a un reactor de conversión el cual se encuentra a presión atmosférica, luego pasa por una serie de intercambiadores de calor donde se simula el recorrido de los gases de combustión por el supercalentador, tambor (integra el hogar, tambor de vapor y lodos como un solo intercambiador), economizador, calentador de aire, hasta salir por la chimenea y de esta manera obtener los productos de la combustión. También se simula el recorrido del agua por el economizador, tambor y supercalentador donde sale en forma de vapor seco y el recorrido del aire por el pre-calentador y calentador de aire hasta entrar a la cámara de combustión. Las condiciones de los flujos de entrada al proceso son mostradas en la tabla 6. Es importante tener en cuenta que dicha simulación es sólo con enfoque en cálculo de eficiencia y no permite realizar cálculos de la energía de radiación y convección de forma independiente, puesto que no se incluyó la zona del hogar por separado.

Se realizaron varias simulaciones a condiciones reales de operación, obteniéndose los resultados de eficiencias correspondientes al proceso, con lo cual se verificó la efectividad del programa y el modelo.

Figura 14. Simulación del proceso de generación de vapor de la caldera en Aspen Hysys.

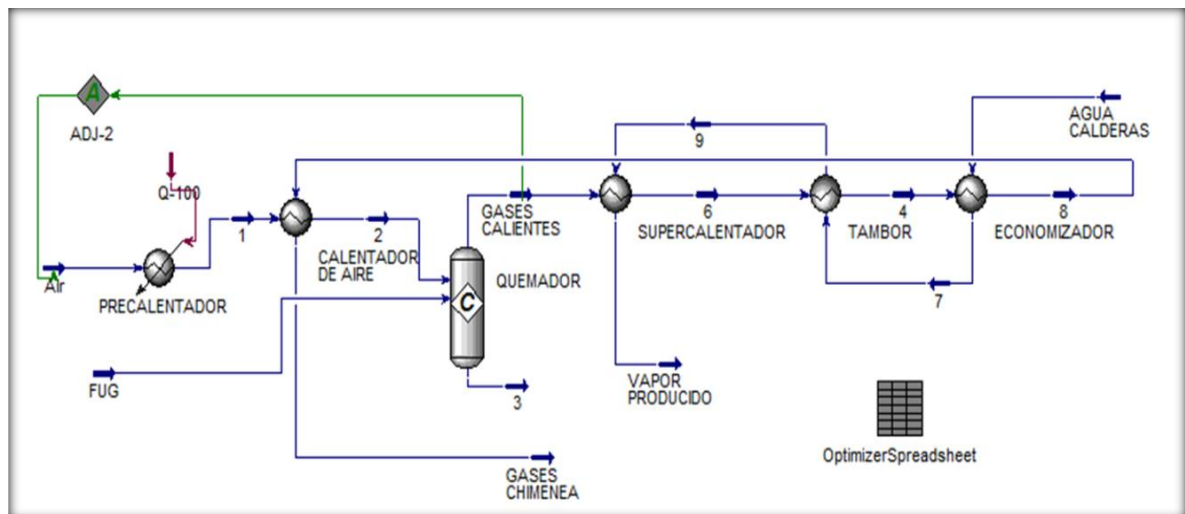
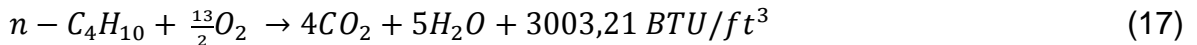
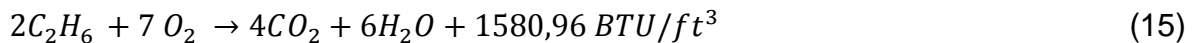


Tabla 6. Condiciones de los flujos de entrada al proceso.

Corriente	Temperatura (°F)	Presión (Psig)
Gas Combustible	90	14,7
Aire al pre-calentador	90	14,7
Agua al economizador	265	790

A continuación, se muestran las reacciones químicas linealmente independientes que se dan en el reactor de conversión con su respectivo calor de combustión para los compuestos más representativos del gas combustible [10]:



5.5. BENEFICIO POR AHORRO POTENCIAL DE COMBUSTIBLE

Esta etapa consistió en evaluar el impacto en el consumo de combustible de las calderas cuando no se realizan los ajustes requeridos en el exceso de oxígeno, con lo que se garantiza la adecuada estequiometría de la combustión. Teniendo en cuenta que cada vez que hay un cambio en la composición del gas, afecta el poder calorífico y a su vez las reacciones de combustión.

Para estimar el beneficio se utilizó la figura (12), para calcular el ahorro potencial de combustible con relación al exceso de oxígeno y se proyectó dicho ahorro a un año de operación de la caldera.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

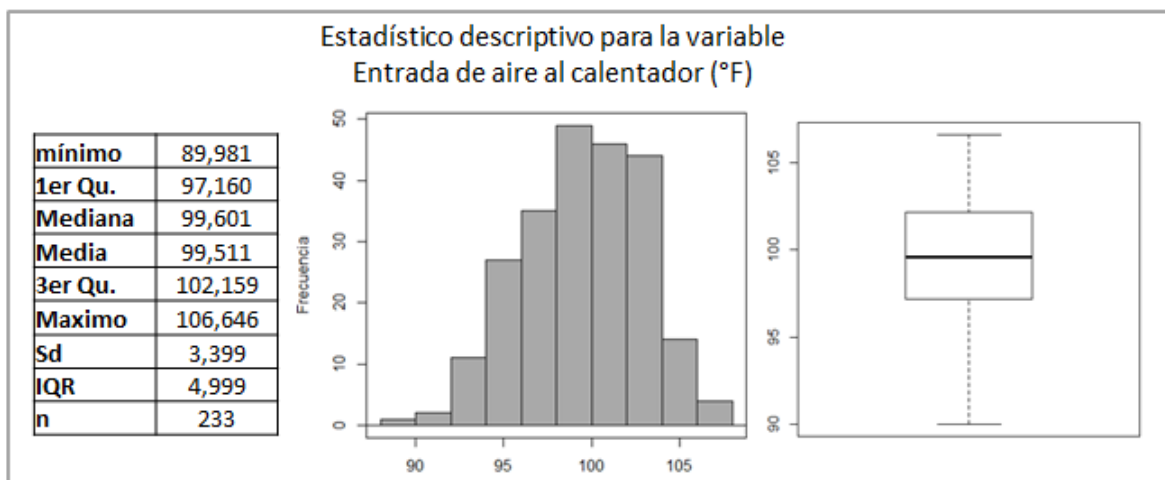
Este capítulo presenta los resultados obtenidos de los análisis efectuados a los datos y las herramientas estadísticas utilizadas en la evaluación de los mismos.

6.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

Las figuras 15 a la 31 presentan las variables objeto de estudio, el extremo izquierdo muestra las principales medidas descriptivas de centralidad y variabilidad; la parte central el diagrama de frecuencias y al lado derecho el diagrama de cajas.

6.1.1. Variable Temperatura de aire al calentador. Esta variable representa en el proceso la temperatura del aire después de pasar por el pre-calentador y antes de entrar al calentador de aire de la chimenea de la caldera. La figura 15 presenta el comportamiento de dicha variable.

Figura 15. Estadístico descriptivo para la variable temperatura de entrada de aire al calentador.

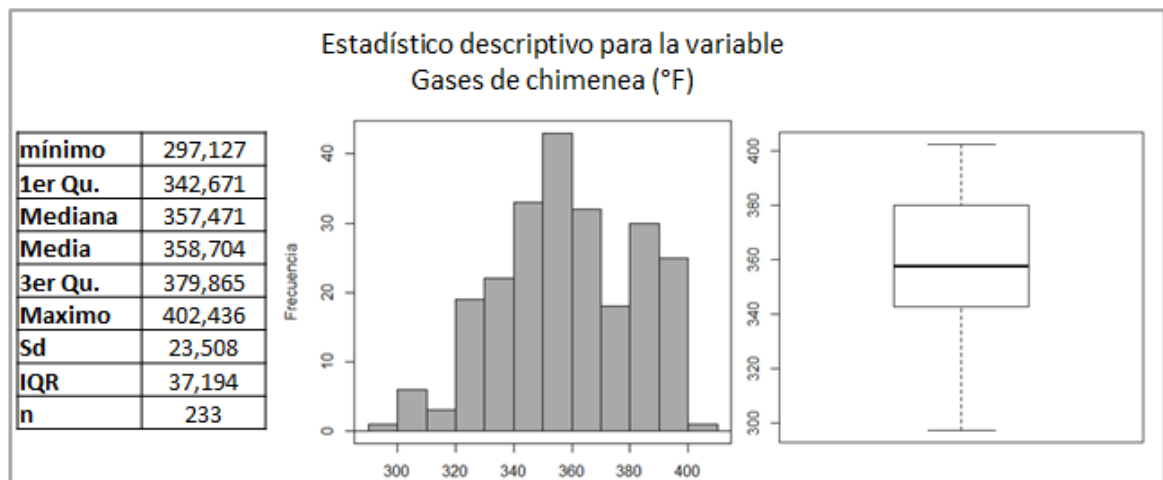


El estadístico descriptivo muestra que la media de la temperatura del aire de entrada al calentador es 99.51 °F, con desviación estándar de 3.39, la mayor parte de los datos se encuentran entre 97.16 °F y 102.16 °F, la variable toma valores

entre un mínimo de 89.98 °F y un máximo de 106.64 °F, el rango intercuartílico (IQR) es de 4.99 °F.

6.1.2. Variable Temperatura de gases de chimenea. Esta variable representa en el proceso la temperatura de los gases de combustión a la salida de la chimenea de la caldera. La figura 16 presenta el comportamiento de dicha variable.

Figura 16. Estadístico descriptivo para la variable temperatura de gases de chimenea.



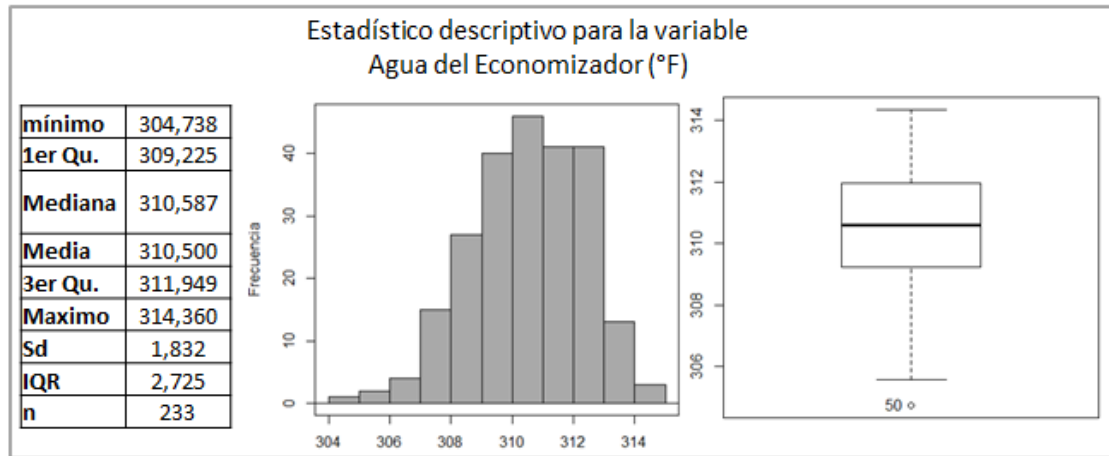
El estadístico descriptivo muestra que la media de la temperatura de gases de chimenea es 358.70 °F, con desviación estándar de 23.50, la mayor parte de los datos se encuentran entre 342.67 °F y 379.86 °F, la variable toma valores entre un mínimo de 297.12 °F y un máximo de 402.43 °F, el rango intercuartílico es de 37.19.

6.1.3. Temperatura de agua del economizador. Esta variable representa en el proceso la temperatura del agua de salida del economizador y que entra al tambor de vapor de la caldera. La figura 17 presenta el comportamiento de dicha variable.

El estadístico descriptivo muestra que la media de la temperatura de agua del economizador es 310.5 °F, con desviación estándar de 1.83, la mayor parte de los

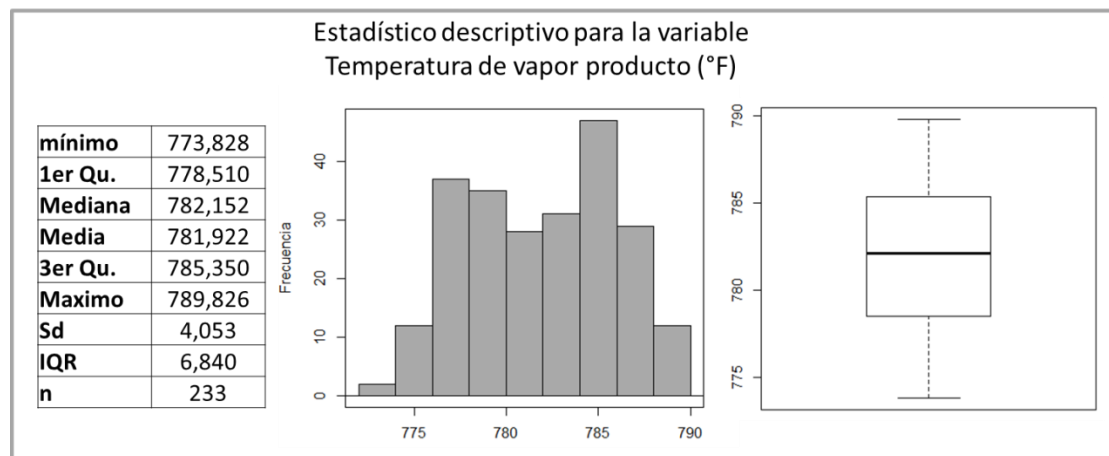
datos se encuentran entre 309.22 °F y 311.95 °F, la variable toma valores entre un mínimo de 304.74 °F y un máximo de 314.36 °F, el rango intercuartílico es de 2.72.

Figura 17. Estadístico descriptivo para la variable temperatura de agua del economizador.



6.1.4. Variable Temperatura del vapor Producto. Esta variable representa en el proceso la temperatura del vapor que se produce en la caldera y que sale por el supercalentador. La figura 18 presenta el comportamiento de dicha variable.

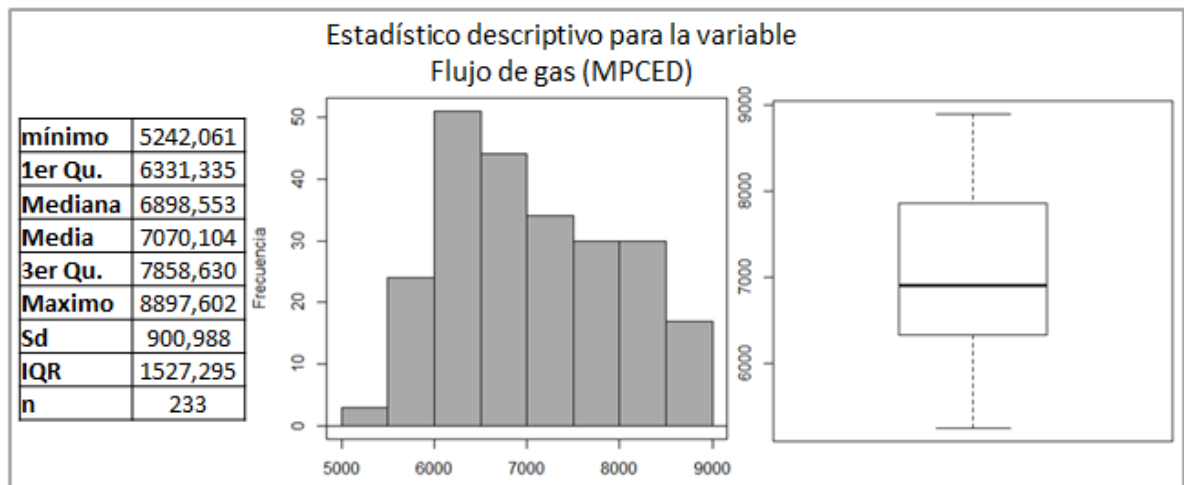
Figura 18. Estadístico descriptivo para la variable temperatura de vapor producto.



El estadístico descriptivo muestra que la media de la temperatura del vapor producto es 781.92 °F, con desviación estándar de 4.05, la mayor parte de los datos se encuentran entre 778.51 °F y 785.35 °F, la variable toma valores entre un mínimo de 773.83 °F y un máximo de 789.83 °F, el rango intercuartílico es de 6.84.

6.1.5. Variable Flujo de gas combustible. Esta variable representa en el proceso el flujo de gas que entra a los quemadores de la caldera. La figura 19 presenta el comportamiento de dicha variable.

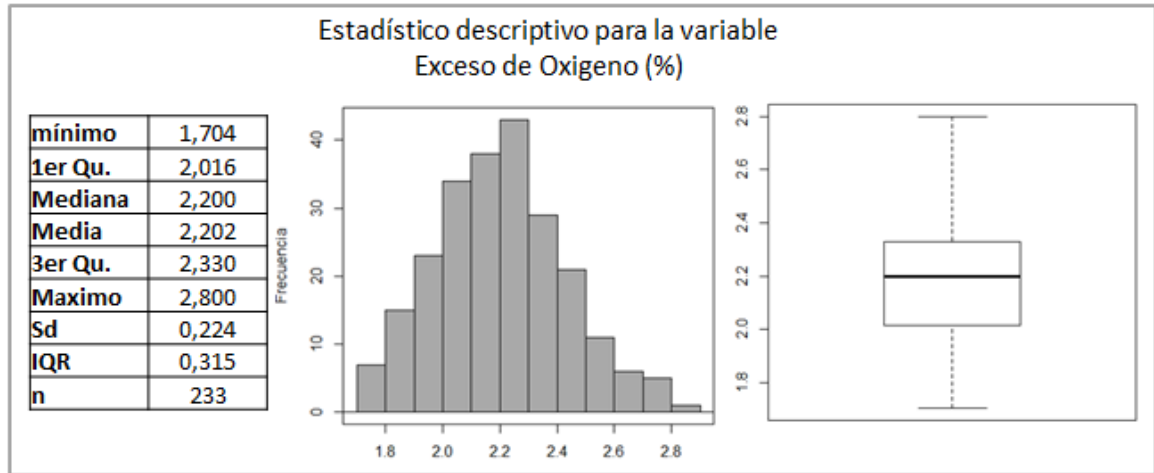
Figura 19. Estadístico descriptivo para la variable flujo de gas combustible.



El estadístico descriptivo muestra que la media del flujo de gas es 7070.10 MPCED (Millones de pies cúbicos estándar día), con desviación estándar de 900.99, la mayor parte de los datos se encuentran entre 6331.33 MPCED y 6898.55 MPCED, la variable toma valores entre un mínimo de 5242 MPCED y un máximo de 8897.60 MPCED, el rango intercuartílico es de 1527.29.

6.1.6. Variable Exceso de Oxígeno. Esta variable representa en el proceso la concentración neta de O₂ en los gases de combustión de la caldera que salen por la chimenea. La figura 20 presenta el comportamiento de dicha variable.

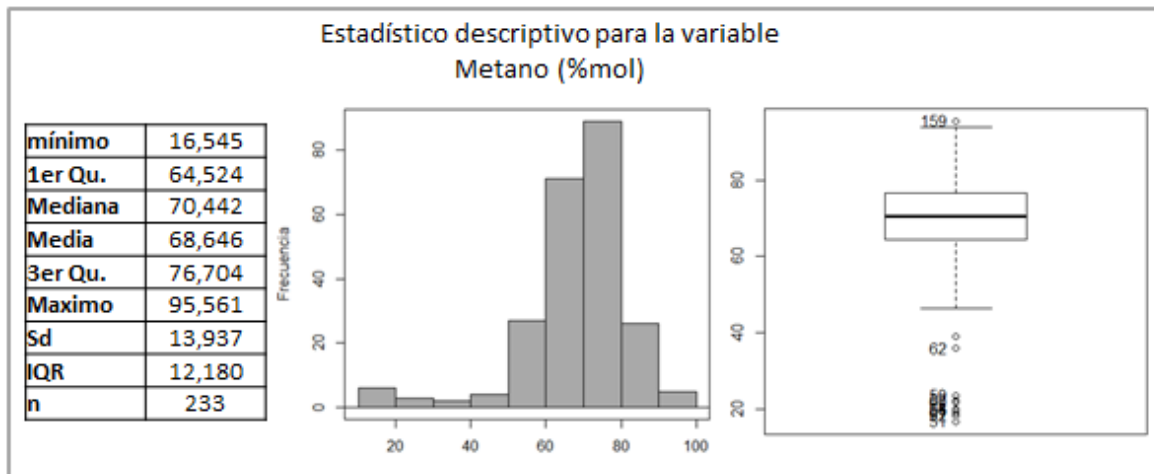
Figura 20. Estadístico descriptivo para la variable Exceso de oxígeno.



El estadístico descriptivo muestra que la media del exceso de oxígeno es de 2.2 %, con desviación estándar de 0.22, la mayor parte de los datos se encuentran entre 2.02 % y 2.33 %, la variable toma valores entre un mínimo de 1.70 % y un máximo de 2.8 %, el rango intercuartílico es de 0.31.

6.1.7. Variable Metano. Esta variable representa en el proceso la concentración de metano en el gas de suministro a la caldera. La figura 21 presenta el comportamiento de dicha variable.

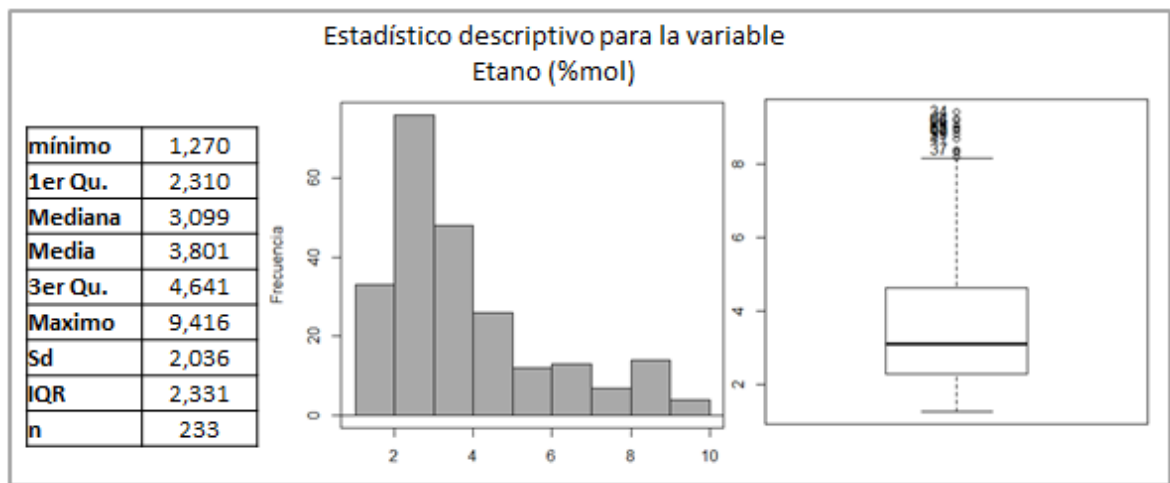
Figura 21. Estadístico descriptivo para la variable Metano



El estadístico descriptivo muestra que la media del metano es de 68.64 %mol, con desviación estándar de 13.94, la mayor parte de los datos se encuentran entre 64.52 %mol y 76.70 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 16.54%mol y un máximo de 95.56%, el rango intercuartílico es de 12.18.

6.1.8. Variable Etano. Esta variable representa en el proceso la concentración de etano en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 22 presenta el comportamiento de dicha variable.

Figura 22. Estadístico descriptivo para la variable Etano.

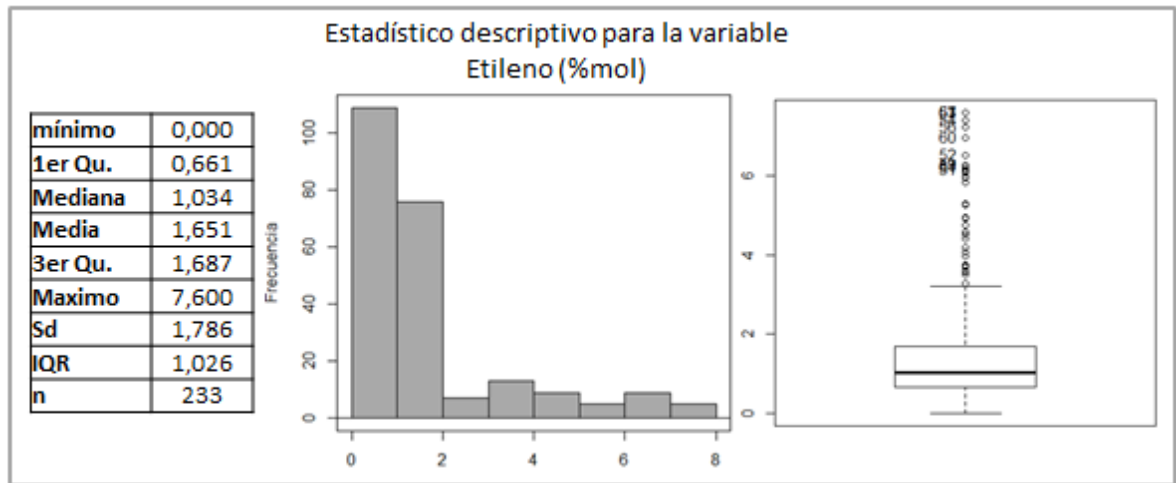


El estadístico descriptivo muestra que la media del etano es de 3.80 %mol, con desviación estándar de 2.04, la mayor parte de los datos se encuentran entre 2.31 %mol y 4.64 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 1.27%mol y un máximo de 9.41%, el rango intercuartílico es de 2.33.

6.1.9 Variable Etileno. Esta variable representa en el proceso la concentración de etileno en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 23 presenta el comportamiento de dicha variable.

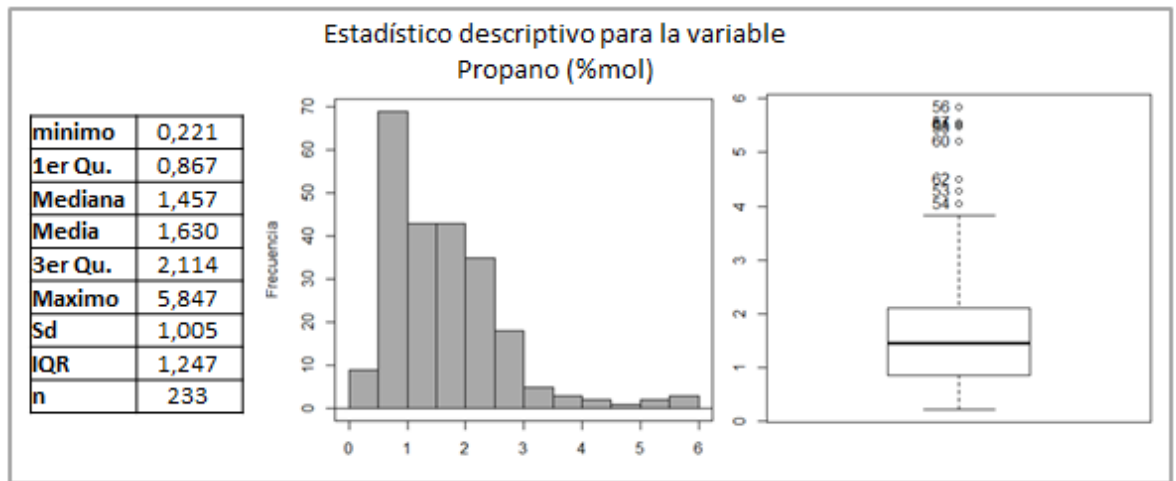
El estadístico descriptivo muestra que la media del etileno es de 1.65 %mol, con desviación estándar de 1.79, la mayor parte de los datos se encuentran entre 0.66 %mol y 1.69 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 0.0 %mol y un máximo de 7.60 %mol, el rango intercuartílico es de 1.03.

Figura 23. Estadístico descriptivo para la variable Etileno.



6.1.10 Variable Propano. Esta variable representa en el proceso la concentración de propano en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 24 presenta el comportamiento de dicha variable.

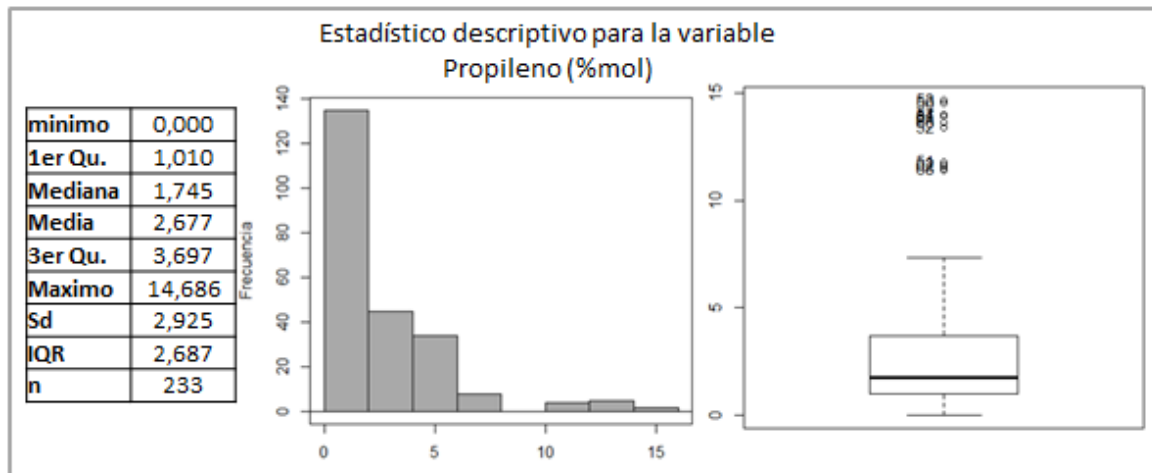
Figura 24. Estadístico descriptivo para la variable Propano.



El estadístico descriptivo muestra que la media del propano es de 1.63 %mol, con desviación estándar de 1, la mayor parte de los datos se encuentran entre 0.87 %mol y 2.11 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 0.22 %mol y un máximo de 5.85 %mol, el rango intercuartílico es de 1.25.

6.1.11 Variable Propileno. Esta variable representa en el proceso la concentración de propileno en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 25 presenta el comportamiento de dicha variable.

Figura 25. Estadístico descriptivo para la variable Propileno.

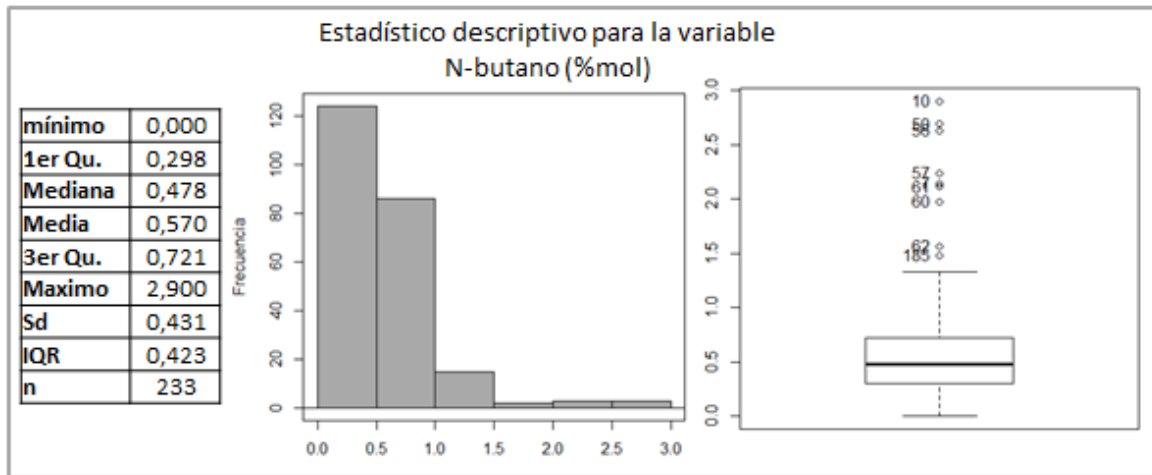


El estadístico descriptivo muestra que la media del propileno es de 2.67 %mol, con desviación estándar de 2.92, la mayor parte de los datos se encuentran entre 1.01 %mol y 3.7 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 0 %mol y un máximo de 14.69 %mol, el rango intercuartílico es de 2.69.

6.1.12 Variable n-butano. Esta variable representa en el proceso la concentración de n-butanos en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 26 presenta el comportamiento de dicha variable.

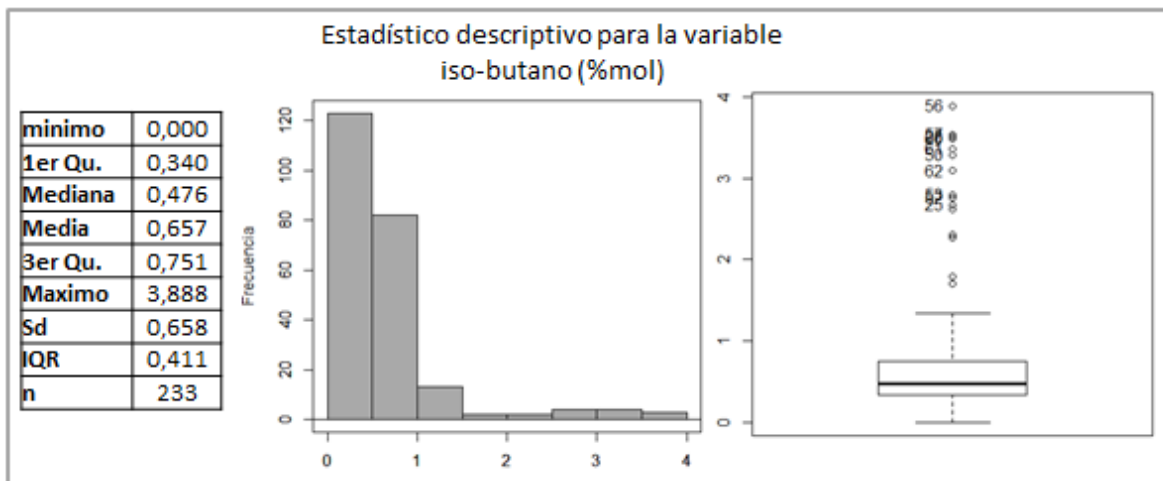
El estadístico descriptivo muestra que la media del n-butano es de 0.57 %mol, con desviación estándar de 0.43, la mayor parte de los datos se encuentran entre 0.298 %mol y 0.72 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 0 %mol y un máximo de 2.9 %mol, el rango intercuartílico es de 0.42.

Figura 26. Estadístico descriptivo para la variable n-butano



6.1.13 Variable isobutano. Esta variable representa en el proceso la concentración de isobutano en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 27 presenta el comportamiento de dicha variable.

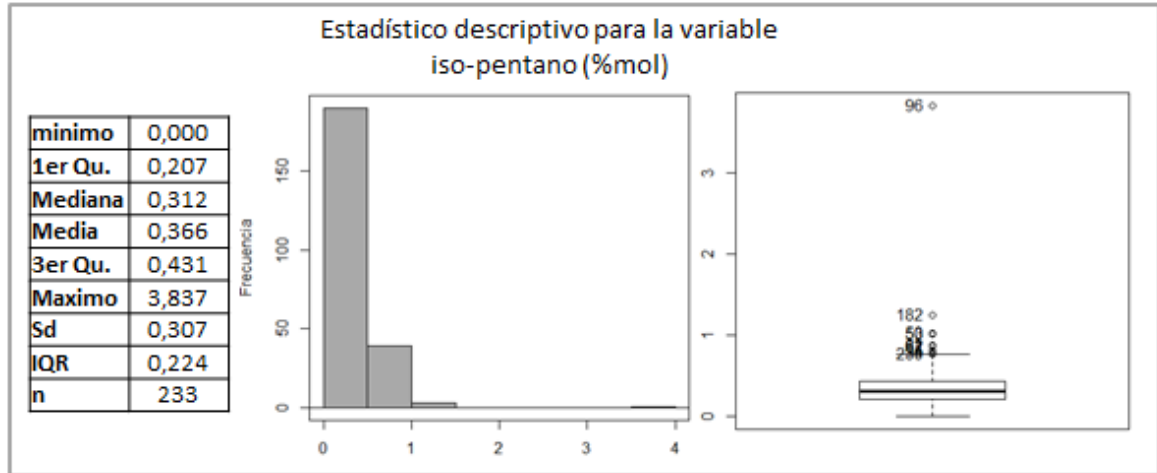
Figura 27. Estadístico descriptivo para la variable isobutano



El estadístico descriptivo muestra que la media del isobutano es de 0.657 %mol, con desviación estándar de 0.658, la mayor parte de los datos se encuentran entre 0.34 %mol y 0.75 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 0 %mol y un máximo de 3.89 %mol, el rango intercuartílico es de 0.41.

6.1.14 Variable isopentano. Esta variable representa en el proceso la concentración de isopentano en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 28 presenta el comportamiento de dicha variable.

Figura 28. Estadístico descriptivo para la variable isopentano

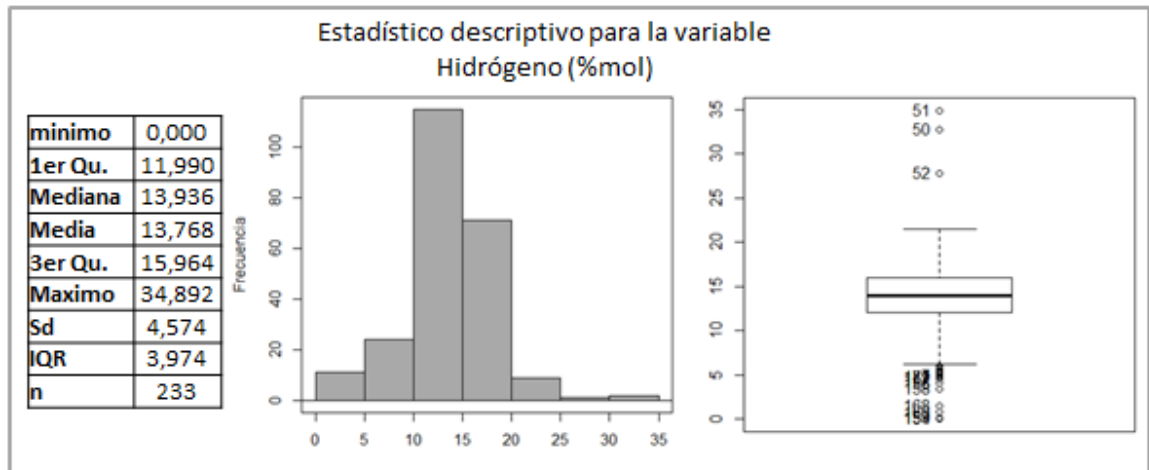


El estadístico descriptivo muestra que la media del isopentano es de 0.37 %mol, con desviación estándar de 0.31, la mayor parte de los datos se encuentran entre 0.21 %mol y 0.43 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 0 %mol y un máximo de 3.84 %mol, el rango intercuartílico es de 0.22.

6.1.15 Variable Hidrógeno. Esta variable representa en el proceso la concentración de hidrógeno en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 29 presenta el comportamiento de dicha variable.

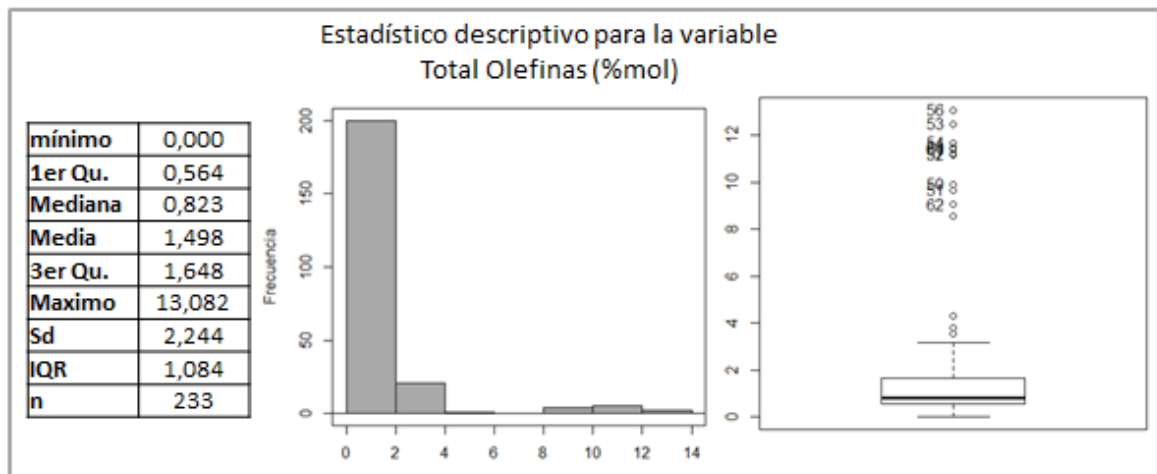
El estadístico descriptivo muestra que la media del hidrógeno es de 13.77 %mol, con desviación estándar de 4.57, la mayor parte de los datos se encuentran entre 11.99 %mol y 15.96 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 0 %mol y un máximo de 34.89 %mol, el rango intercuartílico es de 3.97.

Figura 29. Estadístico descriptivo para la variable hidrógeno



6.1.16 Variable Total Olefinas. Esta variable representa en el proceso la concentración de las olefinas en el gas de entrada a los quemadores de la caldera. La figura 30 presenta el comportamiento de dicha variable.

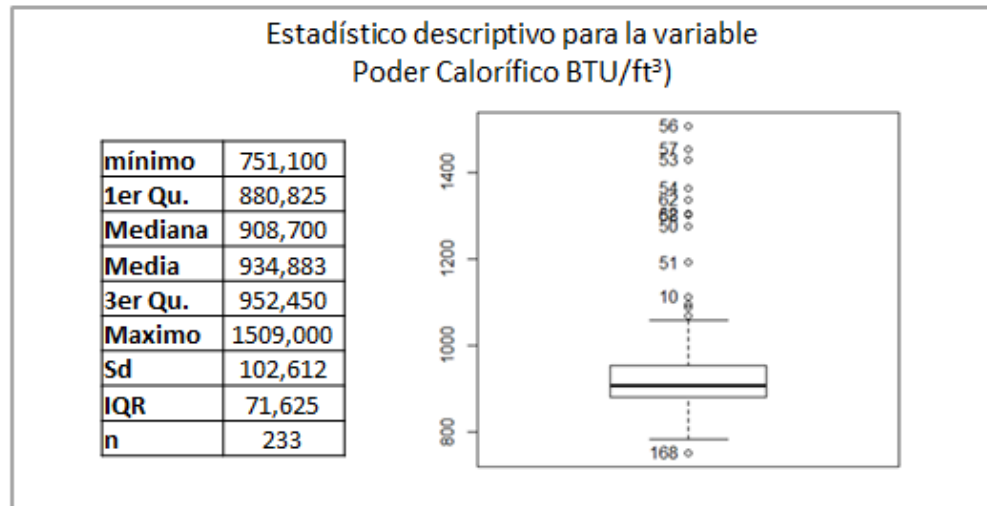
Figura 30. Estadístico descriptivo para la variable Total Olefinas



El estadístico descriptivo muestra que la media del total olefinas es de 1.50 %mol, con desviación estándar de 2.24, la mayor parte de los datos se encuentran entre 0.56 %mol y 1.65 %mol, la variable toma valores entre un mínimo de 0 %mol y un máximo de 13.08 %mol, el rango intercuartílico es de 1.08.

6.1.17 Variable Poder calorífico. Esta variable representa la cantidad de energía por unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse la reacción química de oxidación en la caldera, es decir durante el proceso de combustión. La figura 31 presenta el comportamiento de dicha variable.

Figura 31. Estadístico descriptivo para la variable Poder Calorífico

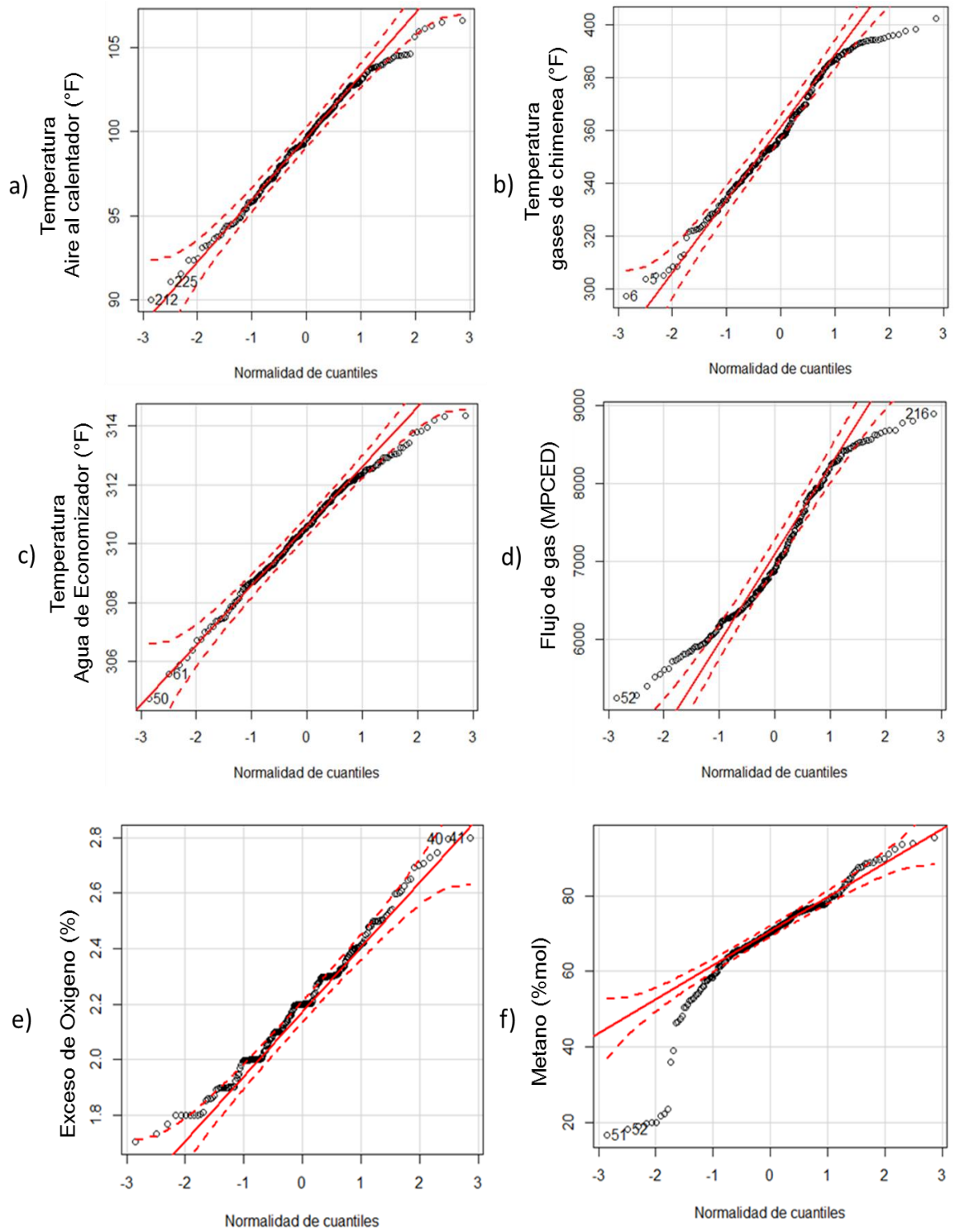


El estadístico descriptivo muestra que la media del Poder Calorífico es de 934.88 BTU/ft³, con desviación estándar de 102.61, la mayor parte de los datos se encuentran entre 880.82 BTU/ft³ y 952.45 BTU/ft³, la variable toma valores entre un mínimo de 751.1 BTU/ft³ y un máximo de 1509 BTU/ft³, el rango intercuartílico es de 72.62.

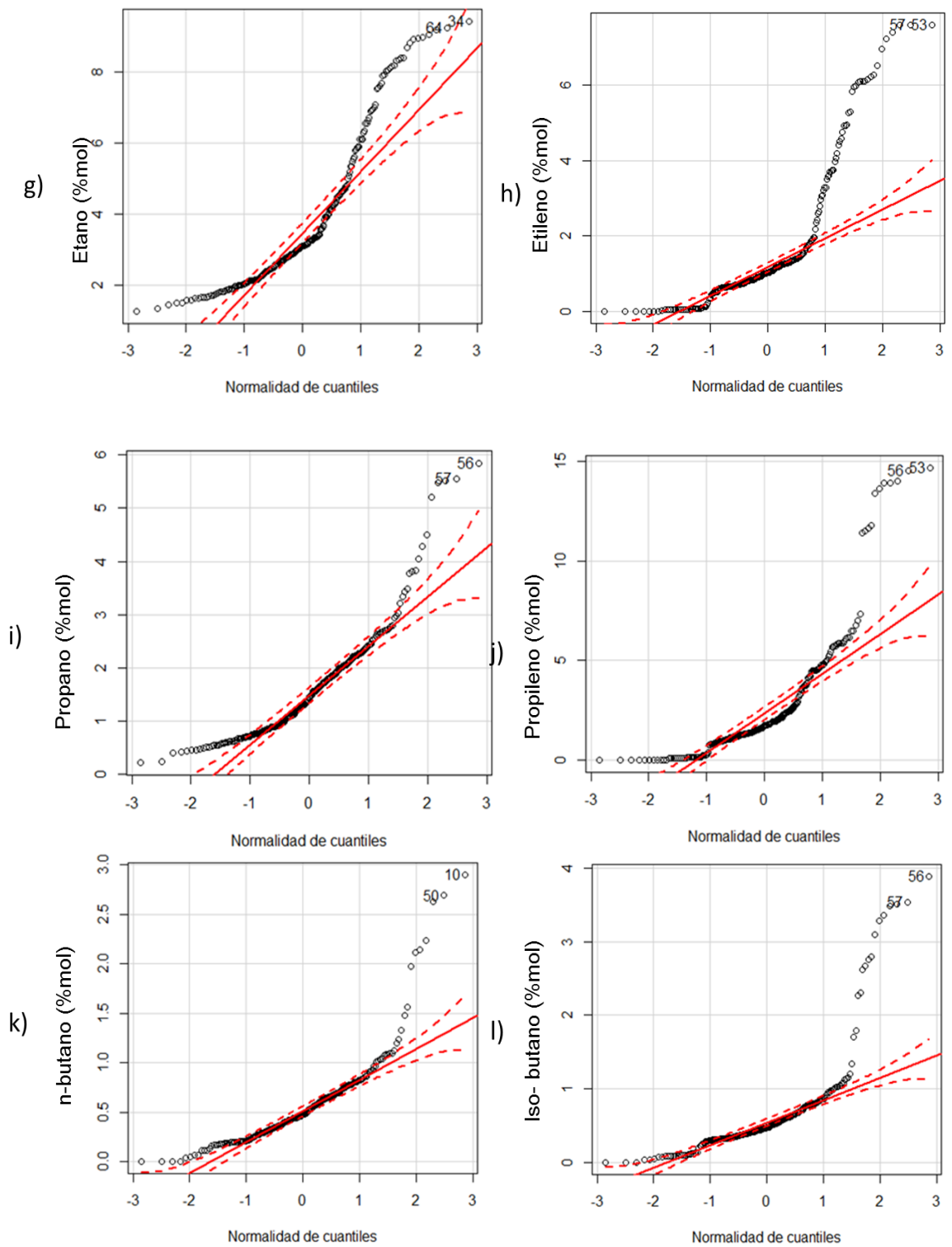
6.2. NORMALIDAD DE LOS CUANTILES

La figura 32 presenta los gráficos de normalidad de los cuantiles de las variables objeto de estudio. La distribución de los cuantiles muestra que la distribución empírica tomada de los datos de las variables es compatible con la distribución normal teórica, puesto que la mayoría de los valores se acercan a la línea recta; es decir que el conjunto de datos objeto de estudio presentan una distribución normal, aceptándose así la veracidad de la información.

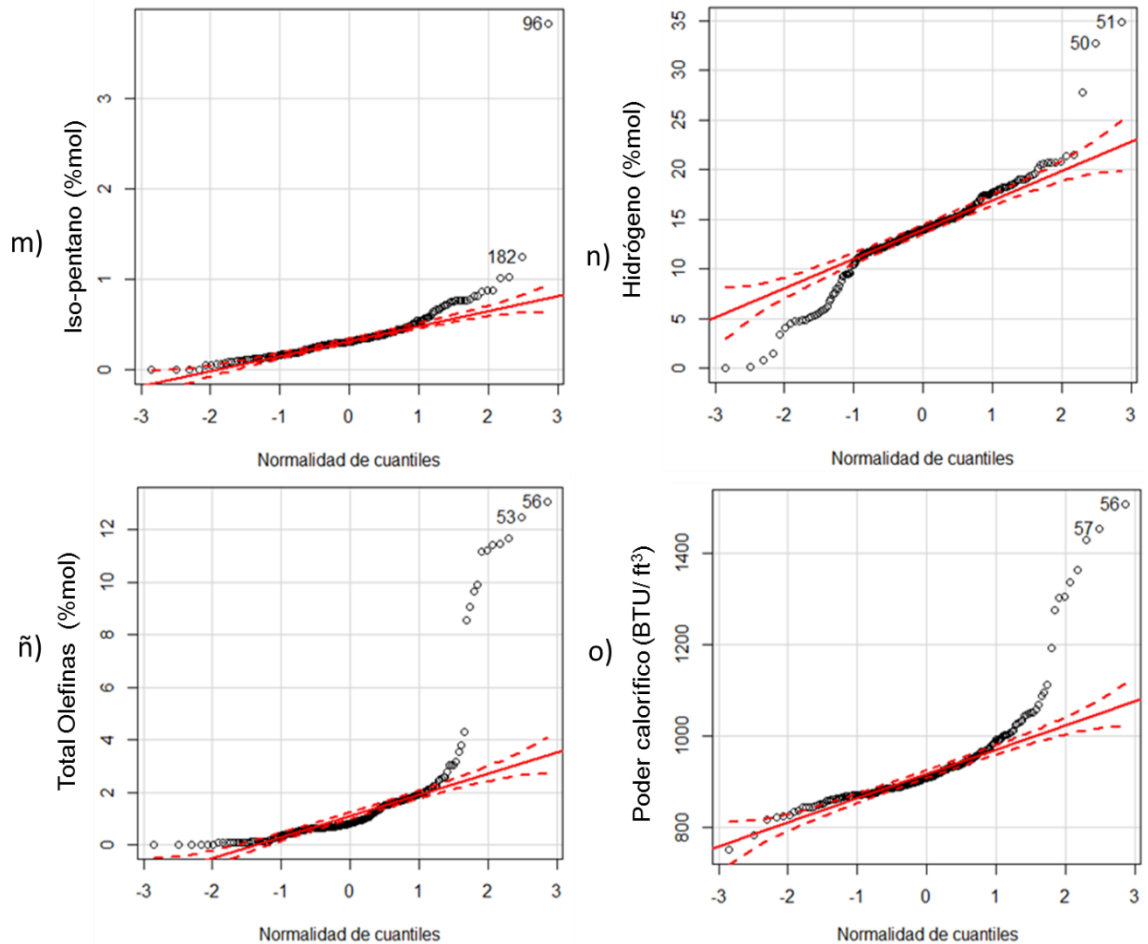
Figura 32. Normalidad de los cuantiles de las variables.



Continuación Figura 32. Normalidad de los cuantiles de las variables.



Continuación figura 32. Normalidad de los cuantiles de las variables.



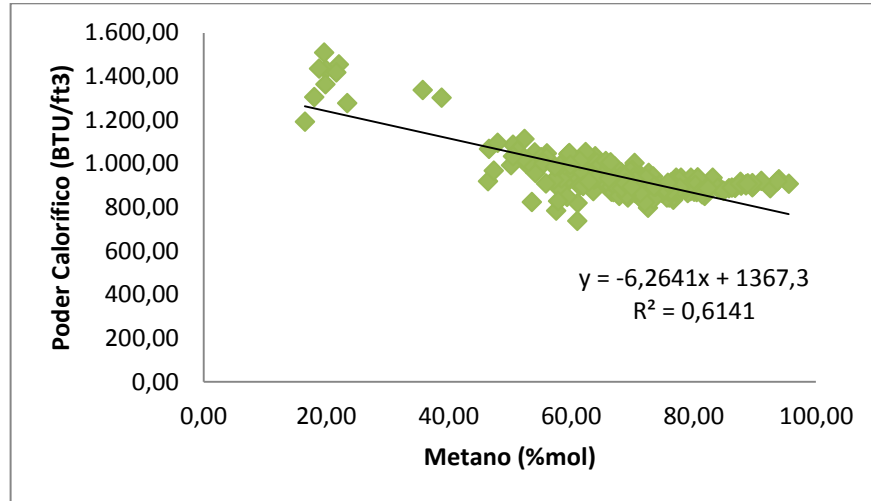
6.3. EVALUACION DE LOS COMPONENTES

Se realizó una evaluación del impacto de la composición del gas sobre el poder calorífico, se calculó el índice de Wobbe teniendo en cuenta la densidad relativa del gas; posteriormente se evaluó el impacto de la composición del gas sobre la eficiencia de la caldera.

6.3.1. Efecto de los componentes del gas combustible sobre el poder calorífico

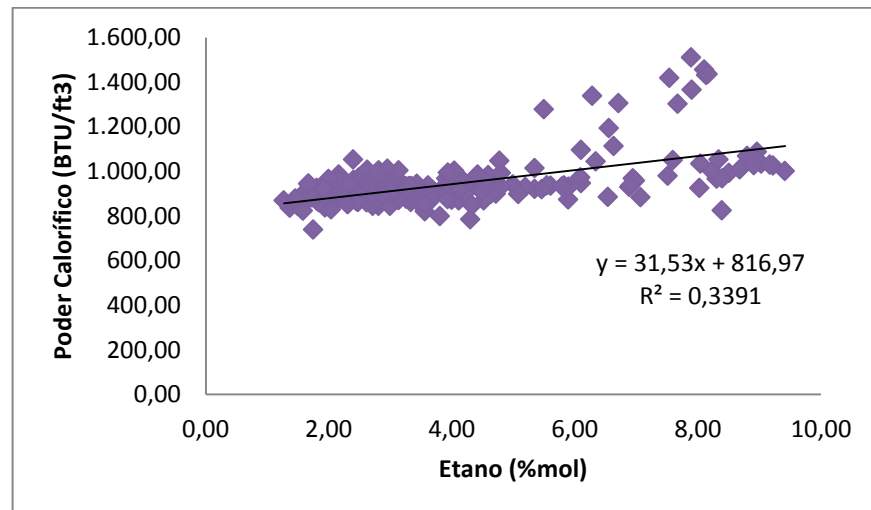
Las figuras 33 a la 42 muestran la variación del poder calorífico inferior (PCI) en relación a los principales componentes del gas combustible utilizado en la caldera.

Figura 33. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de metano



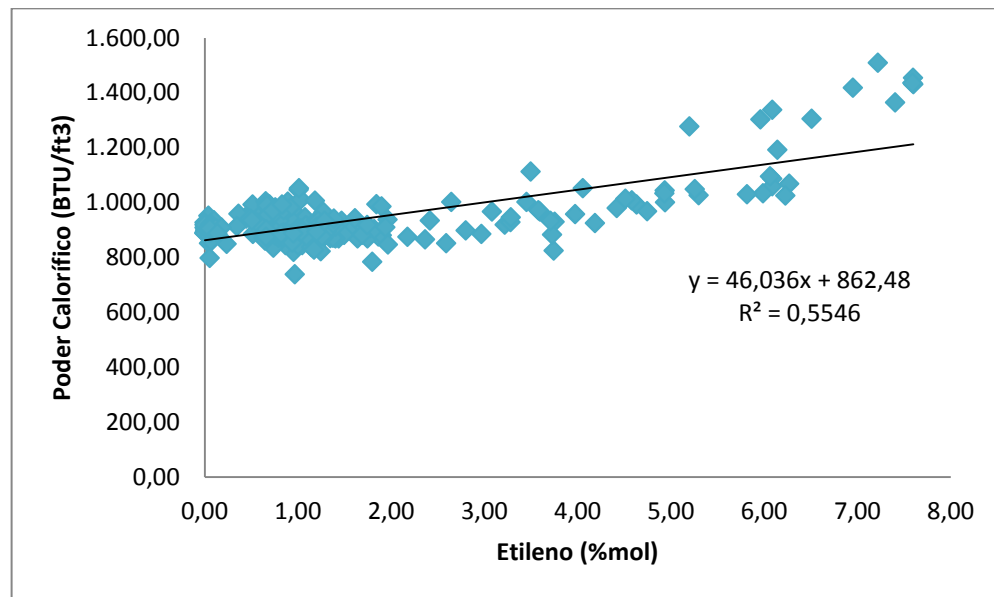
La figura 33 muestra que el metano presenta una correlación negativa con intensidad fuerte con respecto al poder calorífico; el gráfico muestra que a medida que disminuye el %mol de metano en el gas combustible, el poder calorífico es mayor; debido a que el gas está enriquecido con gases alternos como etileno, propanos, hidrógeno y/o GLP, que aumentan su poder calorífico.

Figura 34. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de etano



La figura 34 muestra que el etano presenta una correlación positiva con intensidad moderada con respecto al poder calorífico; el gráfico muestra que a medida que aumenta el %mol de etano en el gas combustible, el poder calorífico tiende a hacerse mayor y a concentraciones entre 6 %mol y 8 %mol de etano, el poder calorífico alcanza en algunos puntos a superar los 1200 BTU/ft³.

Figura 35. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de etileno



La figuras 35 muestra que el etileno presenta una correlación positiva con intensidad relativamente fuerte con respecto al poder calorífico. El gráfico muestra que a valores superiores a 6.5 %mol de etileno, el poder calorífico supera los 1200 BTU/ft³ hasta alcanzar valores de 1500 BTU/ft³ a medida que incrementan dicho componente. Este aumento de %mol de etileno ocurre por los desvíos de etano etileno que realizan a la red de gas combustible desde las unidades de craqueo catalítico o desde la planta de Etileno.

Figura 36. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de propano

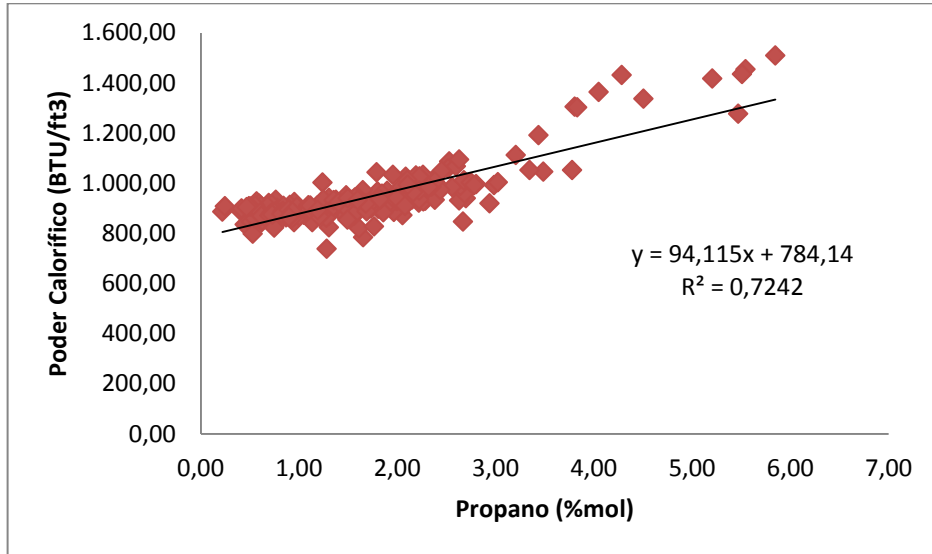
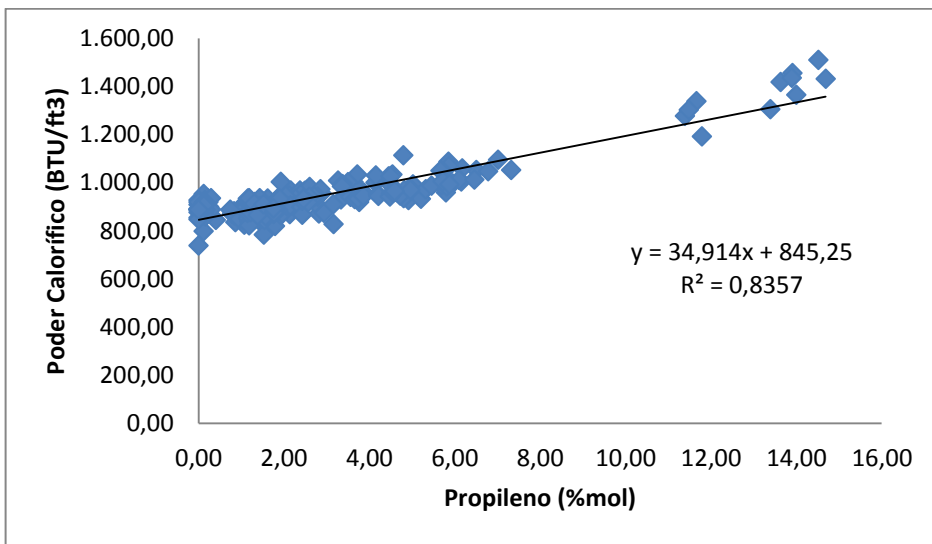


Figura 37. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de propileno



Las figuras 36 y 37 muestran que el propano y el propileno presentan correlaciones positiva con intensidad fuerte con respecto al poder calorífico. Los gráficos muestran que a valores superiores a 4 %mol y 12 % mol de propano y

propileno respectivamente, el poder calorífico supera los 1200 BTU/ft³ hasta alcanzar valores de 1500 BTU/ft³. Esto ocurre debido al incremento de desvíos de gas propano de las unidades de ruptura catalítica al cabezal de gas combustible.

Figura 38. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de n-butano

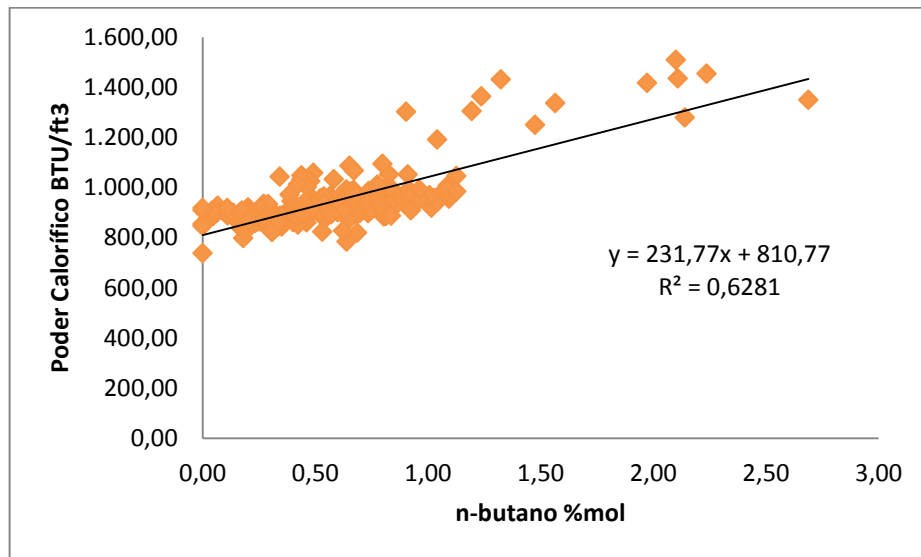
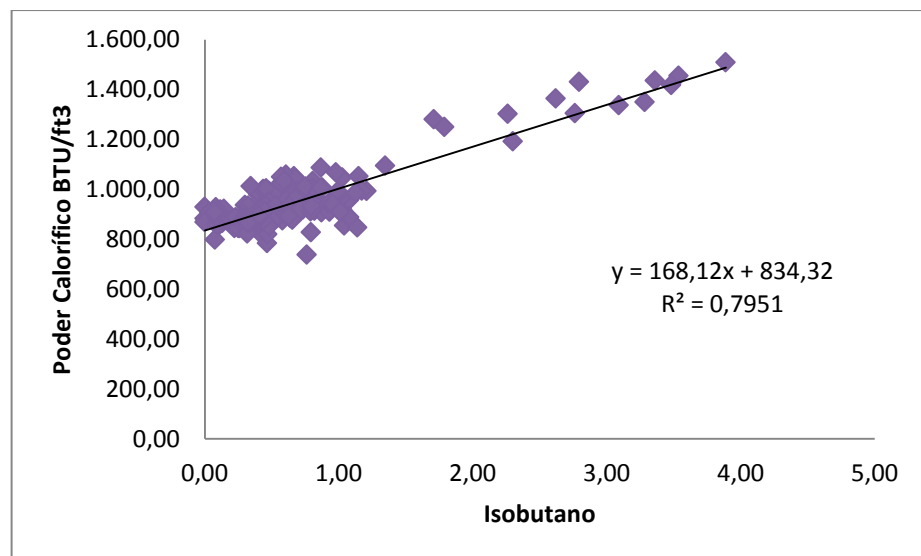
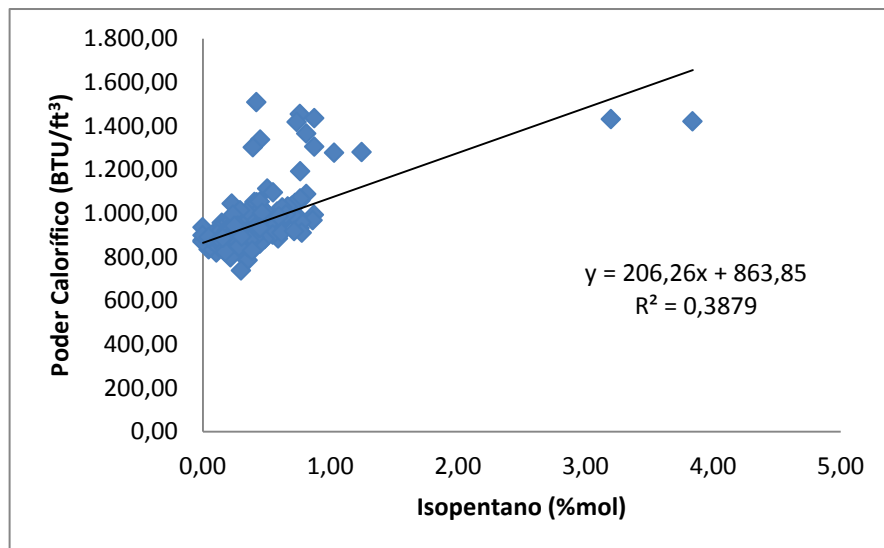


Figura 39. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de isobutano



Las figuras 38 y 39 muestran que el propano y el propileno presentan correlaciones positiva con intensidad fuerte con respecto al poder calorífico. Los gráficos muestran que a valores superiores a 1.4 %mol y 2.5 % mol de n-butano e isobutano respectivamente, el poder calorífico supera los 1200 BTU/ft³ hasta alcanzar valores de 1500 BTU/ft³. El aumento del %mol de dichos componentes es debido a los desvíos de GLP a la red de gas combustible proveniente de las unidades de ruptura catalítica.

Figura 40. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de isopentano



La figura 40 muestra que el isopentano presenta una correlación positiva, con intensidad moderada con respecto al poder calorífico. El gráfico muestra que a valores superiores a 0.70 %mol de isobutano, el poder calorífico supera los 1200 BTU/ft³ y alcanza valores de 1500 BTU/ft³.

La figura 41 muestra que el total de olefinas presenta una correlación positiva, con intensidad relativamente fuerte con respecto al poder calorífico. El gráfico muestra que a valores superiores a 9 %mol de dicho componente, el poder calorífico supera los 1200 BTU/ft³ hasta alcanzar valores de 1500 BTU/ft³ a medida que incrementan las olefinas.

Figura 41. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de total olefinas

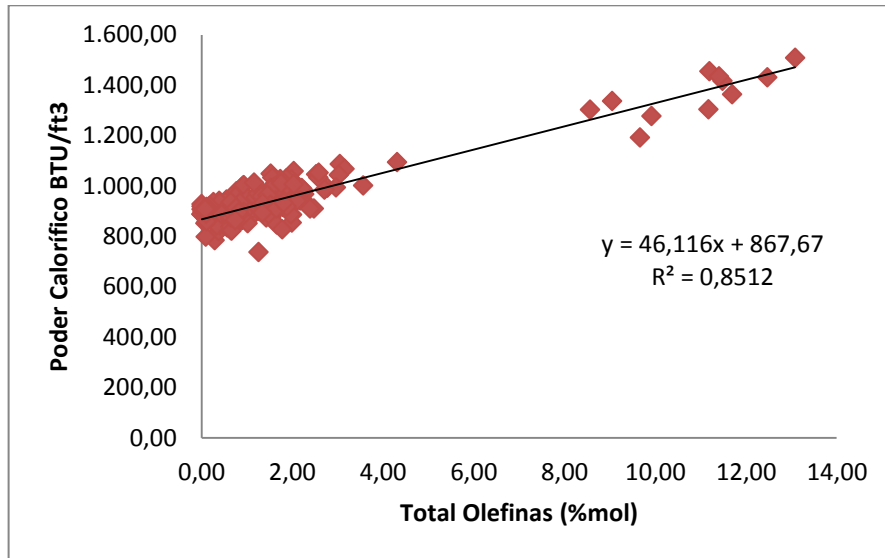
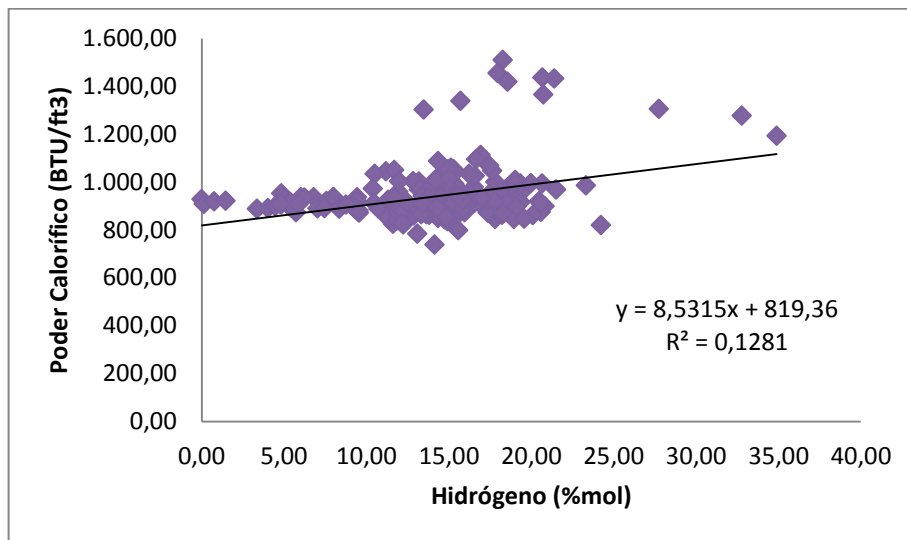


Figura 42. Variación del poder calorífico del gas con respecto a la composición de hidrógeno



La figura 42 muestra que el hidrógeno presenta una correlación positiva, con intensidad débil con respecto al poder calorífico. El gráfico muestra que a valores superiores a 15 %mol el poder calorífico no alcanza a superar los 1100 BTU/ft³,

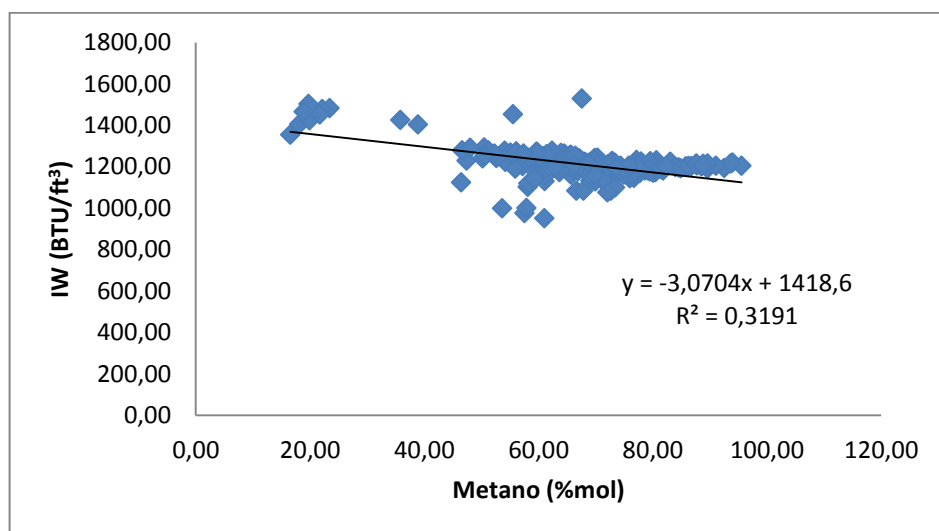
aunque entre 20 %mol y 35 %mol se ven algunos valores por encima de los 1200 BTU/ft³. En general el hidrógeno no aporta significativamente al poder calorífico del gas con respecto a los anteriores componentes.

En resumen, los componentes propano, propileno, n-butanos y el total de olefinas; tienen correlaciones positivas bastante fuertes con relación al poder calorífico y el aumento de estos componente incrementan mayormente el poder calorífico del gas combustible con respecto a los demás. Por el contrario el metano presenta la correlación negativa más fuerte, luego el aumento de este componente disminuye el poder calorífico.

6.3.2. Efecto de los componentes del gas combustible sobre el índice de Wobbe

Las figuras 43 a la 52, se presentan la variación del índice de Wobbe con respecto a los principales componentes del gas combustible, el índice se calculó mediante la ecuación (2). Los gráficos muestran que el índice de wobbe presenta variación dependiendo del tipo de desvíos de gases alternos que se estén realizando en el cabezal de gas combustible. Para dicho cálculo se tuvo en cuenta el poder calorífico y la densidad relativa del gas medido.

Figura 43. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de metano



La figura 43 muestra que el metano presenta una correlación negativa con intensidad moderada con respecto al índice de Wobbe. El gráfico muestra que a concentraciones entre 60 %mol y 80 %mol de dicho componente el índice de Wobbe se encuentra entre 950 BTU/ft³ y 1250 BTU/ft³, por debajo de 50% mol de metano el índice alcanza valores superiores a 1400 BTU/ft³, debido a que se realizan desvíos de gases alternos al cabezal de gas combustible aumentando el contenido de carbonos en el gas.

Figura 44. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de etano.

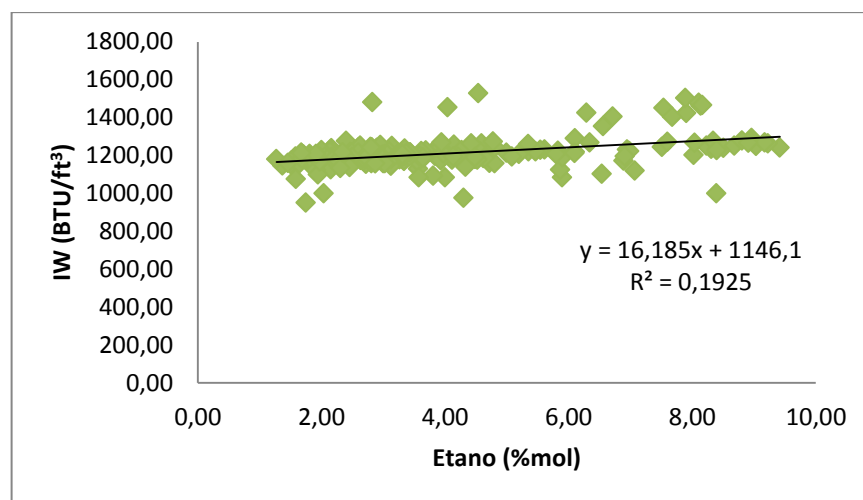
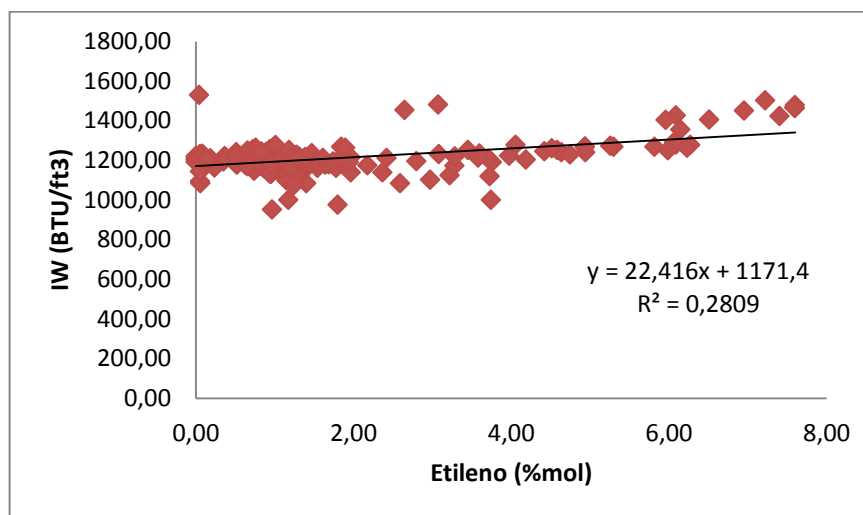


Figura 45. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de etileno



Las figuras 44 y 45, muestran que el etano y el etileno presentan correlación positiva, con intensidad moderada con respecto al poder calorífico. En el componente etileno se aprecia que a valores inferiores a 6 % mol, el índice de Wobbe se encuentra entre 1000 BTU/ft³ y 1250 BTU/ft³, y con valores superiores a 6.5% mol alcanza valores superiores a los 1400 BTU/ft³ a medida que incrementan dichos componentes.

Figura 46. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de propano

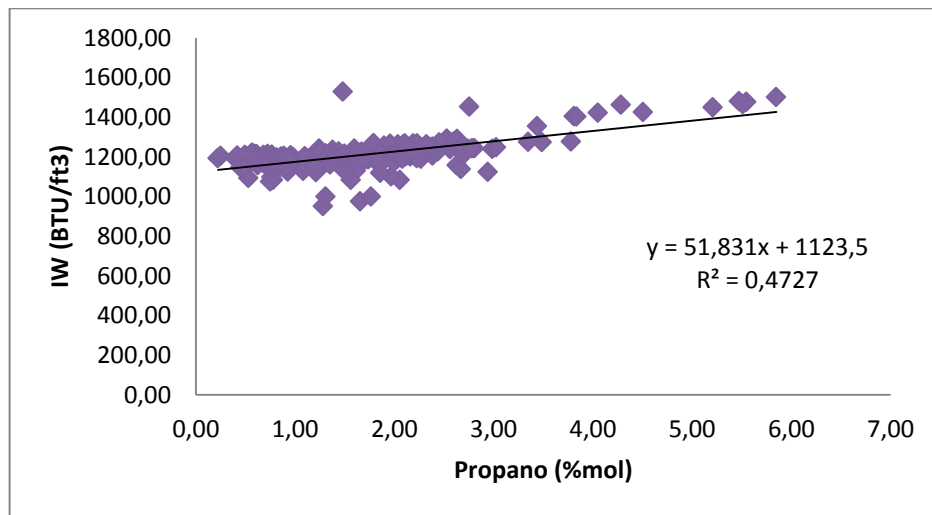
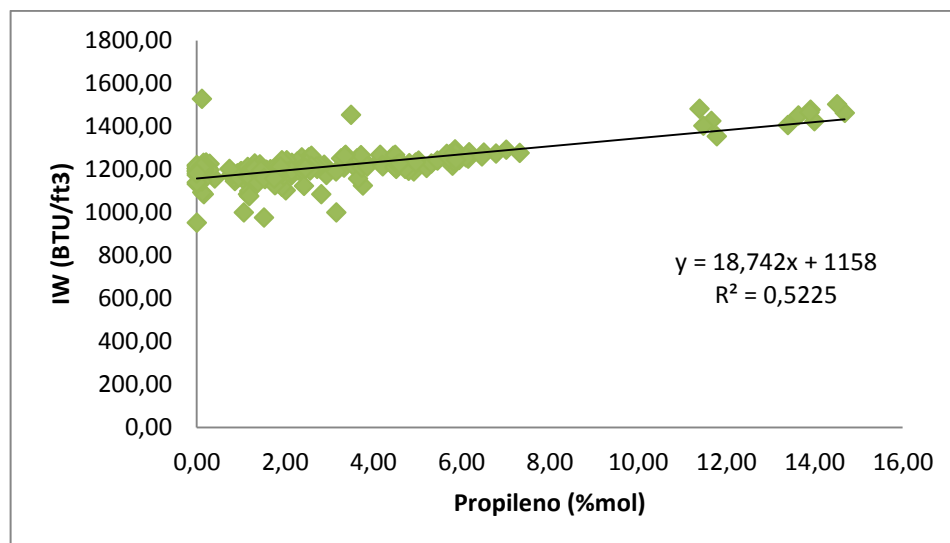


Figura 47. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de propileno



Las figuras 46 y 47, muestran que el propano y el propileno presentan una correlación positiva, con intensidad moderada con respecto al poder calorífico. Los gráficos muestran que a valores inferiores a 3.5 % mol y 8 % mol de propano y propileno respectivamente, el índice de Wobbe se encuentra entre 1100 BTU/ft³ y 1250 BTU/ft³, y con valores superiores a 4 % mol de propano y 12% mol de propileno, se alcanzan valores superiores a los 1400 BTU/ft³.

Figura 48. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de n-butano

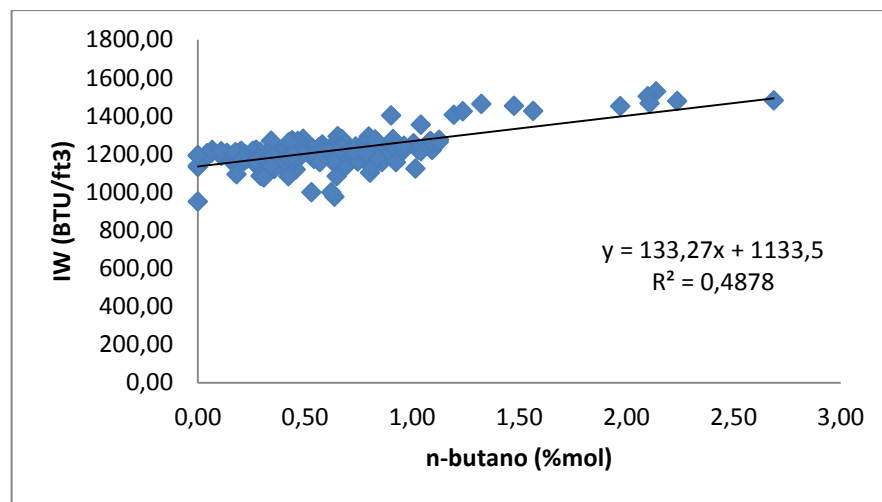
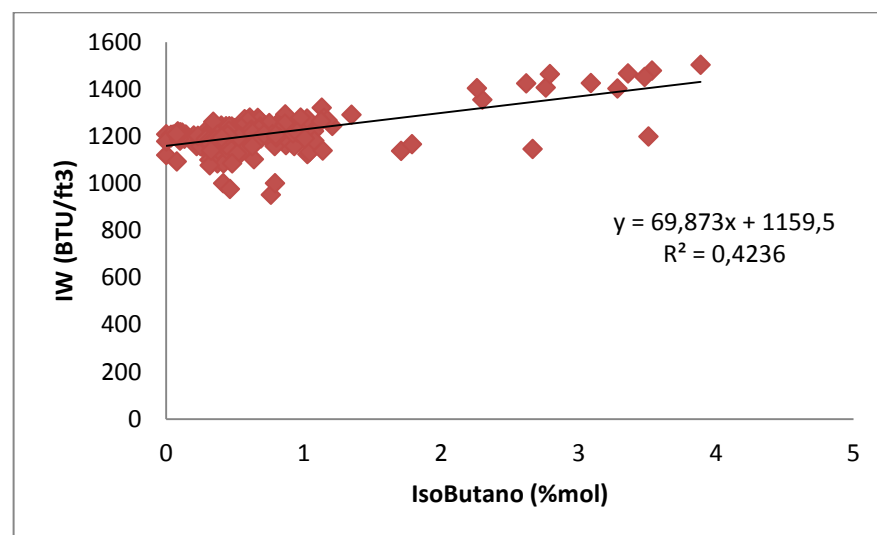


Figura 49. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de isobutano



Las figuras 48 y 49, muestran que el n-butano y el isobutano presentan correlación positiva, con intensidad moderada con respecto al poder calorífico. Los gráficos muestran que a valores inferiores a 1.1 % mol y 1.0 % mol de n-butano e isobutano respectivamente, el índice de Wobbe se encuentra entre 1000 BTU/ft³ y 1250 BTU/ft³, y con valores superiores a 1.2 % mol de n-butano y 2.5% mol de isobutano se alcanzan valores superiores a los 1400 BTU/ft³.

Figura 50. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de isopentano

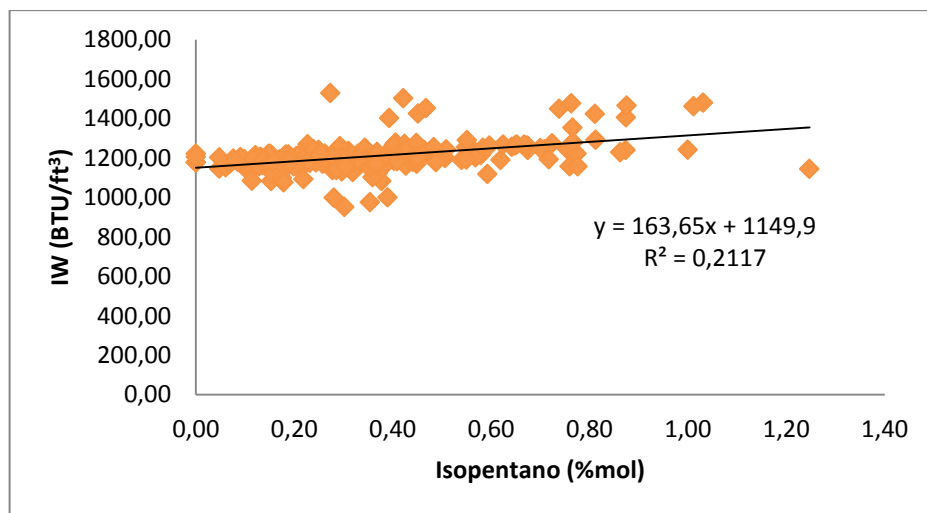
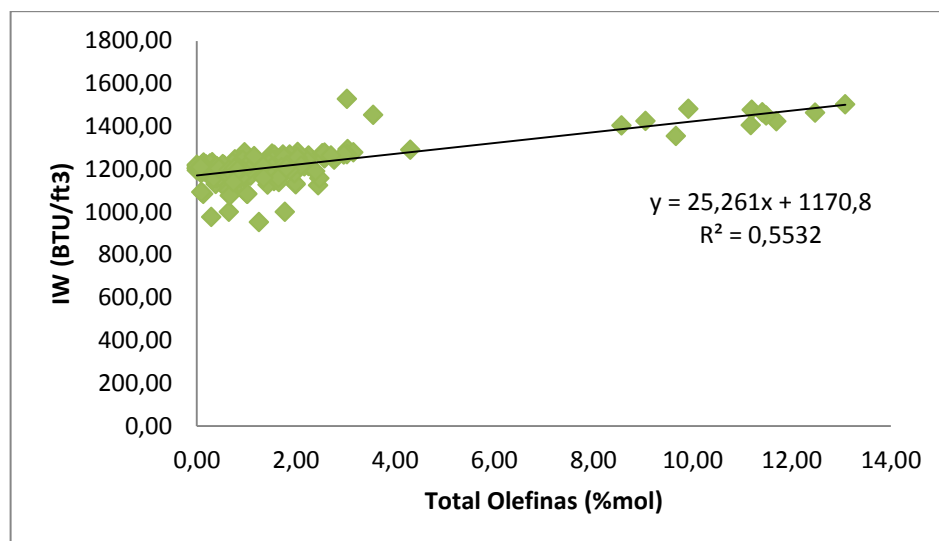


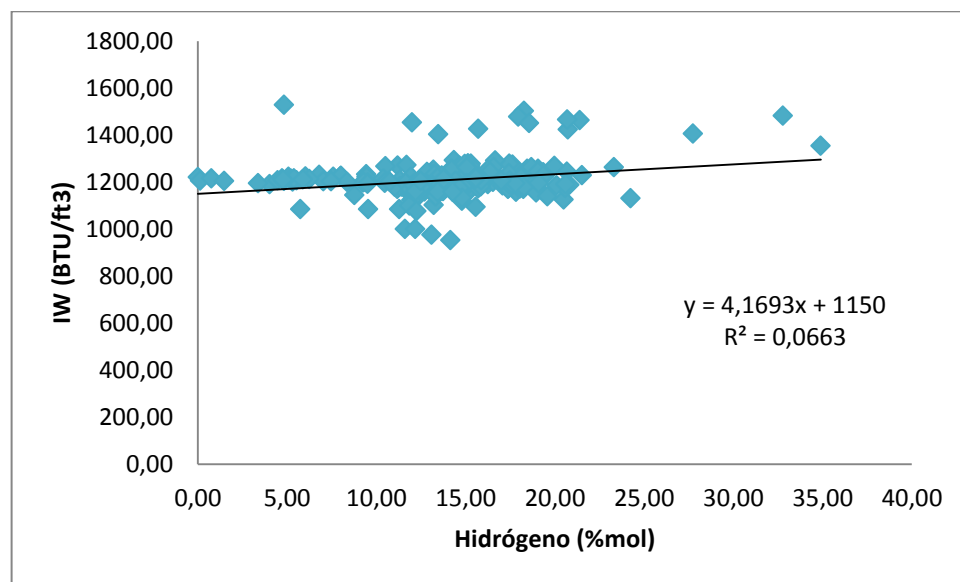
Figura 51. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de total olefinas



La figura 50 muestra que el isopentano presenta una correlación positiva con intensidad débil con respecto al índice de Wobbe. El gráfico muestra que a concentraciones entre 0 %mol y 0.75 %mol de dicho componente el índice de Wobbe se encuentra entre 950 BTU/ft3 y 1295 BTU/ft3, por encima de 0.8% mol el índice alcanza valores superiores a 1400 BTU/ft3.

La figura 51 muestra que el total de olefinas presenta una correlación positiva con intensidad moderada con respecto al índice de Wobbe. El gráfico muestra que a concentraciones entre 0 %mol y 3 %mol de dicho componente el índice de Wobbe se encuentra entre 950 BTU/ft3 y 1250 BTU/ft3, por encima de 9 % mol el índice alcanza valores superiores a 1400 BTU/ft3.

Figura 52. Variación del índice de Wobbe con respecto a la composición de hidrógeno



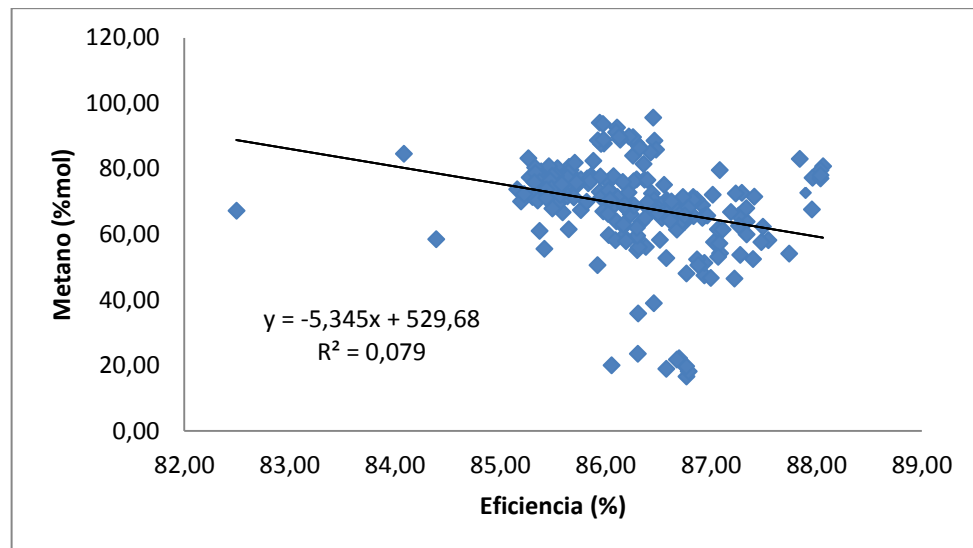
La figura 52 muestra que el hidrógeno presenta una correlación positiva, con intensidad débil con respecto al índice de Wobbe. El gráfico muestra que a valores entre 5 % mol y 18 % mol el índice de Wobbe se encuentra entre 1050 BTU/ft3 y 1250 BTU/ft3, y con valores superiores a 20 % mol se alcanzan valores superiores a los 1400 BTU/ft3.

En resumen, los componentes propano, propileno, n-butanos y el total de olefinas; tienen correlaciones positivas medianamente fuertes con relación al índice de Wobbe y el aumento de estos componente lo incrementan mayormente con respecto a los demás componentes.

6.3.3. Efecto de los componentes del gas combustible sobre la eficiencia de la caldera

Las figuras 53 a 63, presentan la variación de la eficiencia del proceso de combustión de la caldera con respecto a los componentes del gas combustible de entrada a la caldera.

Figura 53. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de metano



La figura 53 muestra que el metano presenta una correlación negativa, con intensidad débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que las mayores eficiencias que se alcanzan se encuentran entre 70 %mol y 85 %mol de dicho componente y que a valores entre 15 %mol y 40 %mol de metano no presenta eficiencias superiores a 87%, el mismo comportamiento se presenta con valores superiores a 90 %mol.

Figura 54. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de etano

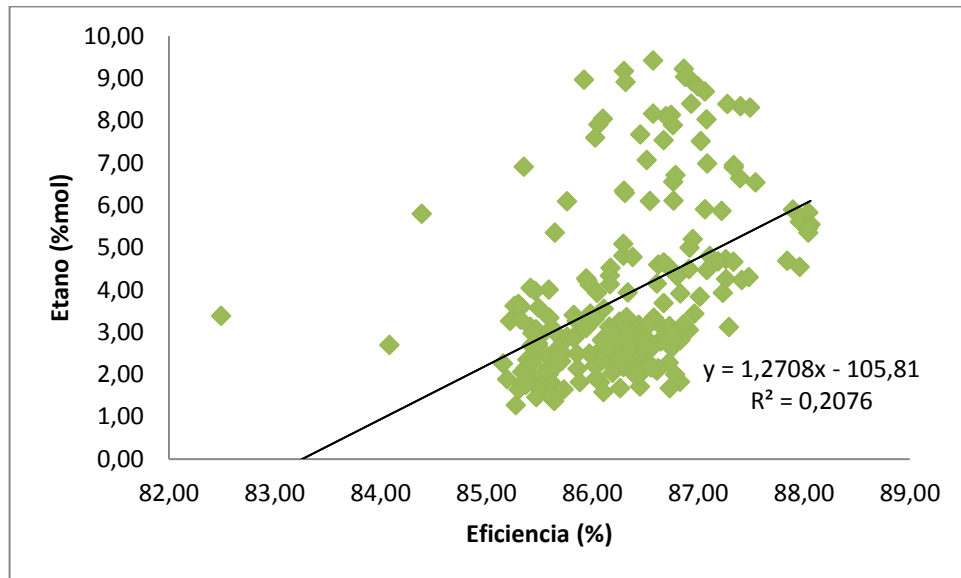
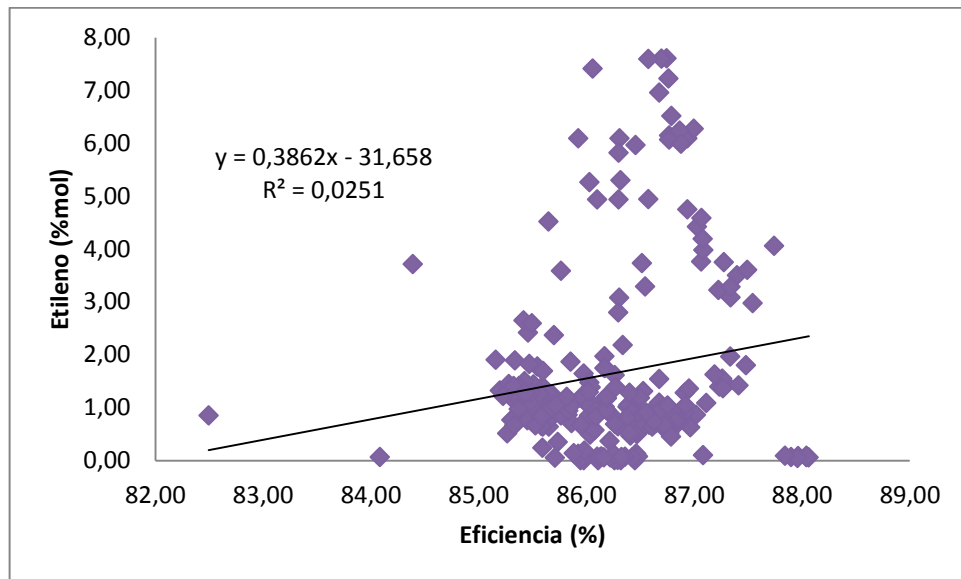


Figura 55. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de etileno



La figuras 54 muestra que el etano presenta una correlación positiva, con intensidad débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que las mayores eficiencias se alcanzan entre 4.5 %mol y 6 %mol donde se registran valores hasta de 88% y a concentraciones superiores a 8.5 %mol de etano no se observan eficiencias superiores a 87%.

La figura 55 muestra que el etileno presenta una correlación positiva, con intensidad bastante débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que las mayores eficiencias que se alcanzan se encuentran entre 0%mol y 4 % mol de dicho componente y que a valores superiores a 6 %mol no se alcanzan eficiencias superiores a 87%.

Figura 56. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de propano

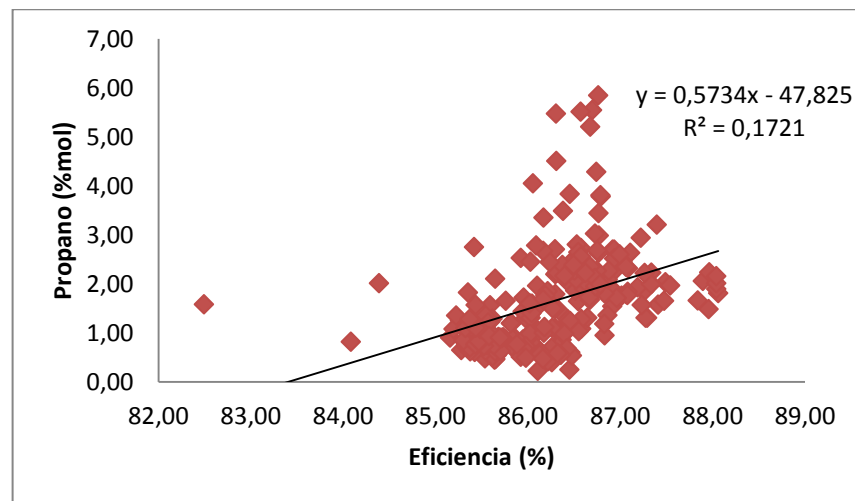
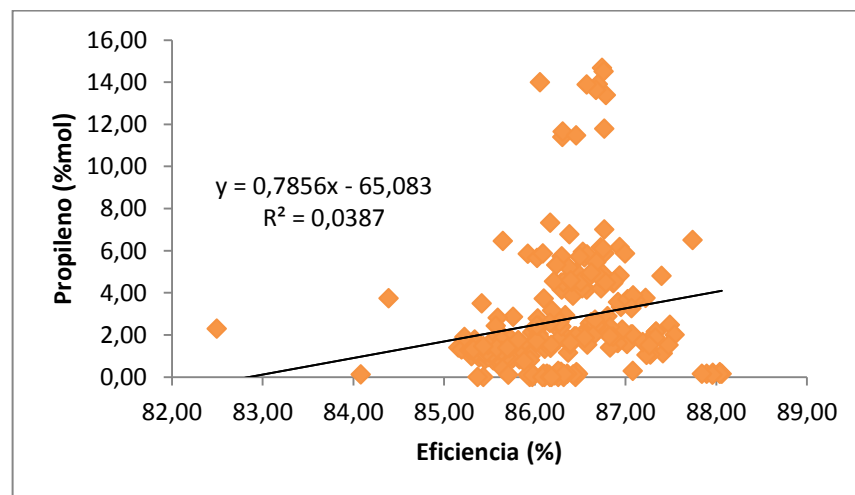


Figura 57. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de propileno

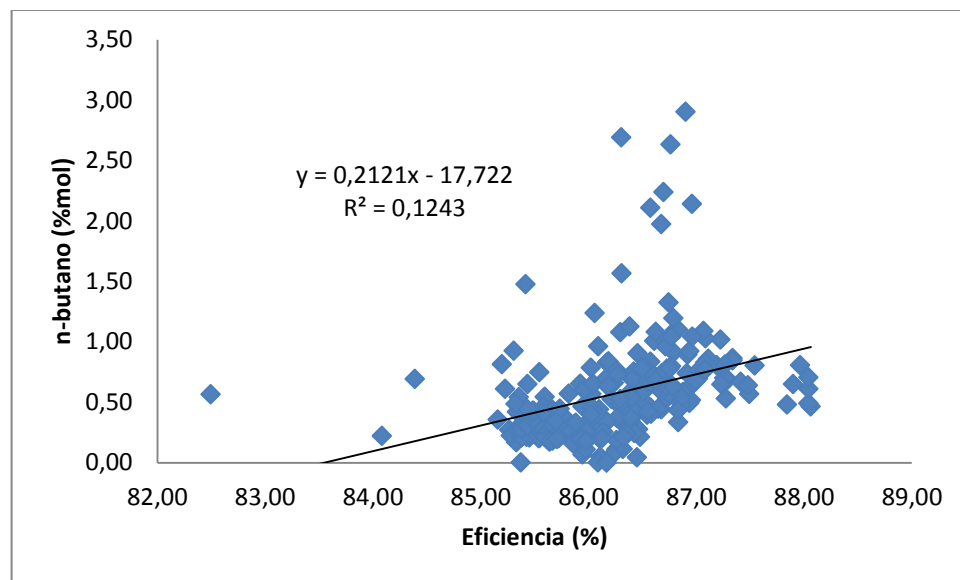


La figura 56, muestra que el propano presenta correlación positiva, con intensidad débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que las mayores eficiencias

que se alcanzan para el propano se encuentran entre 1.4%mol y 2.5 % mol y a valores superiores a 4%mol no se presentan eficiencias superiores a 86.8%.

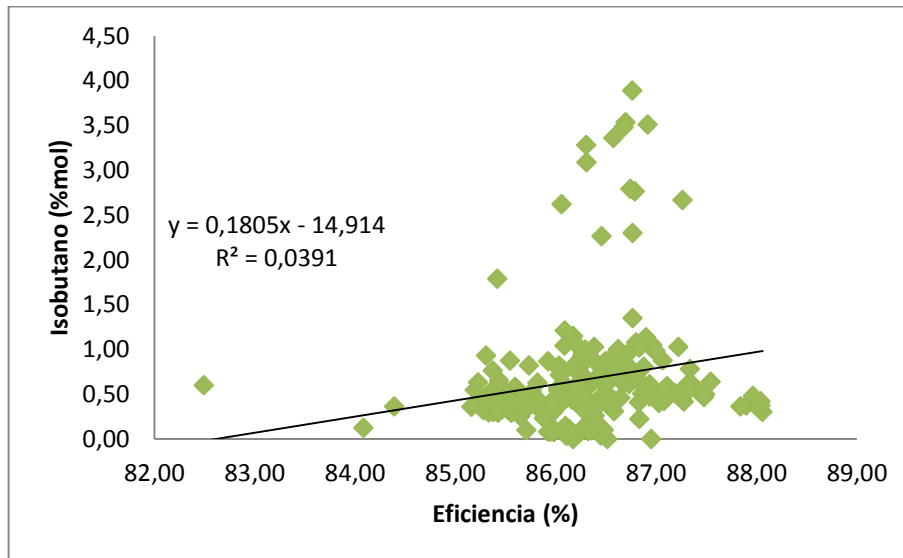
La figura 57, muestra que el propileno presenta correlación positiva, con intensidad débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que las mayores eficiencias que se alcanzan para el propileno se encuentran entre 0 %mol y 6.5% mol, donde se presentan eficiencias hasta de 87.8% y a valores superiores a 11 %mol no se alcanzan eficiencias superiores a 86.8%.

Figura 58. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de n-butano



La figura 58 muestra que el n-butano presenta correlación positiva, con intensidad débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que las mayores eficiencias que se alcanzan para el n-butano se encuentran entre 0.45 %mol y 0.8 %mol; por encima de 2%mol no se presentan eficiencias superiores a 86.7%.

Figura 59. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de isobutano



La figuras 59 muestra que el isobutano presenta correlación positiva, con intensidad débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que las mayores eficiencias que se alcanzan están entre 0.30 %mol y 0.6% mol; por encima de 2 %mol las eficiencias no superan el 87.2%.

Figura 60. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de isopentano

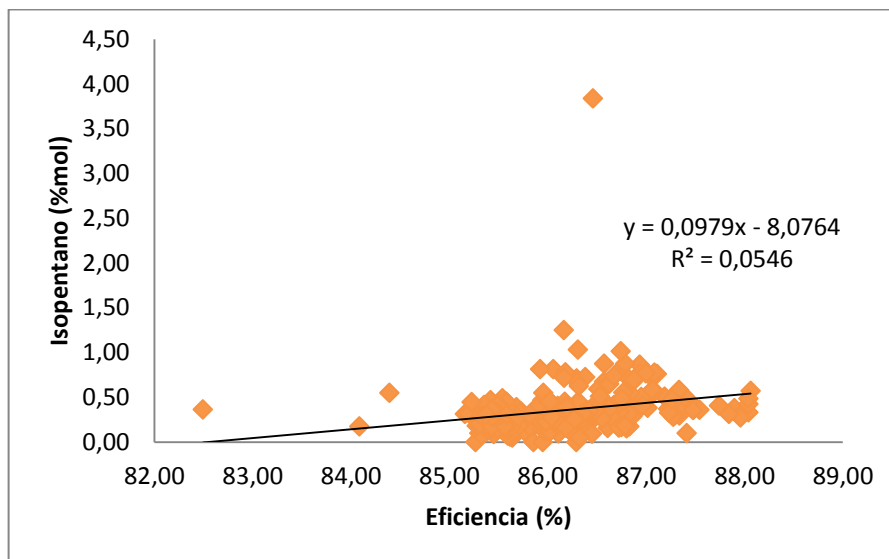
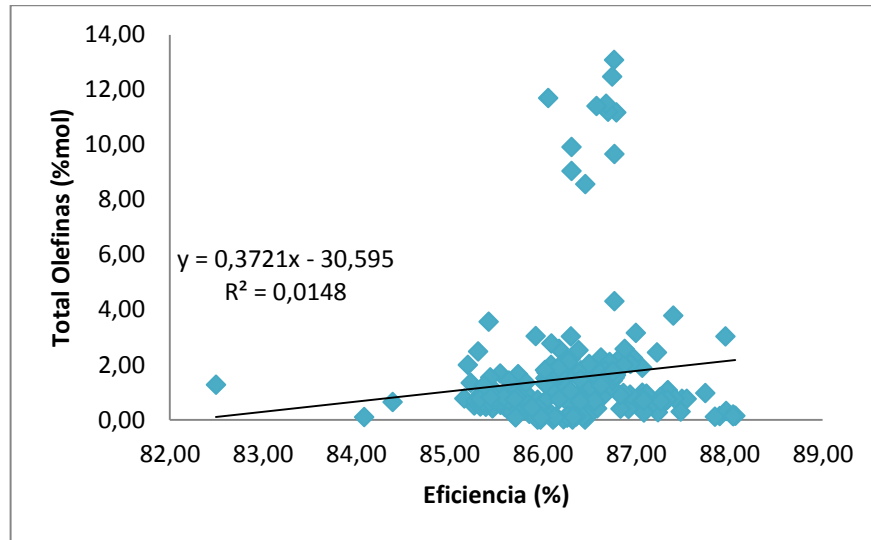
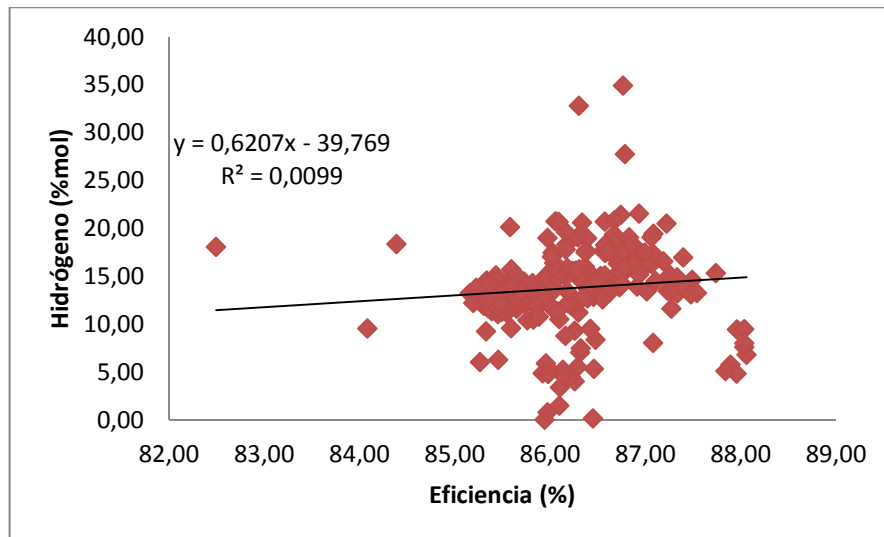


Figura 61. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de Total Olefinas



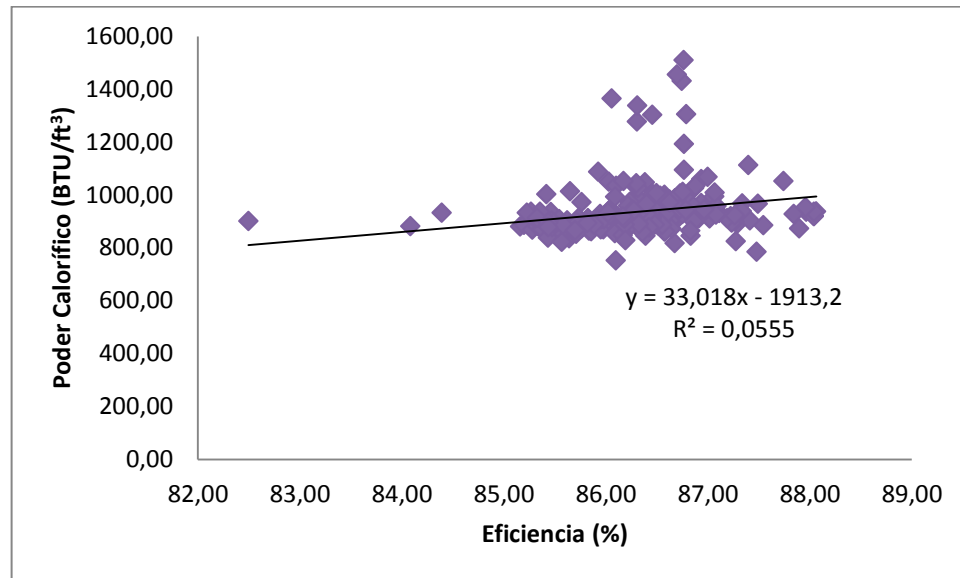
Las figuras 60 y 61, muestran que el isopentano y total olefinas presentan correlación positiva, con intensidad débil con respecto a la eficiencia. Los gráfico muestran que las mayores eficiencias que se alcanzan para el isopentano se encuentran entre 0.3%mol y 0.58 % mol y para el total olefinas está entre 0.13 %mol y 3.0% mol de dicho componente; a valores superiores a 8.5% del total de olefinas la eficiencia no supera el 86.8%.

Figura 62. Variación de la eficiencia con respecto a la composición de hidrógeno



La figura 62 muestra que en el hidrógeno presenta correlación levemente positiva, con intensidad muy débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que las mayores eficiencias que se alcanzan para el hidrógeno se encuentran entre 5 %mol y 20 % mol de dicho componente.

Figura 63. Variación de la eficiencia con respecto al poder calorífico del gas



La figura 63 muestra que el poder calorífico presenta una correlación positiva, con intensidad débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que entre 872 BTU/ft³ y 1050 BTU/ft³ se alcanzan los mayores valores de eficiencia, lográndose a llegar hasta el 88% y que a valores superiores a 1050 BTU/ft³ la eficiencia no supera el 87%.

En resumen la mayoría de las variables de composición del gas combustible presentan correlaciones positivas débiles, por lo que se evidencia que existen otras causas de dependencia con relación a otras variables que afectan la eficiencia de la caldera. Sin embargo, las gráficas si permite identificar rangos de composición en el cual se pueden lograr obtener la mayor eficiencia con cada a uno de los componentes y valores que la limitan también. En conclusión los desvíos de gases alternos pueden aumentar el poder calorífico por el aumento de contenidos de carbonos y mejorar la eficiencia, pero éstos deben controlarse,

puesto que valores muy altos de dichos desvíos pueden afectar también la eficiencia de la caldera, debido a que en ocasiones no se aprovecha toda su potencia calorífica.

Al comparar los gráficos de índice de Wobbe (IW) que presentan las figuras 43 a la 52, los gráficos muestran que existe una relación entre dicho índice con respecto a los componentes y la eficiencia, encontrándose que a índices superiores a 1350 BTU/ft^3 la eficiencia se limita a un máximo de 87% aproximadamente, por ejemplo, concentraciones superiores a 1% de propileno, el IW supera los 1350 BTU/ft^3 y las mayores eficiencias presentadas no alcanzan el 87%; así mismo ocurre en la mayoría de los componentes estudiados, claramente con %mol diferentes para cada uno.

6.3.4. Efecto de las temperaturas de las etapas de la caldera sobre la eficiencia

Las figuras 64 a 67, presentan la variación de la eficiencia del proceso de combustión de la caldera con respecto a las diferentes etapas de intercambio de calor. Los gráficos muestran que la condición de mantenibilidad de los intercambiadores de calor que intercambian energía con los gases de combustión influye en la eficiencia de la caldera, teniendo en cuenta que la caldera maneja cuatro intercambiadores de calor al interior a saber: economizador, calentador de aire, super-calentador, adicional a los tubos del hogar; los cuales, dependiendo su capacidad de absorber calor, afectan la eficiencia de la caldera.

La figura 64 muestra que la temperatura del aire al calentador presenta una correlación positiva, con intensidad bastante débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que existen otras causas de dependencia más fuertes con relación a otras variables que afectan la eficiencia de la caldera, por lo que la tendencia de la temperatura del aire al calentador no permite ver claramente la influencia de esta variable sobre la eficiencia.

Figura 64. Variación de la eficiencia con respecto a la temperatura de aire al calentador

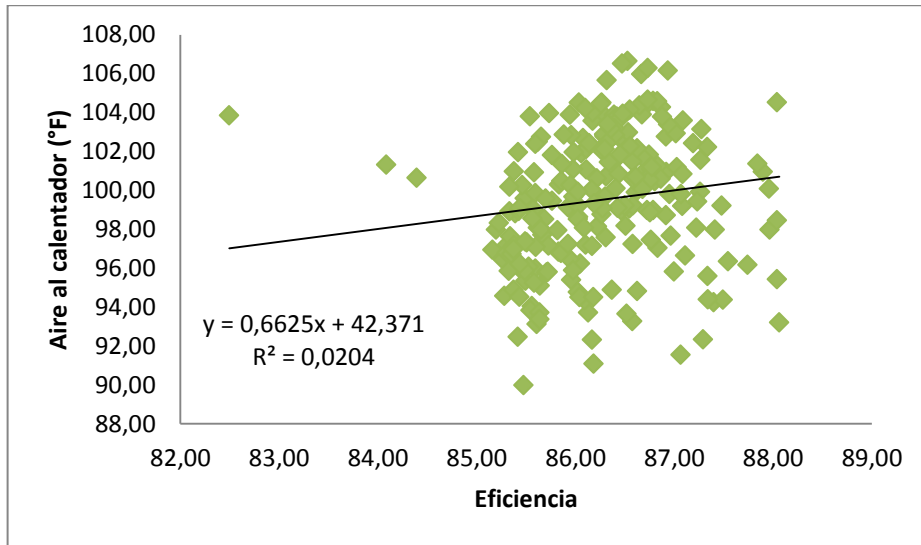
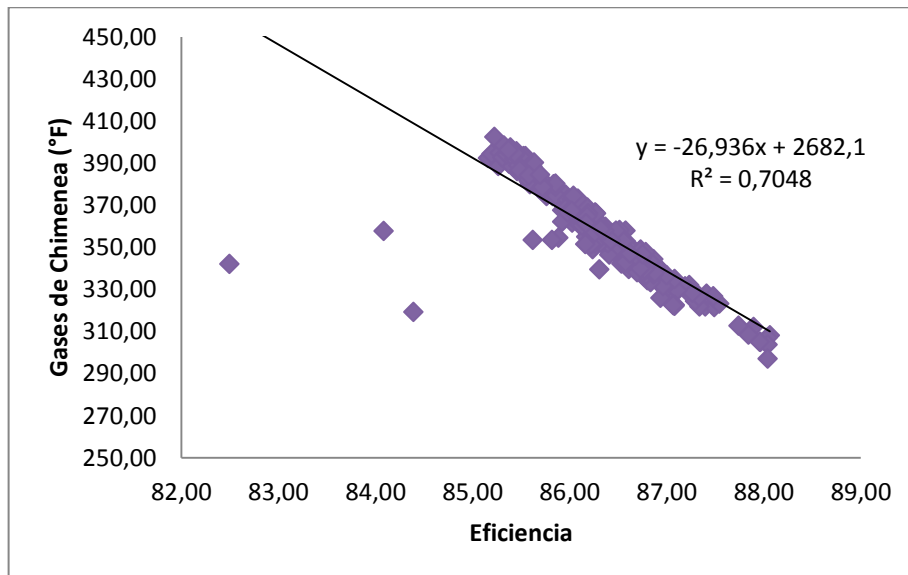


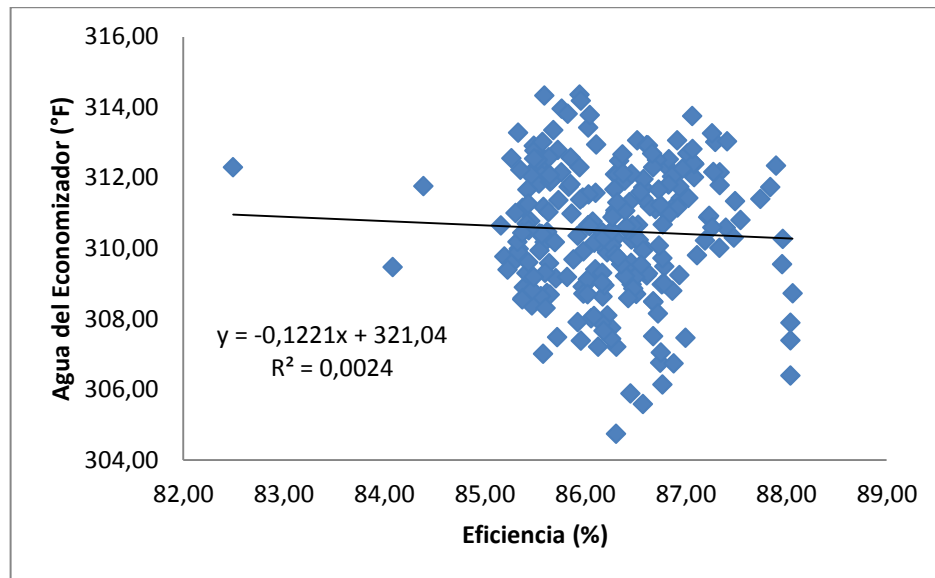
Figura 65. Variación de la eficiencia con respecto a la temperatura de gases de chimenea



La figura 65 muestra que la temperatura de chimenea presenta una correlación negativa, con intensidad fuerte con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que a temperaturas de gases de chimenea bajas, cercanas a los 300 °F, la eficiencia

de la caldera alcanza valores de 88 %; a medida que la temperatura es mayor, la eficiencia disminuye proporcionalmente. Cuando la temperatura está entre 360°F y 400°F la eficiencia alcanza valores máximos de 86%. La temperatura de chimenea afecta entonces en gran medida la eficiencia de la caldera.

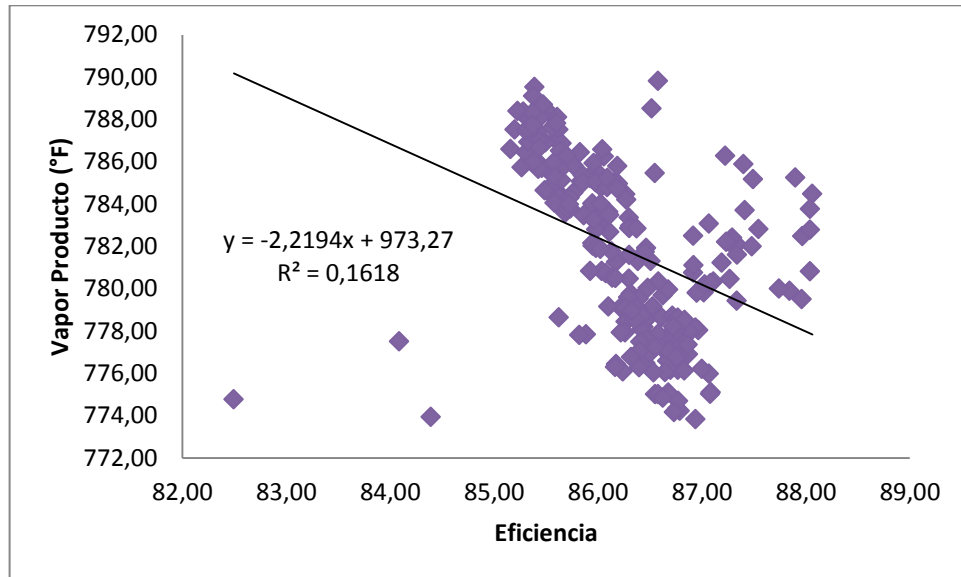
Figura 66. Variación de la eficiencia con respecto a la temperatura de agua del economizador



La figura 66 muestra que la temperatura agua del economizador presenta una correlación negativa, con intensidad bastante débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que existen otras causas de dependencia más fuertes con relación a otras variables que afectan la eficiencia de la caldera, por lo que la tendencia de la temperatura del agua del economizador no permite ver claramente la influencia de esta variable sobre la eficiencia.

La figura 67 muestra que la temperatura del vapor producto presenta una correlación negativa, con intensidad medianamente débil con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que a temperaturas entre 775 °F y 780 °F la eficiencia de la caldera oscila entre 86 y 87 %; a medida que se incrementa este valor la eficiencia tiende a disminuir. Los mayores valores de eficiencia se observan entre 780 °F y 785°F.

Figura 67. Variación de la eficiencia con respecto a la temperatura del vapor producto



En resumen, el análisis de las variables de temperatura de aire al calentador y del agua del economizador, no permiten concluir una influencia notoria en la eficiencia de la caldera, debido a que los datos de dichas variables presentan correlaciones muy débiles, a razón de que hay otras variables que presentan mayor influencia sobre la eficiencia de la caldera.

La variable temperatura de chimenea presenta una correlación negativa fuerte, por lo que el monitoreo de esta variable es fundamental para alcanzar una eficiencia alta en la caldera y es la variable más importante a controlar en el aspecto de temperatura de las etapas de la caldera.

6.3.5. Efecto de la producción de la caldera sobre la eficiencia

Las figuras 68 y 69 presentan la variación de la eficiencia del proceso de combustión con respecto a la carga de la caldera y al consumo de gas.

Figura 68. Variación de la eficiencia con respecto a la producción de vapor

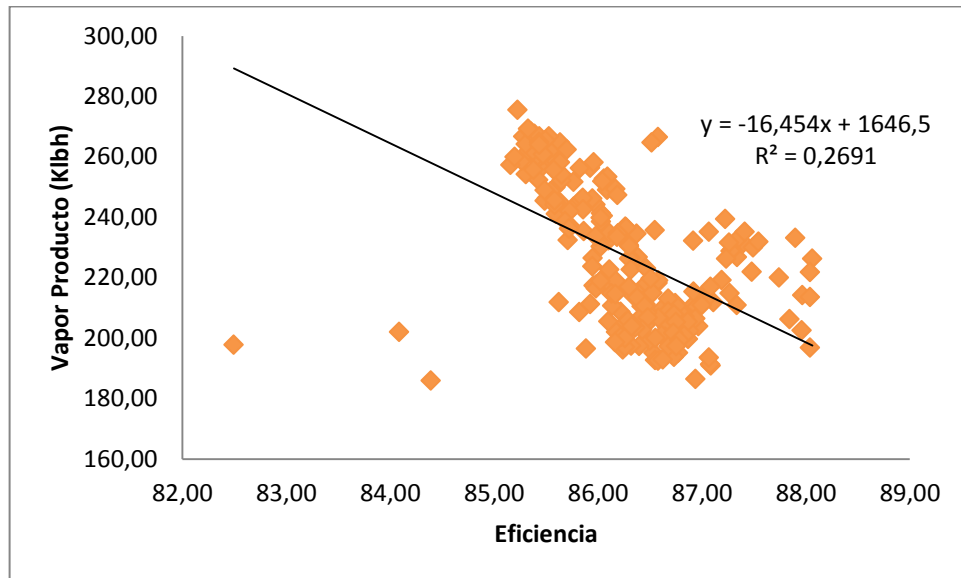
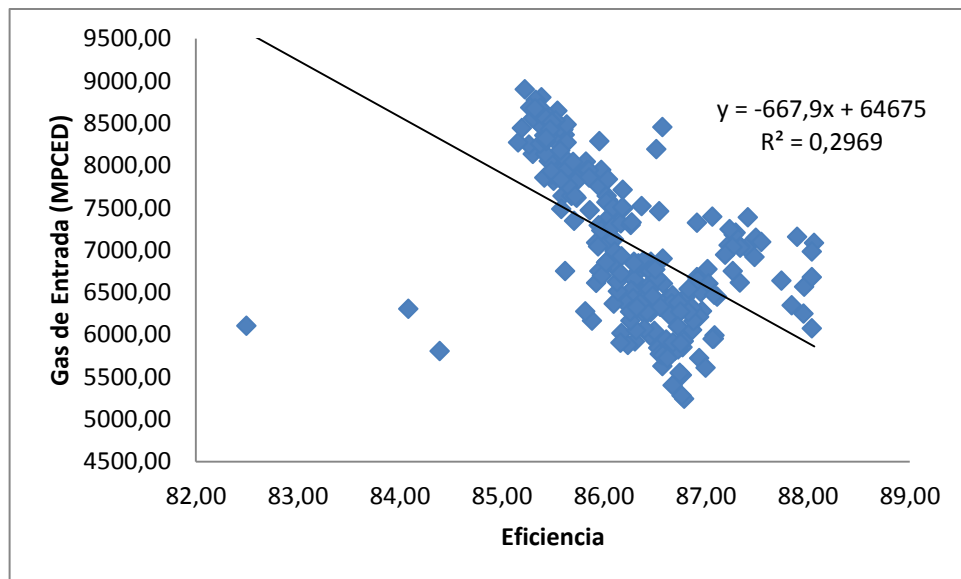


Figura 69. Variación de la eficiencia con respecto al gas consumido



Las figuras 68 y 69 muestran que el flujo de vapor producto y el flujo de gas consumido presentan una correlación negativa, con intensidad moderada con respecto a la eficiencia. El gráfico muestra que a producciones de vapor por debajo de 195 kl/h, la eficiencia de la caldera oscila entre 85.8 y 87 % en su

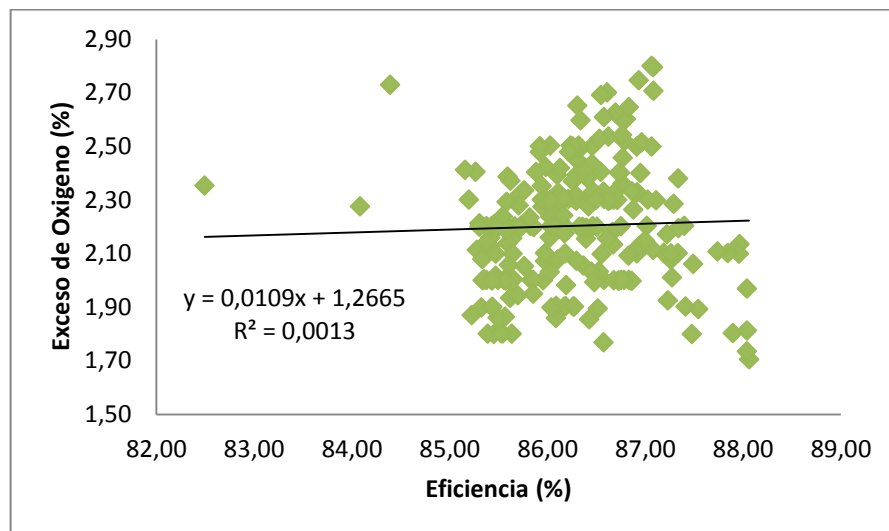
mayoría de datos; entre 200 klbh y 240 klbh la eficiencia presenta valores entre 85.8% y 88%, entre 245 klbh y 300 klbh la eficiencia de la caldera tiende a disminuir y oscila entre 85.3% y 86.2% presentando valores más bajos a medida que aumenta la producción. El comportamiento del flujo de gas es proporcional a la producción de la caldera y sus gráficas tienen un comportamiento muy similar.

En resumen, se observó que la caldera presenta mejor desempeño cuando su carga está a una producción entre el 60% y el 75% de su capacidad instalada, puesto que es donde se observa que se alcanzan los valores más altos de eficiencia.

6.3.6. Efecto del exceso de oxígeno sobre la eficiencia de la caldera

La figura 70 presenta la variación de la eficiencia de la caldera con respecto al exceso de oxígeno medido en los gases de combustión que salen por la chimenea de la caldera.

Figura 70. Variación de la eficiencia con respecto al exceso de oxígeno



La figura 70 muestra que el exceso de oxígeno presenta una correlación positiva, con intensidad baja con respecto a la eficiencia. Se observa que con excesos de oxígeno entre 1.7% y 2% la eficiencia de la caldera oscila entre 86.5 y 88 %; con excesos de oxígeno entre 1.8% y 2.3% la eficiencia encuentra valores entre 85.3%

y 87.5% y con excesos de oxígeno entre 2.4% y 2.8% la eficiencia presenta valores entre 85.8% y 87.3%.

En resumen, los valores de eficiencia más altos se alcanzan entre 1.7% y 2.3% de exceso de oxígeno, lo cual es un rango muy importante a controlar para garantizar una adecuada combustión en la caldera.

6.4. MODELO MATEMÁTICO PARA CÁLCULO DE EFICIENCIA

6.4.1. Modelo matemático para el cálculo del Poder calorífico

Las tablas 7, 8 y 9, muestran los resultados obtenidos para el valor cuadrado del coeficiente de correlación R^2 , el análisis de los residuales y la prueba estadística “P” para cada uno de los modelos utilizados para el cálculo del poder calorífico a partir de los componentes del gas. Estos resultados fueron obtenidos mediante Microsoft Excel, utilizando el método de regresión lineal múltiple, modelo que se escogió por presentar coeficientes de correlación $R^2 > 0.800$.

El modelo teórico a estimar fue:

$$X_1 = \beta_0 + \beta_1 C_1 + \beta_2 C_2 + \beta_3 C_3 + \beta_4 C_4 + \beta_5 C_5 + \beta_6 C_6 + \beta_7 C_7 + \beta_8 C_8 + \beta_9 C_9 \dots + \beta_{15} C_{15} \quad (21)$$

El modelo se corrió ejecutando el algoritmo computacional de la regresión hacia atrás con la variable Poder calorífico (X_1) en función de todas las variables explicativas (C_1 a C_{15}).

Las tablas 7, 8 y 9, muestran que los modelos N°1, 2 y 3 presentaron coeficientes de correlación $R^2 > 0.90$, resultando las tres correlaciones muy buenas. El modelo N°1 fue descartado por no cumplir en C_4 , C_{12} , C_{13} y C_{14} , con el valor P, el cual para estos componentes es mayor de 0.05; el modelo N°2 fue descartado por tener el error típico mayor que el modelo N°3 y presentar residuales mayores. En resumen, se escoge el modelo N°3, por ser el que presenta el mayor grado de correlación R^2 , menor error típico, menores residuales y cumplir con la prueba P.

El modelo para el cálculo del Poder calorífico del gas quedó representado de la siguiente forma:

$$X_1 = 9,09C_1 + 16,16C_2 + 15C_3 + 22,97C_4 + 22C_5 + 30,34C_6 + 30,16C_7 + 37,29C_8 + 2,85C_9 + 28,7C_{15} \quad (22)$$

Donde (X_1) corresponde a la variable Poder calorífico en función de las variables de composición del gas (C_1 a C_{15}) relacionadas en la tabla 6 y donde finalmente quedaron sólo 10 variables de composición en el modelo de las 15 estudiadas.

Resumen del Modelo N°1:

Tabla 7. Resumen Modelo N°1 para cálculo de Poder calorífico del gas.

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
C ₁	8,99942582	0,05634019	159,733676	1,915E-238
C ₂	15,8775003	1,73323064	9,16063903	2,8664E-17
C ₃	17,8942701	2,05043085	8,72707809	5,2875E-16
C ₄	-5,49241387	4,65460607	-1,17999543	0,23921576
C ₅	36,1923703	1,45390596	24,893199	2,4973E-67
C ₆	54,2876889	5,41663504	10,0224011	7,3087E-20
C ₇	83,434349	3,89774149	21,405819	9,441E-57
C ₈	40,4290313	4,56265843	8,86084985	2,1663E-16
C ₉	2,52863558	0,34733312	7,28014519	5,1908E-12
C ₁₀	-12,3811171	3,02839408	-4,08834412	5,9994E-05
C ₁₁	2,52621434	0,80018674	3,15703098	0,00180616
C ₁₂	-0,47167104	4,74472287	-0,09940961	0,92089927
C ₁₃	5,65553917	3,18423733	1,77610479	0,07703197
C ₁₄	2,28401226	3,74792138	0,60940773	0,54285313

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99980826
Coefficiente de determinación R ²	0,99961656
R ² ajustado	0,99526598
Error típico	19,0533293
Observaciones	232

Residuales		
Min.	Mediana	Max.
-116,13575	-0,14118516	63,331187

Resumen del Modelo N°2:

Tabla 8. Resumen Modelo N°2 para cálculo de poder calorífico del gas.

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
C ₁	9,09976328	0,04619365	196,991664	1,061E-264
C ₂	6,74315411	1,13818121	5,92449961	1,0958E-08
C ₃	26,2806792	1,52286677	17,2573725	9,0193E-44
C ₄	74,3910159	2,42520386	30,6741289	1,7525E-84
C ₇	10,47818	4,00264427	2,61781446	0,00941933
C ₈	37,4658602	4,04680847	9,25812537	1,2884E-17
C ₉	2,91762629	0,26970009	10,8180397	1,9829E-22
C ₁₅	42,6660887	1,33505303	31,9583475	6,9308E-88

Estadísticas de la regresión		Residuales		
Coefficiente de correlación múltiple	0,99984244	Min.	Mediana	Max.
Coefficiente de determinación R ²	0,99968491	-122,91971	2,06907161	50,5527631
R ² ajustado	0,99545619			
Error típico	17,0520293			
Observaciones	232			

Resumen del Modelo N°3:

Tabla 9. Resumen Modelo N°3 para cálculo de poder calorífico del gas

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
C ₁	9,08973304	0,00229817	3955,20168	0
C ₂	16,1623717	0,06556671	246,502722	1,102E-285
C ₃	15,0040325	0,08687208	172,714096	1,398E-249
C ₄	22,9719871	0,20691336	111,022251	4,846E-205
C ₅	22,0071231	0,07153131	307,657187	3,124E-308
C ₆	30,343764	0,24462055	124,044214	3,595E-216
C ₇	30,1579501	0,2155998	139,879306	2,869E-228
C ₈	37,2865061	0,2014845	185,058931	1,416E-256
C ₉	2,85097522	0,01341376	212,541144	1,27E-270
C ₁₅	28,7033618	0,08021752	357,819112	0

Continuación Tabla 9. Resumen Modelo N°3 para cálculo poder calorífico del gas

Estadísticas de la regresión		Residuales		
Coefficiente de correlación múltiple	0,99999961	Min.	Mediana	Max.
Coefficiente de determinación R ²	0,99999923	-3,0583484	0,07937989	2,59341501
R ² ajustado	0,99574388			
Error típico	0,84656777			
Observaciones	232			

6.4.2. Modelo matemático para el cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas.

Las tablas 10, 11 y 12, muestran los resultados obtenidos para el valor cuadrado del coeficiente de correlación R² y la prueba estadística “P” para cada uno de los modelos utilizados para el cálculo de eficiencia de la caldera a partir de las variables físicas medidas en las diferentes etapas. El modelo teórico a estimar fue:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 \dots + \beta_{14} X_{14} \quad (23)$$

El modelo se corrió ejecutando el algoritmo computacional de la regresión hacia atrás con la variable eficiencia (Y) en función de todas las variables explicativas (X₁ a X₁₄)

Resumen del Modelo N°4:

Tabla 10. Resumen Modelo N°4 para cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
X ₁	0,00186459	0,00044692	4,17205997	4,3125E-05
X ₂	-0,01813995	0,01535874	-1,18108363	0,23881644
X ₆	-0,01407734	0,00287286	-4,90010772	1,8316E-06
X ₈	0,31595938	0,00625052	50,549278	8,035E-125
X ₉	0,00071651	0,00048267	1,48447265	0,13908315
X ₁₂	-0,00047669	0,00010148	-4,69740125	4,5853E-06
X ₁₄	-1,78038912	0,2349297	-7,57839101	9,0524E-13

Continuación Tabla 10. Modelo N°4 para cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas.

Estadísticas de la regresión		Residuales		
Coefficiente de correlación múltiple	0,99997491	Min.	Mediana	Max.
Coefficiente de determinación R ²	0,99994982	-4,6179236	0,00592437	1,42020748
R ² ajustado	0,99550404			
Error típico	0,62046916			
Observaciones	232			

Resumen del Modelo N°5:

Tabla 11. Resumen Modelo N°5 para cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas.

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
X ₁	0,00107561	0,00037724	2,85127188	0,00475945
X ₂	-0,02899565	0,01266617	-2,28922064	0,02299403
X ₆	-0,01236080	0,00237233	-5,2104119	4,2551E-07
X ₇	-0,52507307	0,05063966	-10,3688114	7,6524E-21
X ₈	0,79292984	0,04619204	17,1659401	8,8784E-43
X ₁₂	-0,00116798	0,00010737	-10,8781603	2,0204E-22
X ₁₄	-2,57808976	0,20921961	-12,3224097	5,2796E-27

Estadísticas de la regresión		Residuales		
Coefficiente de correlación múltiple	0,99998286	Min.	Mediana	Max.
Coefficiente de determinación R ²	0,99996571	-4,36876071	0,03724284	1,069477
R ² ajustado	0,99552036			
Error típico	0,51288977			
Observaciones	232			

Resumen del Modelo N°6:

Tabla 12. Resumen Modelo N°6 para cálculo de eficiencia a partir de las variables físicas

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
X ₁	0,00186741	0,00044811	4,1673226	4,3899E-05
X ₂	-0,01530341	0,01527994	-1,00153626	0,31763874
X ₆	-0,01449412	0,00286672	-5,05599956	8,843E-07
X ₈	0,31694489	0,00623169	50,8601429	1,011E-125
X ₁₂	-0,00047269	0,00010171	-4,64725872	5,7154E-06
X ₁₄	-1,74402088	0,23427016	-7,44448571	2,0271E-12

Estadísticas de la regresión		Residuales		
Coefficiente de correlación múltiple	0,99997467	Min.	Mediana	Max.
Coefficiente de determinación R ²	0,99994933	-4,6351195	-0,0002846	1,42346703
R ² ajustado	0,99552343			
Error típico	0,62211925			
Observaciones	232			

Las tablas 10, 11 y 12, muestran que los modelos N°4, 5 y 6 presentaron coeficientes de correlación $R^2 > 0.90$, resultando las tres correlaciones muy buenas. El modelo N°4 fue descartado por no cumplir en X_2 y X_9 , con el valor P el cual para estas variables es mayor de 0.05; el modelo N°6 fue descartado por no cumplir en X_2 con el valor P y por tener el error típico mayor que el modelo N°5. En resumen, se escoge el modelo N°5, por tener el menor error típico, menores residuales y cumplir con la prueba P para todas sus variables.

El modelo para el cálculo de la eficiencia de la caldera a partir de las variables físicas medidas quedó representado de la siguiente forma:

$$Y = 0,001X_1 - 0,029X_2 - 0,012X_6 - 0,525X_7 + 0,793X_8 - 0,0012X_{12} - 2,578X_{14} \quad (24)$$

Donde (Y) corresponde a la variable eficiencia en función de las variables físicas medidas en la caldera (X_1 a X_{14}) relacionadas en la tabla 6; finalmente quedaron 7 variables de composición en el modelo de las 14 estudiadas.

6.4.3. Modelo matemático para el cálculo de eficiencia combinando las variables físicas y los componentes del gas.

Teniendo en cuenta el modelo N°3 definido para el cálculo del poder calorífico a partir de los componentes del gas y el modelo N°5 para cálculo de eficiencia de la caldera a partir de las variables físicas medidas en la caldera, se combinan los dos modelos mediante la variable en común X_1 y se obtiene el modelo matemático donde se puede evaluar el impacto de los componentes del gas sobre la eficiencia de la caldera a partir de la composición del gas y las temperaturas de las diferentes etapas de la caldera.

Las tablas 13, 14 y 15, muestran los resultados obtenidos para el valor cuadrado del coeficiente de correlación R^2 y la prueba estadística “P” para cada uno de los modelos utilizados para el cálculo de eficiencia de la caldera teniendo en cuenta los componentes del gas y las variables físicas medidas en las diferentes etapas.

Resumen del Modelo N°7:

Tabla 13. Resumen Modelo N°7 para el cálculo de eficiencia de la caldera

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
C_1	0,02980455	0,00852954	3,49427357	0,000572786
C_2	0,08826191	0,03216567	2,74397885	0,006561759
C_5	0,07551884	0,03633832	2,07821475	0,038828759
C_7	0,38250449	0,11101958	3,44537867	0,00068074
C_8	0,29471934	0,14876343	1,98112761	0,048800131
X_6	-0,015328	0,00348051	-4,40394744	1,64686E-05
X_8	0,3063862	0,00383491	79,8939811	1,3204E-166
X_{12}	-0,00036348	0,00010086	-3,60379384	0,000386415
X_{14}	-1,70538474	0,23072949	-7,39127333	2,86463E-12

Continuación Tabla 13. Resumen Modelo N°7 para el cálculo de eficiencia de la caldera

Estadísticas de la regresión		Residuales		
Coefficiente de correlación múltiple	0,99997593	Min.	Mediana	Max.
Coefficiente de determinación R^2	0,99995186	-4,5250464	0,01853743	1,49287609
R^2 ajustado	0,99548586			
Error típico	0,61037795			
Observaciones	232			

Resumen del Modelo N°8:

Tabla 14. Resumen Modelo N°8 para el cálculo de eficiencia de la caldera

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
C ₁	0,02389906	0,00687027	3,47861956	0,000604517
C ₂	0,0712499	0,03061645	2,32717697	0,020840554
C ₁₅	0,18241649	0,03809392	4,78859895	3,03763E-06
X ₆	-0,01817758	0,00335827	-5,41278248	1,58029E-07
X ₈	0,31149321	0,00343881	90,5817184	1,3179E-179
X ₁₂	-0,00036243	9,1027E-05	-3,98153689	9,23164E-05
X ₁₄	-1,62034609	0,22942412	-7,06266677	1,99618E-11

Estadísticas de la regresión		Residuales		
Coefficiente de correlación múltiple	0,99997595	Min.	Mediana	Max.
Coefficiente de determinación R^2	0,99995191	-4,5250464	0,00308551	1,42516926
R^2 ajustado	0,99552585			
Error típico	0,60738166			
Observaciones	232			

En las tablas 13, 14 y 15, se observa que los modelos N°7, 8 y 9 presentaron coeficientes de correlación $R^2 > 0.90$, presentando las tres correlaciones muy buenas y también cumplen con el valor P el cual para todas las variables es mayor de 0.05; el modelo N°9 fue descartado por tener el mayor error típico que los modelos N°7 y 8. Se escoge el modelo N°8 por presentar menor error típico, menor residual y cumplir con la prueba P para todas sus variables.

Resumen del Modelo N°9:

Tabla 15. Resumen Modelo N°9 para el cálculo de eficiencia de la caldera

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	N/A	N/A	N/A
C ₁	0,0505319	0,00791729	6,3824699	9,695E-10
C ₂	0,1574623	0,03432809	4,58698088	7,43588E-06
C ₁₅	0,30260568	0,04193403	7,21623212	7,94096E-12
X ₆	-0,01729948	0,00235773	-7,33735934	3,83594E-12
X ₇	0,33958407	0,00446525	76,0503347	1,7102E-163
X ₁₄	-1,09710533	0,23215702	-4,72570382	4,02192E-06

Estadísticas de la regresión		Residuales		
Coefficiente de correlación múltiple	0,99996611	Min.	Mediana	Max.
Coefficiente de determinación R ²	0,99993222	-4,5250464	0,00139594	2,11440012
R ² ajustado	0,99552544			
Error típico	0,71945504			
Observaciones	232			

Finalmente, el modelo para el cálculo de la eficiencia de la caldera a partir de las variables de composición y físicas medidas quedó representado de la siguiente forma:

$$Y = 0,0239C_1 + 0,0712C_2 + 0,1824C_{15} - 0,0182X_6 + 0,3115X_8 - 0,00036X_{12} - 1,620X_{14} \quad (25)$$

Donde (Y) corresponde a la variable eficiencia en función de los componentes del gas (C1, C2 y C15) y de las variables físicas medidas en la caldera (X6, X8, X12 y X14) relacionadas en la tabla 5.

6.5. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Las figuras 71 a la 77, muestran los gráficos de validación de cada uno de los supuestos del modelo matemático de regresión escogido para el cálculo de la eficiencia de la caldera. Cada figura presenta en el extremo izquierdo el gráfico de probabilidad normal y el histograma de los residuales, a la derecha se presenta

el gráfico de los residuales frente a la bondad del ajuste y el orden de las observaciones de cada una de las variables explicativas del modelo.

Los gráficos muestran que el modelo cumple con el supuesto de linealidad, supuesto de independencia de los residuos, supuesto de homocedasticidad y el supuesto de normalidad de los residuos para cada variable explicativa; puesto que representan la calidad de la información muestral utilizada, del ajuste de dicha información al modelo teórico y la estabilidad de los datos frente a la estructura que se generaron en relación con el modelo.

Figura 71. Pruebas de validación del modelo para la variable metano

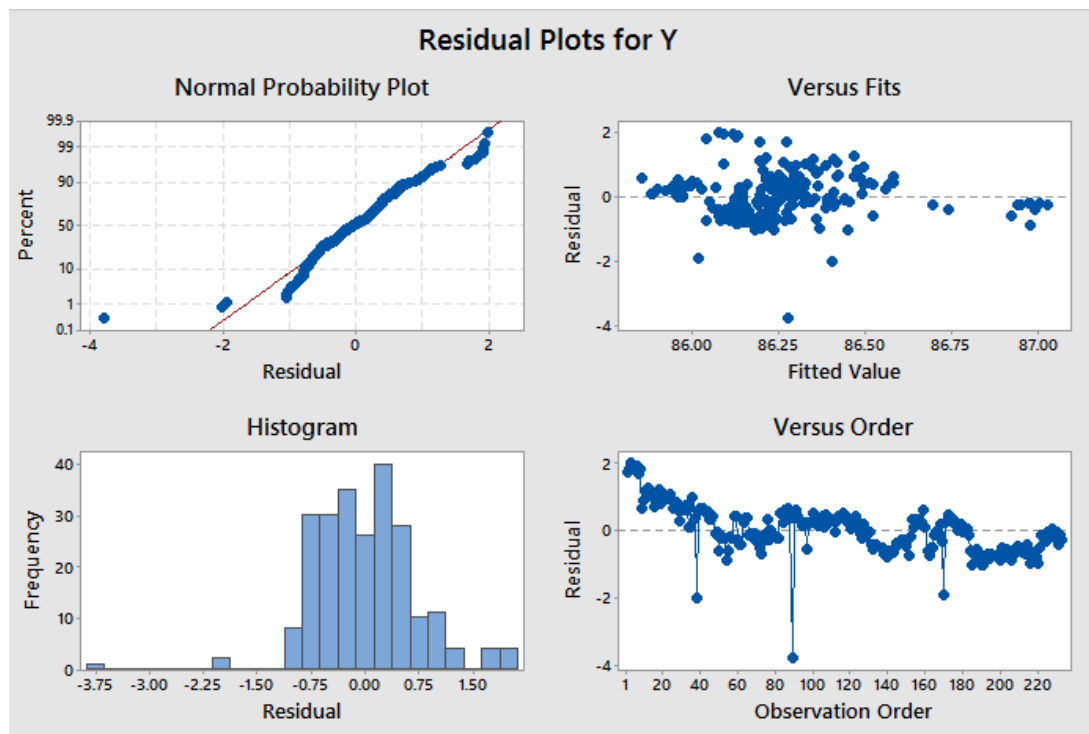


Figura 72. Pruebas de validación del modelo para la variable etano

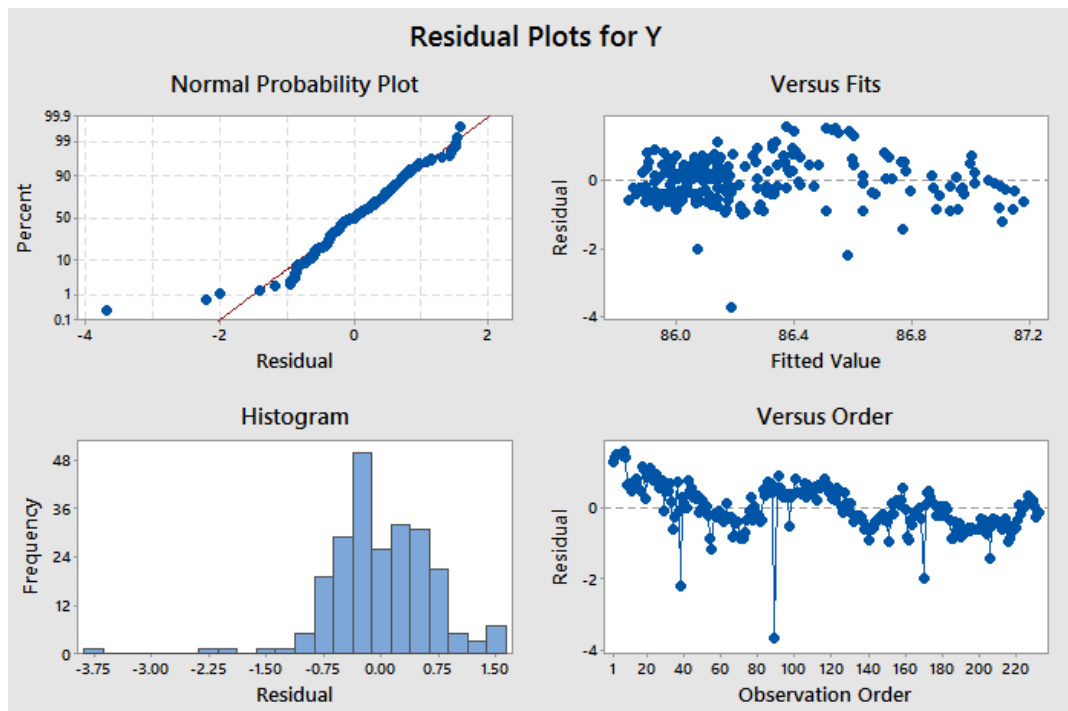


Figura 73. Pruebas de validación del modelo para la variable total olefinas

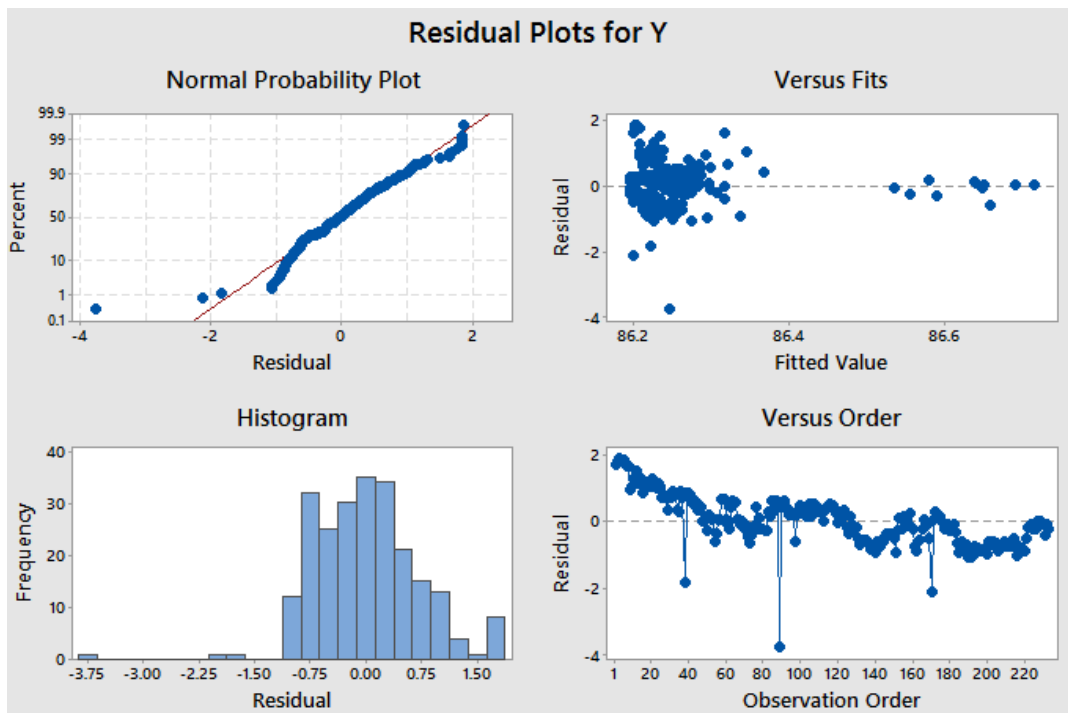


Figura 74. Pruebas de validación del modelo para la variable temperatura de gases de chimenea.

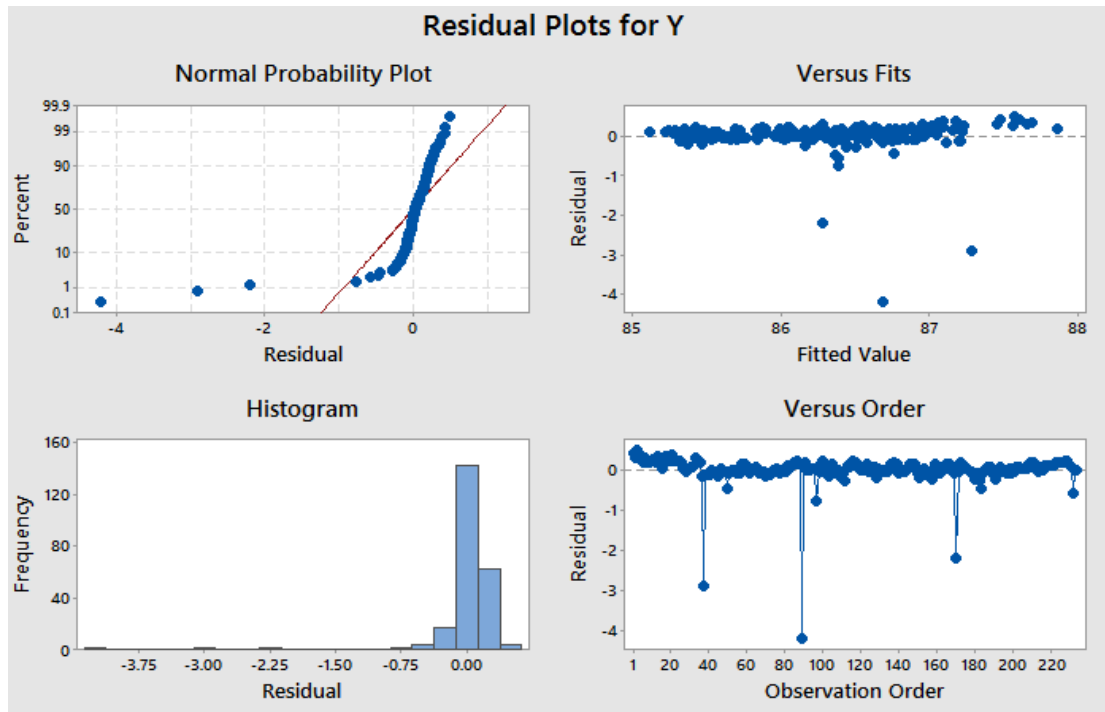


Figura 75. Pruebas de validación del modelo para la variable temperatura de agua de economizador.

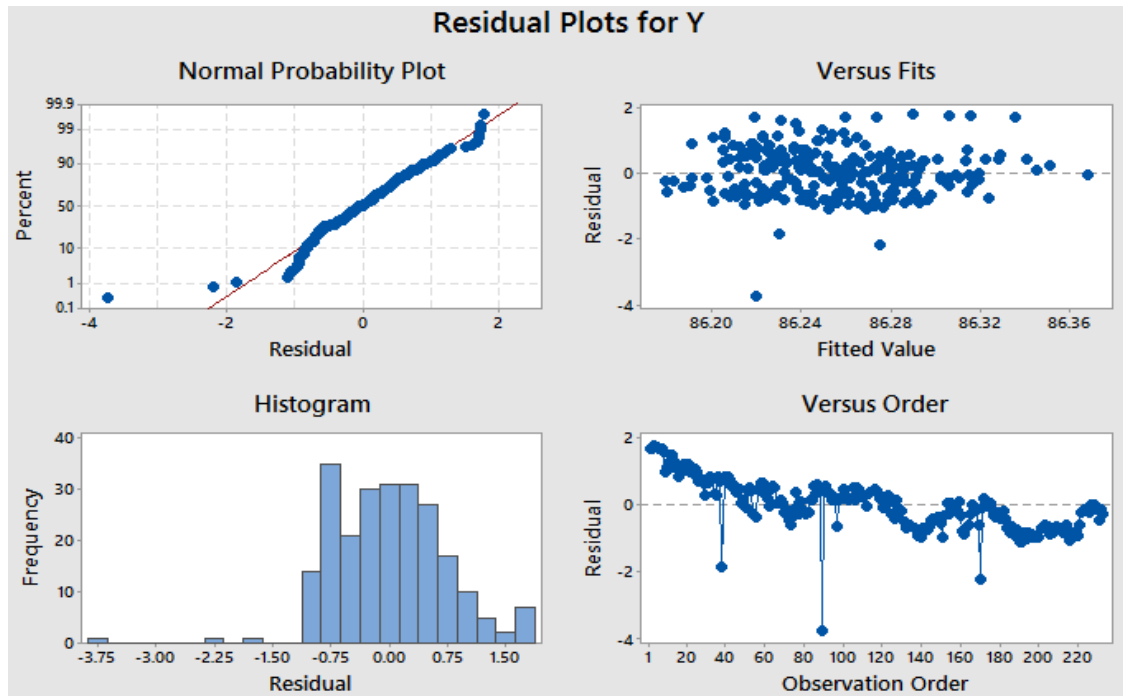


Figura 76. Pruebas de validación del modelo para la variable flujo de gas combustible.

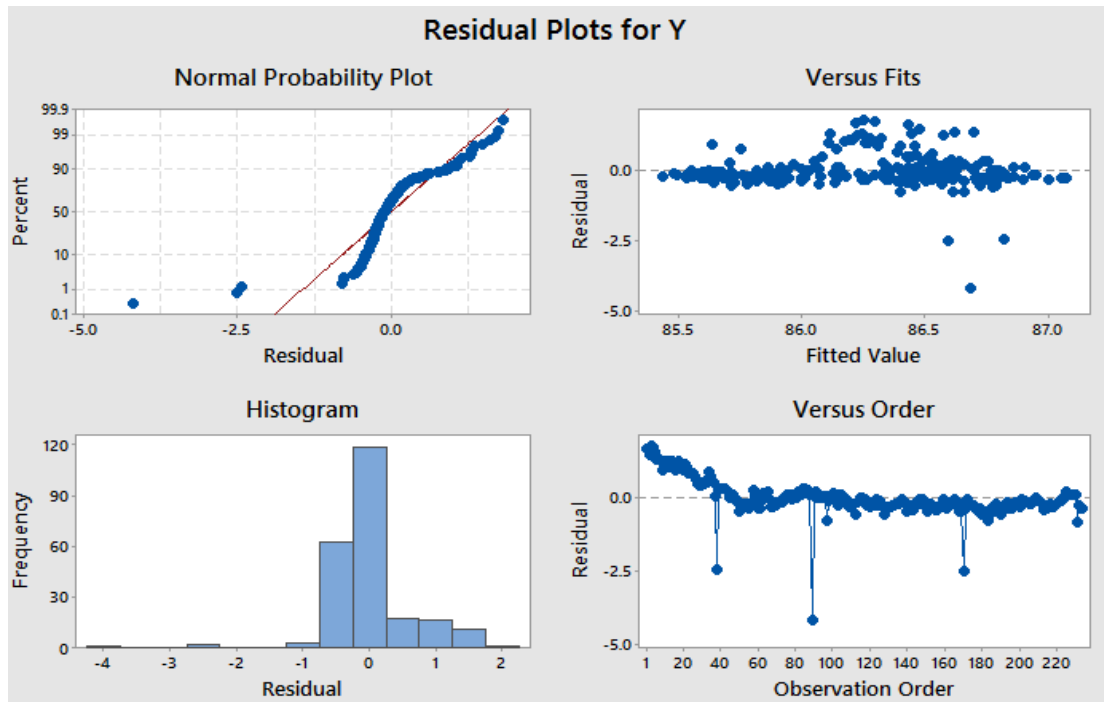
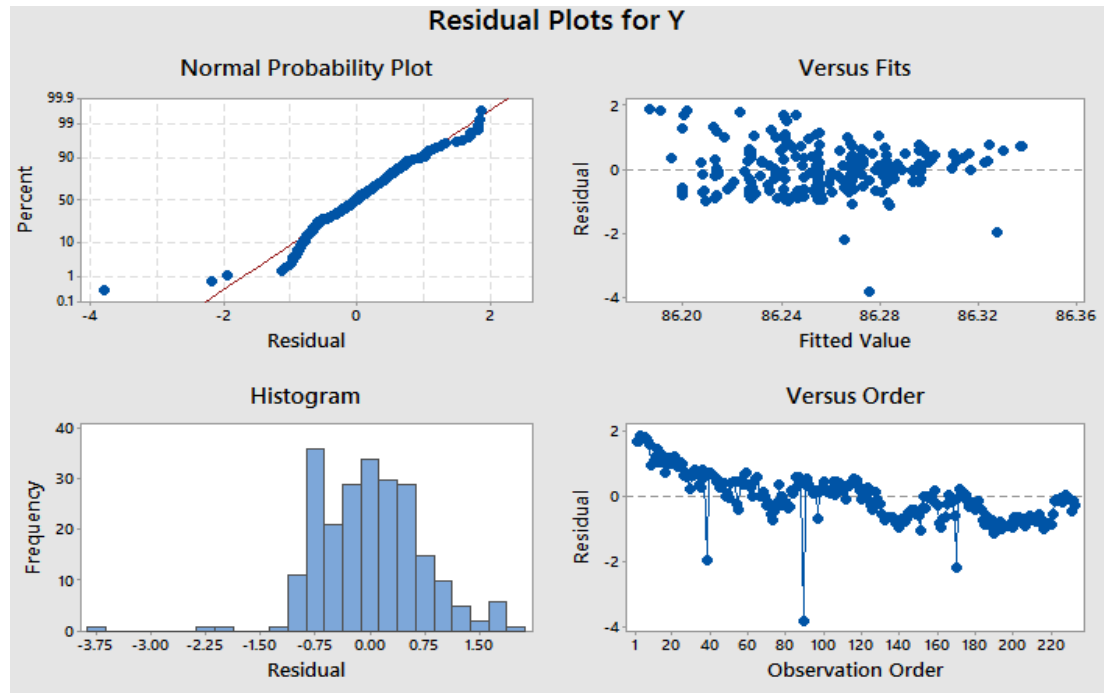


Figura 77. Pruebas de validación del modelo para la variable exceso de Oxígeno



En resumen las figuras 71 a la 77, comprueban efectivamente la validación del modelo teórico, puesto que cumple con los supuestos de:

- **Linealidad.** Los gráficos de probabilidad normal de cada una de las variables explicativas, muestran que los residuales tienen una distribución normal teórica, puesto que la mayoría de los valores se acercan a la línea recta.
- **Normalidad:** Los gráficos histogramas de cada una de las variables explicativas, muestran que las proporciones acumuladas de las variables esperadas respecto a las proporciones acumuladas de las variables observadas presenta una distribución normal.
- **Independencia.** Los gráficos de dispersión de cada una de las variables explicativas muestran que más del 95% de los residuos oscilan entre 2 y -2, por lo que se considera que existe independencia entre los residuos.
- **Homocedasticidad.** Los gráficos de dispersión de los residuos con respecto al orden de las observaciones muestran que los residuos son uniformes en todo el rango de valores de los pronósticos del comportamiento de las variables.

Una vez validado el modelo teórico se realizaron pruebas de verificación con el proceso en línea para su comprobación. La tabla 16 presenta la composición del gas de entrada a la caldera en cuatro escenarios de producción diferentes, utilizada para la verificación del modelo matemático con respecto al proceso real.

Tabla 16. Composiciones del gas utilizado para la validación del cálculo de eficiencia de la caldera

Componente	Unidad	Composición 1	Composición 2	Composición 3	Composición 4
Hidrogeno	%mol	15,79	22,46	14,85	14,92
Oxígeno	%mol	0,48	0,03	2,00	0,04
Nitrógeno	%mol	4,15	2,62	10,78	1,99
Monóxido de Carbono	%mol	0,59	0,85	0,60	0,59
Dióxido de Carbono	%mol	0,19	0,67	0,16	1,20
Metano	%mol	70,16	57,48	62,16	70,35
Etano	%mol	3,85	5,34	4,51	4,95
Etileno	%mol	1,21	1,50	0,98	0,85
Propano	%mol	0,86	2,15	1,32	1,66
Propileno	%mol	1,31	2,63	1,07	0,82
Isobutano	%mol	0,33	0,91	0,37	0,52
N-Butano	%mol	0,27	0,90	0,31	0,44
Isopentano	%mol	0,16	0,60	0,22	0,44
Total Olefinas	%mol	0,67	1,85	0,66	0,62
H ₂ S	%mol	0,00	0,00	0,00	0,60
Potencia Calorífica	BTU/ft ³	854,90	933,00	797,10	894,80
Peso Molecular	gr/mol	16,29	17,24	17,66	16,33
Densidad relativa	NA	0,56	0,60	0,61	0,56

La tabla 17 presenta la temperatura de gases de chimenea, temperatura del agua del economizador, el flujo de gas, exceso de oxígeno y la eficiencia de acuerdo a cada escenario estudiado, estas mediciones fueron registradas en el DCS de la caldera; la eficiencia calculada se hizo con el modelo matemático presentando en la ecuación (25). Los resultados de eficiencia muestran que la composición 4 presenta la mayor eficiencia medida en DCS y calculada con el modelo, lo cual se debe al contenido de metano está 70,35 %mol, el hidrógeno en 14,92 %mol y el total olefinas en 0,62%mol; los cuales son concentraciones muy buenas para la combustión.

Los resultados también muestran que la composición 2 presenta la menor eficiencia medida en DCS y en la calculada con el modelo, debido a que la

concentración de hidrógeno está en 22,46 %mol, el metano en 57,48 %mol y el total olefinas en 1,85 %mol; que evidencia altos desvíos de etano etileno y GLP aumentando el índice de Wobbe y por tanto la eficiencia de la combustión disminuyó.

Tabla 17. Resultado de la evaluación del cálculo de eficiencia de la caldera

Componente	Unidad	Composición 1	Composición 2	Composición 3	Composición 4
Carga de la caldera	Lb/h	146600	160800	144080	129750
Gases a Chimenea	°F	375,89	383	385,96	353,71
Agua de Economizador	°F	307,32	305,83	311,04	306,61
Flujo de Gas	KPCED	5060,25	5164	5358,55	4243,87
Exceso de Oxígeno	%	1,94	2,32	2,35	2,06
Eficiencia medida en DCS	%	85,94	85,29	85,66	86,34
Eficiencia calculada	%	85,98	84,76	86,05	86,35

Los resultados de eficiencia arrojados en el DCS de la caldera y los calculados con el modelo matemático, demuestran que los valores de eficiencia son muy similares con una diferencia entre 0.01% a 0.5%, lo cual es un porcentaje de confianza suficientemente aceptable, ratificando que el modelo funciona y que con el modelo propuesto, se puede predecir la afectación en la eficiencia de la caldera, con relación a la variación que pueda tener la composición del gas combustible.

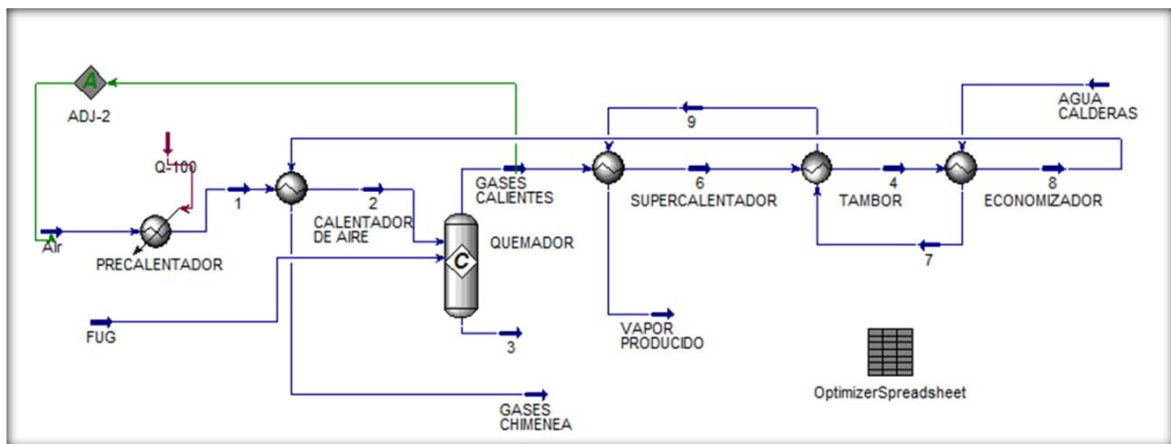
La validación del modelo y su verificación permitió demostrar que el uso de correlaciones matemáticas en el modelo de la eficiencia está muy relacionado con el contenido de metanos, etano, total olefinas y exceso de oxígeno presentes en el gas combustible, así como las variables físicas incorporadas en el modelo y que éste permite la predicción y monitoreo de la eficiencia de la caldera en la unidad.

6.6. HERRAMIENTA PARA CALCULO Y MONITOREO DE LA EFICIENCIA DE LA CALDERA.

Con el objeto de tener un seguimiento y anticiparse a los cambios de la eficiencia de la caldera con respecto a la variación de la composición del gas, se entrega

una herramienta de cálculo realizada con el software Aspen Hysys, que permite calcular la eficiencia de la caldera mediante la composición del gas de entrada, la producción de vapor y el flujo del gas de entrada. La figura 78 se presenta la pantalla de inicio del software para el cálculo de la eficiencia energética de la caldera.

Figura 78. Pantalla de inicio del software para cálculo de eficiencia.



La herramienta desarrollada permite calcular la eficiencia energética de forma sencilla, donde con el resultado se podrá predecir el impacto sobre la eficiencia de acuerdo a la corriente de gas que va entrar a los quemadores de la caldera, así se podrá facilitar el análisis para la toma de decisiones en cuanto al uso del gas de carga a la unidad y anticiparse a los cambios operativos de la unidad. El haber escogido un modelo y diseñado esta herramienta de cálculo es de gran aporte para el departamento de Servicios Industriales de Balance, puesto que su uso permite mejorar el proceso de generación de vapor en la unidad.

6.6.1. Descripción del software de evaluación de la eficiencia de la caldera.

Para el cálculo de eficiencia de la caldera, se diseñó en Aspen Hysys el archivo denominado "Cálculo de la eficiencia de la caldera", dicho software reproduce los resultados del modelo encontrado en Excel, el cual se validó y permite calcular la eficiencia en los siguientes pasos:

Paso 1. Introducción de variables para el cálculo. El usuario debe ingresar al software Aspen hysys y abrir el archivo “Cálculo de la eficiencia de la caldera”, dar doble click en el la figura “QUEMADOR” e introducir en la hoja “Worksheet” en el campo “Composition” los datos de composición del gas que se va a quemar en la caldera en unidades de %mol, registrar también en “Conditions” el consumo de gas que registra el DCS para la producción de la caldera en Lbmol/h en el campo “Mass Flow [lbmole/hr]” como se muestran en las figura 79; en el “ECONOMIZADOR” en la hoja “Worksheet” debe registrar en el campo “Conditions” la carga de vapor a producir en Lb/h en la opción “Mass Flow [lb/hr]” como se muestran en las figura 80, el consumo de agua se asume igual que la carga de vapor; y en analizador (ADJ-2) el exceso de oxígeno en %, en el campo “Specified Target Value” como se muestran en las figura 81.

Paso 2. Cálculo de la eficiencia de la caldera. En este paso el usuario debe oprimir el botón “OptimizerSpreadsheet”, el cual se encuentra en la parte inferior derecha. Inmediatamente el programa desplegará una ventana, donde se debe ubicar en la hoja “Spreadsheet” para visualizar la eficiencia de la caldera como se muestra en la figura 82.

6.2. BENEFICIO EN AHORRO POTENCIAL DE COMBUSTIBLE

Para el beneficio en ahorro potencial de combustible se estimó que el proceso aplicará las mejores dietas de gas para quemar en las calderas, es decir composiciones de metano entre 70 y 80%; desvíos de etano etileno con concentraciones entre 4.5 %mol y 6.0 %mol de etano y 1%mol a 4%mol de etileno; propanos y butanos con concentraciones cercanos a 1.5 %mol de propano y 3.5 %mol de propileno y para los componentes n-butano e iso-butano con valores de desvíos entre 0.6 %mol y 1 %mol; con estos controles el proceso permite mantener excesos de oxígenos bajos entre 1.5 y 1.8%, rangos donde se obtiene las mejores eficiencias como se observó en las figuras 53 a la 62.

Figura 79. Registro de composición del gas.

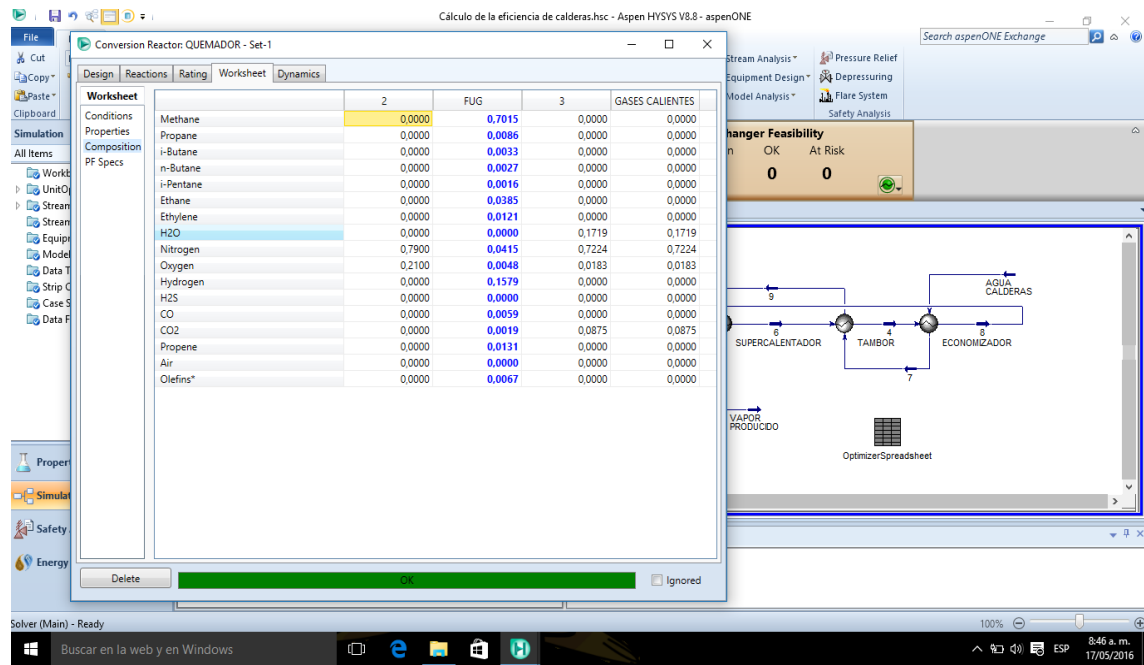


Figura 80. Registro de la carga de la caldera.

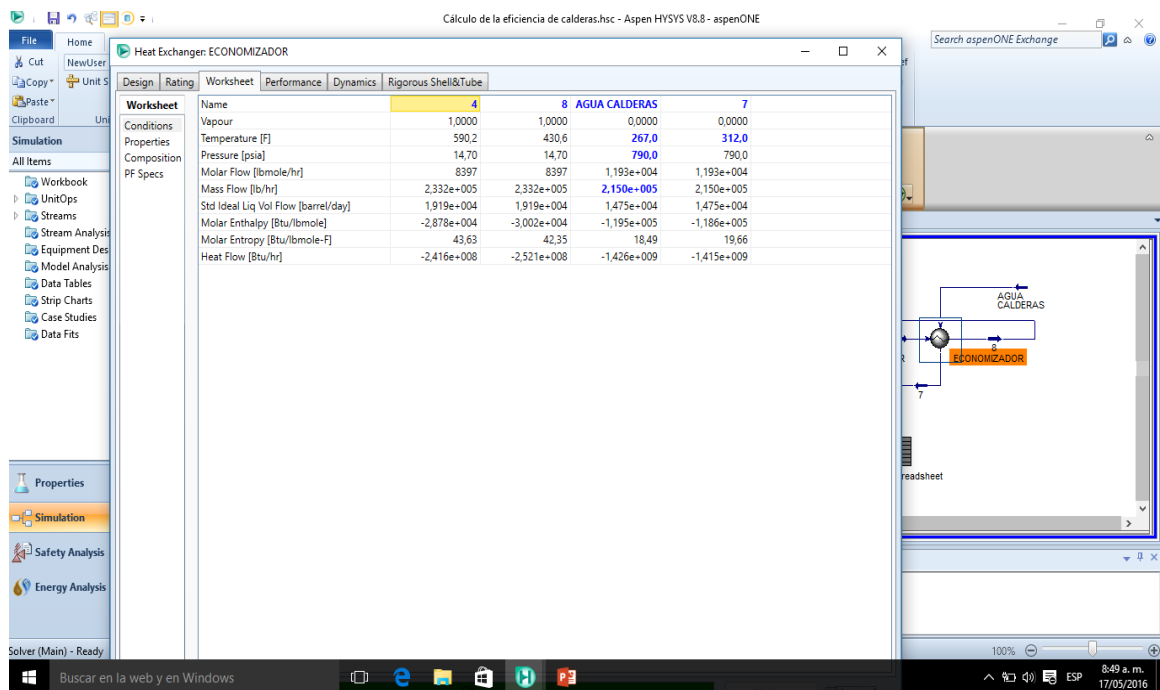


Figura 81. Registro de Exceso de Oxígeno.

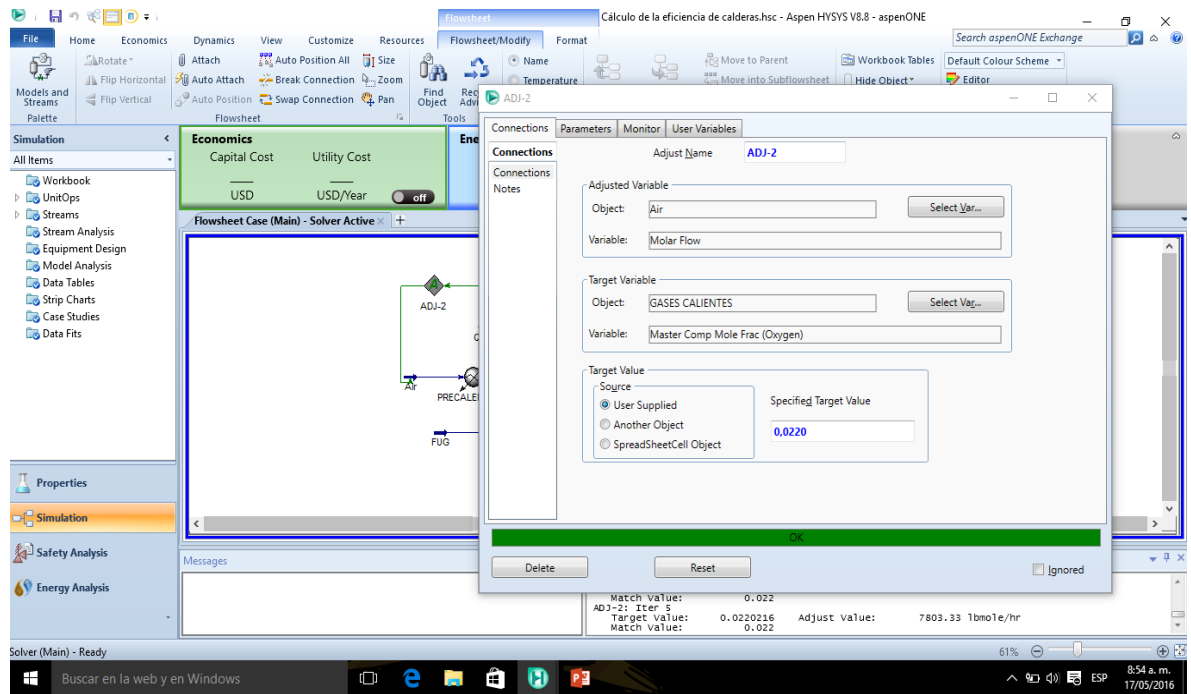
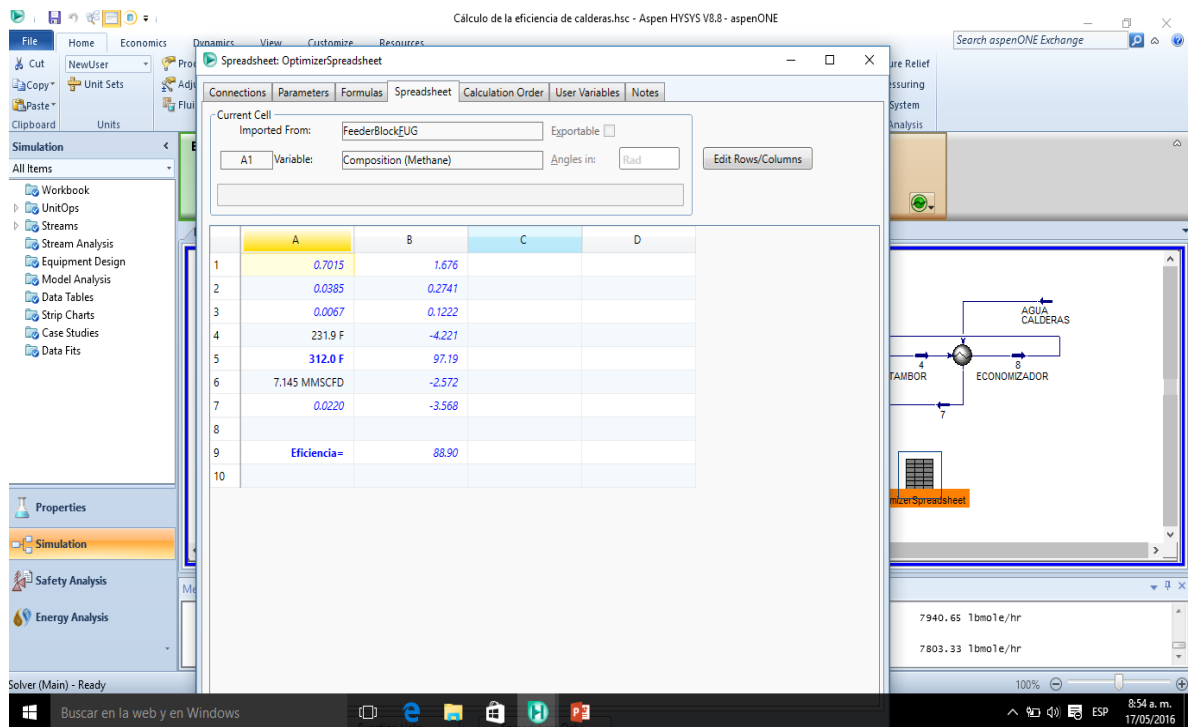


Figura 82. Visualización Eficiencia de la caldera.



Tomando como caso base que el control de exceso de oxígeno en la caldera se encuentra en 2.5 % y logrando una adecuada optimización de la combustión se puede alcanzar un ahorro potencial de combustible del 0.5%. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 18.

Tabla 18. Resultado del ahorro potencial de combustible del caso estudio.

Comparación	Producción (Klbh)	Consumo de gas (MBTUD)	Oxígeno (%O ₂)	Temperatura (°C)	Ahorro Potencial de combustible (%)
Lectura antes del ajuste	230	6495,90	2,5	155	0,7
Lectura después del ajuste	230	6463,42	1,8	124	0,2
Ahorro Potencial en combustible	NA	32,48	NA	NA	0,5

La tabla 19 presenta el beneficio económico que representa una disminución de 2,5% a 1,8% de exceso de oxígeno en la caldera, para la base de cálculo se tomó el costo de gas de refinería del departamento de Servicios Industriales de Balance, reportado por el departamento de economía y gestión de la Gerencia Refinería Barrancabermeja (GRB) en el mes de abril de 2016.

Tabla 19. Beneficio económico por ahorro potencial de gas en las calderas

Descripción	Beneficio
Costo PIB PCO \$/KPC	\$ 7.621
Poder Calorífico MBTU/KPC	0,885
COP/MBTU	\$ 6.745
Ahorro de Caldera MBTUD	32,48
Beneficio Económico al año por caldera	\$ 78.861.869,46

Teniendo en cuenta que la unidad de servicios industriales de Balance trabaja con cinco (5) calderas, tendría un beneficio cerca a los cuatrocientos millones de pesos al año (\$400 MCOP) y lo más importante es que no requiere una inversión adicional diferente a la implementación de una cultura energética, fundamentada en el entendimiento y aplicación de buenas prácticas de optimización del proceso de combustión.

CONCLUSIONES

Mediante el análisis estadístico del comportamiento de las variables del proceso de generación de vapor y su correlación con la eficiencia de la caldera de la unidad de Servicios Industriales de Balance, se logró identificar las mejores dietas de gas combustible que se requieren para obtener la mayor eficiencia, la cual se alcanza en composiciones de metano entre 70 y 80%; etano entre 4.5 %mol y 6.0 %mol, etileno entre 1%mol a 4%mol, propano con concentraciones cercanas a 1.5 %mol y propileno al 3.5 %mol, para los componentes n-butano e iso-butano con valores entre 0.6 %mol y 1 %mol.

La eficiencia de la caldera se correlacionó con los parámetros de operación mediante correlaciones múltiples y regresiones lineales, escogiendo el modelo que presentó mejor correlación y ajuste de datos, el cual permitió evaluar el comportamiento de la eficiencia teniendo en cuenta la composición del gas de entrada. El modelo obtenido da suficiente confiabilidad para tomar decisiones en el proceso de combustión de la caldera en lo que tiene que ver con la determinación del gas a quemar y los ajustes de exceso de oxígeno requeridos.

La herramienta de software de trabajo Aspen Hysys permitió desarrollar la simulación del proceso e incorporación del modelo matemático de la eficiencia térmica de la caldera escogido, con lo que se deja una herramienta útil de trabajo para anticiparse antes los cambios de composición de gas combustible a quemar en la unidad y su influencia en la eficiencia. Para otros estudios más precisos de energías de radiación y convección de la caldera, se recomienda que la herramienta sea complementada incluyendo el hogar, banco de tubos y el tambor de lodos de forma independiente.

Los resultados de este estudio dejaron en evidencia las afectaciones que presentan los desvíos no controlados de etano etileno, propanos y GLP, en la eficiencia de la caldera. Sin embargo, también se concluyó que estos desvíos realizándose de manera controlada y manteniendo unas composiciones adecuadas pueden mejorar la eficiencia de la combustión de la caldera, logrando así optimizar el proceso de generación de vapor de la unidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN GAS ASSOCIATION. White Paper on Natural Gas Interchangeability And Non-Combustion End use. Natural Gas Council Interchangeability Task Group. 2005.
2. AMERICAN GAS ASSOCIATION. AGA. Interchangeability of other fuel gases with natural gases. *Research bulletin #36*. In AGA Committee on Mixed Gas Research Joint Committee of Natural Gas Department and Technical Section. Cleveland, Ohio. 1946.
3. CALA, Oscar Mauricio; MERIÑO, Lourdes; KAFAROV, Viatcheslav. Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 2014. Vol. 12.
4. DUKELOW, Sam G. "The control of boilers", ISA Press. 1986.
5. HSIEH, Shih-Chieh; JOU, Chih-Ju G. Using Hydrogen-rich multifuel to improve energy efficiency and reduce CO₂ emission for high-energy furnace. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2009. Vol 28. p. 83-88.
6. LIPTÁK, Béla G. Optimization of unit operations. Readnor, PA: Chilton Book Company. 1987.
7. MEZA, Carlos Alberto. Análisis de la eficiencia en la combustión de gas de refinerías en hornos industriales tipo cabina, mediante estudio de su comportamiento real. Tesis para optar al grado de ingeniero químico. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2002.
8. MONTAÑA, D. Determinación de las propiedades de combustión e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería, Trabajo de maestría, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2011.
9. MONTGOMERY, Douglas C; RUNGER, George C. Applied Statistics and Probability for Engineers. Tercera edición, ed. Editorial John Wiley & Sons. 2002.

10. PERRY, Robert H. Manual del Ingeniero Químico. 6 edición, ed. McGraw-Hill. Vol 1.
11. ROLLE, Kurt C. Termodinámica. Edición. México. Pearson education. 2006. Vol. 6.
12. SERRANO, Juan Carlos; CARRANZA, Yamid Alberto. Análisis Teórico de la combustión en quemadores de gas natural. 2005. Scientia et Technical 3 (29): p. 139-143.
13. STEINMETZ, G.F. The Case for Compatible Standards Between Gas Appliance Performance and Natural Gas Quality. In Spring National Meeting, American Institute of Chemical Engineers. New Orleans. 1988.
14. STEINMETZ, G. F. Revolutionary Path Towards Compatible Requirement Between Gas Appliance Performance and Natural Quality, in Gas Quality and Measurement. Conference Proceeding, Institute of Gas Technology. 1989.
15. UPME y COLCIENCIAS. Informe de eficiencia energética en la generación y distribución de vapor. 2007.
16. WOBBE, G. A. New Definition of the Quality of Gas. L'Industria de gas e degli Acquedotti. 1926. Vol. 30.

ANEXOS
ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observacion	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
1	72,69	5,89	0,06	2,05	0,16	0,65	0,37	0,38	5,73	0,67	11,03	0,10	0,08	0,00	0,13	0,65	872,60
2	77,19	5,61	0,08	2,24	0,21	0,80	0,48	0,30	9,44	0,01	0,63	0,20	2,50	0,00	0,31	0,58	935,30
3	80,68	5,54	0,05	1,81	0,15	0,46	0,30	0,57	6,79	0,04	0,74	0,15	2,57	0,00	0,14	0,58	936,30
4	79,58	5,35	0,06	1,90	0,17	0,49	0,32	0,33	7,58	0,02	0,66	0,17	2,52	0,73	0,13	0,57	919,90
5	77,03	5,46	0,09	2,01	0,23	0,61	0,37	0,42	9,44	0,03	0,60	0,23	2,66	0,62	0,19	0,57	918,90
6	77,98	5,82	0,06	2,15	0,16	0,70	0,42	0,48	8,00	0,06	1,29	0,16	2,57	0,00	0,13	0,58	935,40
7	67,57	4,54	0,04	1,48	0,12	2,14	1,71	0,27	4,83	2,00	8,93	0,19	2,93	0,22	3,03	0,70	952,00
8	82,99	4,68	0,08	1,66	0,15	0,48	0,36	0,31	5,07	0,06	0,89	0,13	2,45	0,58	0,10	0,58	927,20
9	46,46	5,86	3,22	2,94	3,76	1,02	1,03	0,37	20,49	1,76	8,69	0,54	1,41	0,00	2,44	0,67	919,15
10	52,43	6,63	3,50	3,21	4,80	2,90	1,13	0,51	16,93	1,38	0,00	0,60	2,19	0,00	3,78	0,71	1.112,70
11	62,25	8,31	3,60	2,03	2,49	0,57	0,50	0,40	14,59	0,06	1,82	0,72	1,91	0,01	0,76	0,61	966,30
12	54,10	8,34	4,06	3,78	6,51	0,91	0,67	0,41	15,30	0,05	2,28	0,78	1,79	0,07	0,96	0,68	1.051,70
13	63,86	6,94	3,08	2,23	2,16	0,86	0,78	0,29	13,19	0,07	2,11	0,65	1,95	0,74	1,08	0,62	967,30
14	58,13	6,54	2,97	1,97	2,01	0,80	0,64	0,36	13,22	1,52	8,63	0,61	1,83	0,00	0,76	0,64	885,10
15	59,87	6,89	3,28	2,00	2,14	0,85	0,63	0,35	14,71	0,52	5,14	0,72	1,85	0,00	1,05	0,63	928,30
16	61,52	5,90	3,76	1,79	2,02	0,75	0,51	0,54	16,24	0,90	3,09	0,74	0,79	0,47	0,99	0,61	929,80
17	72,60	3,12	1,45	1,31	1,17	0,69	0,52	0,30	14,04	0,55	2,18	0,62	0,60	0,28	0,59	0,57	892,60
18	71,49	4,23	1,42	1,57	1,12	0,67	0,54	0,10	13,89	0,14	2,11	0,68	0,93	0,01	0,78	0,57	903,10
19	53,63	8,39	3,74	1,31	1,07	0,53	0,41	0,28	11,61	6,60	10,30	0,66	0,82	0,00	0,65	0,68	824,40
20	65,67	4,72	1,54	1,85	1,74	0,70	0,55	0,43	15,12	0,44	4,66	0,73	1,02	0,00	0,83	0,60	898,50
21	57,56	4,30	1,80	1,65	1,53	0,64	0,47	0,35	13,10	2,75	14,10	0,62	0,85	0,00	0,29	0,65	783,90
22	72,43	3,92	1,39	1,56	1,06	0,65	0,48	0,33	13,48	0,04	2,20	0,65	0,97	0,58	0,27	0,57	894,70
23	66,73	4,67	1,62	1,92	1,67	0,81	0,51	0,51	16,54	0,04	2,12	0,70	1,00	0,53	0,64	0,58	911,60
24	67,96	4,66	1,96	1,99	1,88	0,85	0,55	0,58	14,86	0,07	2,09	0,81	1,01	0,00	0,73	0,60	937,50
25	62,56	4,25	1,36	2,22	1,51	0,81	2,67	0,48	13,48	1,07	7,08	0,69	0,84	0,32	0,66	0,65	922,40

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observación	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
26	68,85	4,49	1,28	1,89	1,62	0,74	0,53	0,44	13,91	0,28	3,57	0,72	0,99	0,00	0,69	0,60	911,40
27	71,99	3,84	0,86	1,76	1,57	0,69	0,49	0,38	13,39	0,06	2,20	0,75	0,87	0,56	0,60	0,58	910,30
28	65,13	3,04	0,91	1,54	1,62	0,60	0,35	0,37	17,83	3,20	0,00	0,84	0,73	0,00	0,68	0,61	934,10
29	66,98	6,10	3,28	1,65	2,13	0,39	0,66	0,46	13,94	0,04	2,28	0,66	0,78	0,10	0,55	0,60	946,20
30	65,79	5,19	1,35	2,29	3,33	0,52	0,00	0,50	15,46	0,05	2,26	0,84	0,99	0,65	0,77	0,59	929,40
31	65,00	5,00	1,03	2,70	3,56	0,89	0,59	0,37	15,97	0,12	2,93	0,00	1,12	0,34	0,39	0,60	940,60
32	61,33	4,80	1,08	2,63	3,65	0,86	0,59	0,76	14,47	0,92	6,98	0,00	0,98	0,00	0,95	0,65	930,60
33	57,59	7,51	4,42	2,45	3,70	0,76	0,40	0,75	16,52	0,03	2,09	0,00	1,58	1,42	0,77	0,62	979,10
34	52,66	9,42	4,94	2,73	4,14	0,83	0,44	0,67	17,83	0,05	2,99	0,99	1,40	0,00	0,91	0,65	1.000,20
35	58,26	7,07	3,73	1,86	1,93	0,46	0,00	0,59	14,79	0,88	7,23	0,92	1,61	0,00	0,67	0,62	883,40
36	79,58	4,46	0,10	1,83	0,29	0,83	0,46	0,56	8,01	0,06	1,05	0,35	1,83	0,33	0,26	0,58	935,70
37	47,39	8,39	4,75	2,70	4,82	0,92	0,47	0,86	21,51	0,05	2,29	1,05	1,56	2,31	0,91	0,62	967,90
38	58,42	5,80	3,71	2,01	3,74	0,69	0,36	0,55	18,34	0,05	2,38	0,86	1,38	1,05	0,65	0,60	932,40
39	54,20	6,98	3,97	2,32	3,87	1,03	0,56	0,77	19,41	0,04	2,37	0,91	1,55	1,27	0,75	0,61	957,40
40	57,20	8,02	4,19	1,77	2,02	0,77	0,42	0,57	17,39	0,06	2,35	0,92	1,59	2,04	0,69	0,59	925,10
41	53,06	8,68	4,58	2,35	3,27	1,09	0,88	0,58	19,04	0,06	2,47	1,00	0,77	0,28	1,89	0,65	1.007,70
42	65,67	3,43	0,62	1,71	2,26	1,04	1,05	0,40	17,37	0,04	2,48	0,89	0,62	0,16	2,25	0,60	943,80
43	65,68	4,32	0,61	2,06	2,89	1,09	1,08	0,15	15,76	0,09	3,07	0,00	1,02	0,30	1,90	0,61	955,40
44	65,50	3,91	0,72	1,80	2,38	1,10	1,02	0,55	19,06	0,05	0,00	0,92	0,73	0,01	2,26	0,59	967,30
45	65,71	4,14	0,94	1,90	2,54	1,01	0,97	0,64	18,46	0,08	0,00	0,89	0,74	0,07	1,90	0,60	969,50
46	64,52	4,59	0,76	2,03	2,60	1,08	1,00	0,65	18,69	0,06	0,00	0,91	0,85	0,00	2,26	0,60	981,70
47	65,27	4,57	0,62	1,86	2,39	0,96	0,95	0,39	16,30	0,05	2,25	0,82	0,86	0,63	2,09	0,61	951,00
48	58,99	4,80	0,70	2,70	4,49	1,08	0,99	0,71	19,04	0,09	2,43	0,90	0,87	0,01	2,21	0,64	992,10
49	56,08	4,78	1,01	3,49	6,78	1,13	1,03	0,72	17,63	0,08	2,30	0,87	0,79	0,79	2,53	0,67	1.046,40
50	23,45	2,82	3,07	5,47	11,39	2,69	3,28	1,03	32,77	0,03	2,19	1,19	0,27	0,43	9,91	0,83	1.277,00
51	16,55	6,55	6,14	3,44	11,79	1,04	2,30	0,77	34,89	0,03	2,34	1,26	1,30	1,95	9,66	0,78	1.192,10

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observacion	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
52	18,09	6,71	6,51	3,81	13,39	1,19	2,76	0,87	27,74	0,04	2,66	1,40	1,45	2,20	11,17	0,86	1.304,60
53	19,98	8,13	7,60	4,28	14,69	1,32	2,79	1,01	21,39	0,08	3,00	1,65	1,60	0,01	12,47	0,96	1.431,00
54	19,92	7,90	7,41	4,05	14,00	1,24	2,62	0,81	20,73	0,12	3,49	1,69	1,61	2,71	11,69	0,92	1.364,20
55	50,51	8,96	6,09	2,53	5,85	0,65	0,87	0,81	14,35	0,05	2,51	0,92	1,57	1,30	3,04	0,71	1.087,30
56	19,71	7,89	7,22	5,85	14,51	2,63	3,89	0,42	18,27	0,08	3,03	1,10	1,31	1,00	13,08	1,01	1.509,00
57	22,11	8,10	7,60	5,55	13,91	2,24	3,54	0,76	17,96	0,05	2,90	1,04	1,30	1,75	11,19	0,97	1.454,70
58	51,24	8,94	6,09	2,52	6,17	0,49	0,61	0,77	15,13	0,02	2,37	0,88	1,50	1,26	2,03	0,69	1.058,80
59	46,62	8,80	6,27	2,60	5,86	0,67	0,98	0,77	17,45	0,03	3,05	0,95	1,60	1,21	3,16	0,70	1.068,00
60	21,70	7,54	6,95	5,21	13,63	1,97	3,48	0,74	18,56	0,12	3,92	1,05	1,27	2,36	11,49	0,96	1.417,70
61	18,88	8,16	7,59	5,51	13,89	2,11	3,36	0,88	20,68	0,00	2,92	1,64	1,34	1,64	11,41	0,96	1.435,30
62	35,81	6,29	6,09	4,51	11,66	1,57	3,09	0,45	15,70	0,00	3,10	0,00	1,21	1,48	9,05	0,88	1.337,50
63	48,02	6,10	6,07	2,63	7,01	0,80	1,35	0,55	16,66	0,00	3,98	0,00	1,33	1,19	4,31	0,72	1.094,70
64	52,32	9,22	6,23	2,09	4,45	0,48	0,61	0,67	16,58	0,00	2,55	0,55	1,62	0,65	1,98	0,66	1.025,60
65	50,55	9,03	5,99	2,26	4,54	0,58	0,81	0,70	16,24	0,00	4,72	0,00	0,55	1,45	2,58	0,68	1.033,20
66	55,10	9,17	5,82	2,19	4,15	0,47	0,59	0,67	15,25	0,00	2,70	0,00	1,68	0,34	1,87	0,66	1.030,00
67	56,02	8,91	5,30	2,23	4,50	0,44	0,57	0,62	14,67	0,00	2,47	0,00	1,64	0,90	1,74	0,66	1.026,50
68	38,88	7,67	5,96	3,83	11,48	0,90	2,26	0,39	13,47	0,06	2,76	0,86	1,49	1,41	8,57	0,86	1.302,20
69	59,57	6,34	4,93	1,79	5,73	0,34	0,68	0,23	11,18	0,04	2,46	0,70	1,48	1,49	3,03	0,68	1.043,80
70	59,71	7,60	5,26	2,45	5,66	0,44	0,57	0,42	11,69	0,07	2,59	0,70	0,72	0,60	1,52	0,68	1.049,00
71	63,94	8,04	4,93	1,96	3,72	0,44	0,59	0,40	10,50	0,04	2,38	0,67	0,82	0,00	1,56	0,67	1.033,70
72	67,35	6,09	3,58	1,65	2,86	0,39	0,53	0,28	10,38	0,36	3,81	0,63	0,76	0,00	1,34	0,64	971,90
73	66,62	4,00	1,40	1,56	2,82	0,29	0,42	0,11	9,55	1,80	9,27	0,54	0,62	0,00	1,01	0,65	871,30
74	77,06	3,40	0,86	1,19	1,39	0,29	0,44	0,14	10,46	0,06	2,42	0,63	0,71	0,02	0,94	0,58	911,00
75	71,35	3,55	0,98	1,05	1,34	0,30	0,47	0,10	15,30	0,18	2,96	0,66	0,68	0,00	1,09	0,56	876,40
76	61,39	4,64	1,54	1,73	2,39	0,44	0,65	0,36	20,81	0,10	2,66	0,78	0,95	0,00	1,55	0,57	898,90
77	66,94	4,11	1,64	1,30	2,14	0,20	0,30	0,23	18,98	0,04	2,18	0,53	0,74	0,13	0,55	0,55	869,25

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observación	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
78	63,67	3,93	2,18	1,46	2,94	0,23	0,27	0,22	20,59	0,06	2,70	0,69	0,40	0,00	0,68	0,55	874,30
79	70,06	3,35	1,47	1,38	2,27	0,57	0,55	0,31	17,43	0,06	0,00	0,82	0,24	0,00	1,50	0,57	933,10
80	69,81	3,92	1,08	1,60	2,04	0,65	0,72	0,42	16,36	0,05	0,00	0,94	0,85	0,00	1,56	0,58	945,30
81	72,89	4,27	1,18	1,44	1,31	0,46	0,40	0,47	14,88	0,07	0,00	0,75	0,76	0,40	0,73	0,56	918,70
82	71,15	4,21	1,19	1,72	1,01	0,60	0,41	0,55	14,66	0,05	2,29	0,77	0,79	0,11	0,49	0,57	902,10
83	88,56	2,04	0,13	0,60	0,23	0,27	0,12	0,28	5,31	0,09	1,50	0,12	0,61	0,00	0,14	0,56	900,10
84	76,59	2,43	0,72	0,86	1,16	0,32	0,20	0,29	15,96	0,21	0,00	0,47	0,44	0,00	0,34	0,53	873,10
85	71,32	2,81	0,87	0,95	1,40	0,33	0,22	0,17	17,81	0,23	2,33	0,58	0,57	0,00	0,40	0,53	844,80
86	70,48	2,68	0,69	1,08	1,76	0,45	0,43	0,26	17,41	0,06	2,42	0,59	0,58	0,18	0,93	0,55	870,40
87	70,58	3,19	0,73	1,36	1,92	0,54	0,50	0,29	18,18	0,06	0,00	0,61	0,74	0,34	0,97	0,54	899,10
88	66,47	3,69	1,09	1,67	2,49	0,59	0,62	0,41	19,36	0,08	0,00	0,80	0,94	0,55	1,25	0,56	916,30
89	67,12	3,38	0,85	1,58	2,30	0,56	0,60	0,36	18,04	0,05	2,12	0,62	0,78	0,37	1,27	0,57	900,70
90	65,71	3,10	0,79	1,72	2,73	0,69	0,73	0,31	18,45	0,06	2,31	0,63	0,65	0,34	1,78	0,58	916,80
91	70,44	1,82	0,75	1,18	1,93	0,43	0,41	0,31	18,03	0,05	2,34	0,59	0,46	0,35	0,90	0,54	864,50
92	69,09	2,78	0,71	1,30	1,97	0,45	0,46	0,34	17,37	0,26	2,62	0,59	0,75	0,46	0,87	0,56	871,10
93	69,63	3,34	0,67	1,28	1,54	0,40	0,31	0,45	18,24	0,07	2,34	0,54	0,77	0,00	0,41	0,54	861,80
94	69,30	2,72	1,05	1,14	1,55	0,35	0,26	0,35	18,95	0,14	2,67	0,63	0,58	0,00	0,32	0,53	844,50
95	72,39	3,17	0,74	1,27	1,93	0,48	0,46	0,34	14,14	0,06	2,47	0,58	0,59	0,43	0,94	0,57	900,70
96	70,36	2,81	0,89	1,24	1,93	0,46	0,46	0,34	12,84	0,17	3,06	0,66	0,35	0,00	0,93	0,65	1.003,00
97	72,47	3,10	0,71	1,29	2,06	0,48	0,48	0,34	13,97	0,08	2,75	0,56	0,22	0,54	0,97	0,58	903,50
98	67,96	3,08	0,91	2,06	3,86	0,75	0,67	0,35	15,25	0,04	2,63	0,80	0,28	0,29	1,07	0,61	944,00
99	68,94	3,17	1,31	2,09	4,21	0,49	0,48	0,35	14,44	0,03	2,50	0,65	0,20	0,12	1,02	0,61	951,00
100	71,35	1,67	0,70	1,95	4,21	0,54	0,61	0,34	13,85	0,05	2,63	0,74	0,14	0,03	1,19	0,61	945,10
101	68,17	2,40	0,49	2,29	4,63	0,66	0,78	0,26	14,70	0,06	2,68	0,70	0,13	0,49	1,57	0,62	960,50
102	67,68	2,48	0,52	2,42	5,01	0,61	0,70	0,31	14,90	0,05	2,56	0,70	0,15	0,38	1,53	0,62	966,60
103	67,88	2,15	0,47	2,16	4,52	0,69	0,85	0,29	13,80	0,43	4,05	0,76	0,16	0,00	1,79	0,63	956,50

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observación	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
104	67,57	3,10	0,83	2,28	4,51	0,58	0,62	0,37	14,35	0,18	3,04	0,74	0,14	0,50	1,19	0,62	953,80
105	63,73	2,62	0,65	2,27	4,92	0,56	0,69	0,17	17,43	0,19	3,74	0,77	0,16	0,67	1,43	0,61	926,70
106	64,95	2,69	0,80	2,38	5,21	0,57	0,64	0,19	17,46	0,07	2,76	0,78	0,26	0,39	0,85	0,60	933,10
107	65,37	2,93	0,51	2,99	5,89	0,64	0,69	0,46	15,35	0,12	2,61	0,79	0,14	0,00	1,52	0,64	992,20
108	64,22	3,14	0,66	3,03	6,15	0,78	0,81	0,43	15,15	0,07	2,45	0,77	0,70	0,00	1,66	0,65	1.004,10
109	64,88	2,79	0,67	2,80	5,95	0,78	0,82	0,51	15,01	0,04	2,50	0,80	0,84	0,00	1,61	0,64	996,70
110	66,61	2,59	0,67	2,65	5,68	0,67	0,80	0,30	14,83	0,03	2,56	0,72	0,18	0,03	1,67	0,64	989,30
111	66,32	2,16	0,84	2,56	5,82	0,66	0,79	0,25	15,06	0,03	2,51	0,71	0,19	0,31	1,78	0,63	984,40
112	66,10	2,50	0,85	2,44	5,32	0,66	0,80	0,30	15,54	0,11	2,80	0,74	0,21	0,04	1,60	0,63	972,70
113	64,08	2,09	0,64	2,22	4,80	0,72	0,85	0,15	17,57	0,27	3,92	0,77	0,22	0,00	1,70	0,61	934,70
114	67,16	2,89	0,94	2,35	5,46	0,74	0,84	0,25	14,14	0,06	2,40	0,70	0,17	0,38	1,52	0,63	986,40
115	66,67	2,27	0,65	2,11	4,72	0,63	0,75	0,16	15,40	0,19	3,63	0,74	0,36	0,00	1,71	0,62	945,90
116	68,07	2,00	0,45	2,00	4,48	0,63	0,72	0,18	15,86	0,07	2,66	0,73	0,20	0,33	1,62	0,60	941,50
117	65,68	2,95	1,03	2,68	6,10	0,78	0,75	0,48	14,21	0,06	2,29	0,74	0,26	0,23	1,76	0,65	1.011,20
118	70,00	2,14	0,73	2,22	4,96	0,68	0,68	0,37	13,26	0,05	2,37	0,66	0,20	0,44	1,24	0,62	970,40
119	66,47	2,63	1,18	2,38	5,72	0,78	0,87	0,34	14,22	0,05	2,36	0,71	0,17	0,11	2,03	0,65	1.006,30
120	72,71	2,13	0,36	1,85	4,55	0,52	0,61	0,22	11,95	0,18	2,42	0,66	0,16	0,35	1,32	0,62	958,10
121	76,70	2,17	0,64	1,10	2,15	0,48	0,41	0,27	12,22	0,05	2,43	0,60	0,17	0,00	0,60	0,58	904,00
122	76,18	2,60	0,68	1,10	1,80	0,37	0,34	0,20	12,47	0,20	2,33	0,58	0,17	0,33	0,65	0,57	892,70
123	75,06	2,17	0,90	1,03	1,86	0,42	0,39	0,26	12,57	0,09	3,27	0,71	0,21	0,38	0,67	0,57	885,50
124	76,54	2,06	0,52	0,98	1,64	0,37	0,34	0,34	12,66	0,09	2,51	0,79	0,33	0,17	0,66	0,57	885,60
125	76,07	2,21	0,85	0,99	1,81	0,36	0,37	0,33	11,66	0,26	3,66	0,58	0,16	0,00	0,68	0,58	890,30
126	77,77	2,13	0,70	0,89	1,59	0,31	0,31	0,27	11,69	0,12	2,37	0,70	0,29	0,34	0,52	0,56	885,20
127	69,73	2,00	1,28	2,16	4,59	0,54	0,68	0,28	13,66	0,05	2,34	0,71	0,12	0,41	1,46	0,62	964,20
128	62,38	2,40	1,01	3,35	7,32	0,83	1,15	0,45	14,95	0,02	2,40	0,86	0,16	0,15	2,58	0,68	1.052,30
129	73,41	2,47	0,49	1,31	2,79	0,45	0,82	0,18	13,42	0,03	2,23	0,53	0,05	0,02	1,81	0,60	941,20

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observación	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
130	77,70	1,81	0,57	0,95	1,81	0,40	0,77	0,20	11,32	0,02	2,22	0,41	0,14	0,16	1,52	0,59	924,50
131	76,33	1,64	0,35	0,91	1,82	0,44	0,82	0,17	12,12	0,15	2,77	0,48	0,25	0,10	1,65	0,59	913,10
132	79,85	1,73	0,71	0,47	0,91	0,20	0,34	0,49	11,43	0,09	2,41	0,46	0,11	0,16	0,64	0,56	880,90
133	80,51	1,52	0,64	0,46	0,83	0,20	0,35	0,26	11,58	0,02	2,39	0,43	0,12	0,13	0,55	0,55	869,90
134	79,53	1,66	0,80	0,54	0,99	0,18	0,32	0,30	12,26	0,01	2,33	0,45	0,06	0,00	0,57	0,55	873,60
135	76,73	1,37	0,74	0,45	0,86	0,17	0,31	0,05	14,92	0,09	2,91	0,52	0,11	0,20	0,56	0,53	835,00
136	76,04	1,50	1,02	0,51	1,06	0,19	0,34	0,06	15,02	0,09	2,91	0,50	0,12	0,00	0,63	0,54	845,00
137	80,10	1,90	0,79	0,63	0,80	0,20	0,35	0,13	11,17	0,17	2,68	0,42	0,12	0,17	0,53	0,56	871,70
138	79,19	2,34	1,10	0,77	0,93	0,29	0,38	0,12	11,32	0,05	2,47	0,39	0,05	0,12	0,47	0,56	882,80
139	79,93	2,40	0,76	0,77	0,83	0,21	0,35	0,09	11,03	0,19	2,34	0,35	0,09	0,12	0,56	0,56	880,10
140	77,00	3,66	0,76	1,10	0,99	0,24	0,39	0,10	12,45	0,05	2,20	0,39	0,04	0,01	0,61	0,56	893,20
141	72,72	3,33	0,82	1,23	0,90	0,54	0,58	0,07	15,70	0,04	2,79	0,51	0,13	0,00	0,63	0,56	874,50
142	74,35	2,90	1,44	1,21	1,07	0,40	0,52	0,17	14,16	0,18	2,32	0,48	0,11	0,05	0,64	0,56	888,50
143	75,31	2,68	1,06	1,05	0,94	0,32	0,44	0,13	13,66	0,17	2,87	0,45	0,10	0,20	0,64	0,56	873,30
144	77,66	2,15	0,64	0,96	0,78	0,35	0,42	0,23	12,72	0,06	2,37	0,41	0,63	0,13	0,51	0,55	872,00
145	76,72	2,89	0,85	0,86	0,89	0,27	0,40	0,12	12,33	0,08	2,56	0,46	0,82	0,18	0,58	0,55	872,80
146	75,53	2,87	0,94	0,87	0,84	0,26	0,40	0,15	12,70	0,16	3,25	0,44	0,96	0,06	0,58	0,56	863,90
147	77,21	3,26	1,86	0,67	1,04	0,17	0,33	0,00	11,95	0,05	2,24	0,43	0,53	0,06	0,22	0,55	875,90
148	76,23	2,48	1,03	0,68	0,98	0,16	0,32	0,29	13,81	0,03	2,40	0,45	0,57	0,17	0,40	0,54	861,80
149	74,83	2,77	1,08	0,90	0,96	0,20	0,39	0,35	14,42	0,04	2,46	0,44	0,75	0,00	0,42	0,55	866,60
150	75,40	2,63	1,24	0,91	0,97	0,21	0,38	0,39	13,73	0,02	2,33	0,45	0,76	0,16	0,42	0,55	872,10
151	83,12	3,61	0,51	1,25	1,43	0,27	0,46	0,00	6,02	0,05	1,49	0,07	1,00	0,19	0,52	0,59	935,50
152	77,59	3,14	0,66	0,86	0,81	0,19	0,38	0,00	12,75	0,00	2,18	0,38	0,61	0,02	0,43	0,55	869,50
153	87,78	3,24	0,01	0,72	0,25	0,14	0,14	0,00	5,53	0,06	1,07	0,00	0,87	0,11	0,09	0,56	898,60
154	93,97	3,10	0,00	0,57	0,00	0,07	0,08	0,15	0,00	0,06	1,09	0,00	0,92	0,00	0,00	0,58	927,60
155	86,78	2,98	0,00	0,71	0,00	0,11	0,13	0,22	7,03	0,00	0,96	0,00	1,06	0,00	0,00	0,55	888,40

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observacion	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
156	89,62	2,68	0,00	0,40	0,00	0,11	0,10	0,11	4,02	0,23	1,80	0,00	0,85	0,00	0,07	0,56	890,90
157	89,82	3,02	0,05	0,42	0,08	0,06	0,05	0,13	4,47	0,00	1,08	0,00	0,80	0,00	0,02	0,56	898,70
158	92,53	1,58	0,00	0,22	0,00	0,05	0,04	0,09	3,36	0,00	1,53	0,00	0,60	0,00	0,00	0,55	887,00
159	95,56	1,71	0,00	0,25	0,00	0,04	0,04	0,09	0,13	0,26	1,26	0,00	0,67	0,00	0,00	0,57	908,20
160	93,67	2,49	0,00	0,59	0,00	0,11	0,12	0,12	0,76	0,01	1,20	0,00	0,93	0,00	0,00	0,57	918,90
161	80,74	3,97	2,42	0,76	1,15	0,29	0,32	0,21	6,24	0,00	2,12	0,55	0,82	0,00	0,41	0,59	934,10
162	80,33	3,59	0,66	0,78	1,30	0,17	0,29	0,08	9,24	0,00	2,07	0,28	0,74	0,00	0,48	0,57	901,30
163	76,80	2,01	0,24	0,80	0,95	0,22	0,32	0,13	14,36	0,01	2,06	0,69	0,88	0,07	0,46	0,53	849,40
164	75,66	3,00	1,00	0,62	0,41	0,18	0,25	0,13	14,74	0,03	2,42	0,54	0,70	0,00	0,34	0,53	844,10
165	73,30	3,33	1,03	0,98	1,71	0,40	0,54	0,12	13,90	0,22	2,02	0,33	0,72	0,09	1,30	0,57	904,90
166	61,96	5,08	2,80	1,49	2,40	0,52	0,46	0,25	19,10	0,02	2,06	0,55	1,47	0,78	1,05	0,56	897,60
167	68,58	4,52	1,75	1,00	1,39	0,34	0,00	0,24	18,26	0,16	1,94	0,66	0,23	0,19	0,74	0,54	889,00
168	91,10	2,82	0,06	0,69	0,15	0,20	0,14	0,19	1,46	0,12	2,25	0,00	0,57	0,03	0,18	0,59	920,90
169	81,82	2,31	0,05	0,63	0,11	0,19	0,10	0,18	12,58	0,02	1,12	0,13	0,54	0,13	0,09	0,52	851,70
170	84,53	2,70	0,06	0,81	0,12	0,22	0,12	0,17	9,52	0,02	1,11	0,13	0,24	0,15	0,10	0,54	880,60
171	83,95	3,25	0,11	0,69	0,29	0,19	0,09	0,30	9,30	0,09	1,37	0,09	0,17	0,00	0,11	0,55	888,30
172	85,81	2,58	0,07	0,54	0,16	0,21	0,10	0,35	8,35	0,07	1,12	0,00	0,18	0,33	0,12	0,55	887,50
173	84,89	1,97	0,06	0,68	0,12	0,24	0,13	0,35	9,50	0,07	1,30	0,00	0,59	0,00	0,09	0,54	875,90
174	81,40	2,62	0,07	0,55	0,16	0,23	0,09	0,32	12,88	0,00	0,94	0,07	0,18	0,38	0,11	0,52	859,90
175	86,25	3,35	0,06	0,58	0,14	0,21	0,09	0,05	7,46	0,00	1,05	0,00	0,16	0,29	0,10	0,55	889,80
176	88,86	2,59	0,07	0,61	0,16	0,26	0,11	0,32	5,22	0,01	0,99	0,06	0,24	0,38	0,12	0,56	909,20
177	87,67	3,44	0,06	0,72	0,15	0,26	0,10	0,37	5,38	0,10	1,10	0,06	0,17	0,31	0,11	0,57	916,10
178	87,59	3,37	0,05	0,68	0,11	0,20	0,09	0,29	5,88	0,09	1,14	0,05	0,16	0,21	0,09	0,56	907,80
179	89,63	2,87	0,05	0,56	0,12	0,20	0,09	0,24	4,71	0,00	0,96	0,00	0,18	0,30	0,09	0,56	910,60
180	88,64	3,23	0,12	0,51	0,11	0,19	0,08	0,23	4,83	0,07	1,71	0,04	0,15	0,00	0,08	0,57	906,60
181	88,84	3,28	0,18	0,49	0,10	0,18	0,08	0,22	4,78	0,06	1,24	0,04	0,15	0,30	0,08	0,56	908,20

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observación	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
182	75,98	3,12	0,05	0,47	0,12	0,69	0,44	1,25	8,76	1,09	6,33	0,04	0,11	0,00	1,55	0,63	904,50
183	82,35	1,82	0,14	0,76	0,74	0,33	0,23	0,38	10,75	0,02	1,11	0,05	0,29	0,59	0,45	0,55	887,50
184	70,93	1,84	0,65	0,93	1,57	0,46	0,33	0,45	20,11	0,02	1,40	0,20	0,26	0,00	0,84	0,53	860,60
185	55,52	4,04	2,65	2,75	3,50	1,48	1,79	0,47	11,99	1,43	10,18	0,44	0,22	0,00	3,56	0,74	1.002,00
186	61,44	5,35	4,51	2,10	6,46	0,42	0,34	0,29	15,06	0,02	2,01	0,64	0,20	0,00	1,16	0,65	1.012,90
187	76,31	1,97	1,30	0,90	1,45	0,31	0,29	0,27	13,67	0,08	2,06	0,46	0,21	0,00	0,70	0,56	885,00
188	72,75	2,06	1,89	1,13	1,78	0,42	0,44	0,38	14,53	0,01	2,09	0,57	0,31	0,71	0,93	0,57	896,60
189	69,18	2,01	1,78	1,35	1,76	0,75	0,87	0,37	13,70	0,38	5,37	0,54	0,26	0,00	1,68	0,61	907,70
190	73,71	2,25	1,90	0,90	1,41	0,35	0,36	0,31	13,20	0,32	3,30	0,70	0,23	0,27	0,77	0,57	880,30
191	69,95	1,89	1,32	1,08	1,31	0,81	0,54	0,32	12,21	0,69	6,56	0,96	0,37	0,00	2,00	0,62	886,50
192	74,68	3,13	1,17	0,87	1,29	0,34	0,36	0,29	13,50	0,06	2,35	1,00	0,24	0,00	0,74	0,57	888,20
193	74,40	3,07	1,82	0,89	1,45	0,39	0,37	0,30	14,42	0,06	1,76	0,00	0,19	0,08	0,81	0,56	902,10
194	77,30	1,27	1,44	0,65	1,28	0,22	0,32	0,18	13,91	0,02	2,06	0,00	0,42	0,26	0,68	0,54	868,40
195	76,88	2,68	1,50	0,61	1,22	0,21	0,29	0,14	13,13	0,06	1,78	0,54	0,11	0,20	0,66	0,55	882,10
196	77,47	1,88	1,35	0,62	1,18	0,21	0,30	0,15	12,75	0,15	2,53	0,32	0,18	0,30	0,63	0,55	869,80
197	78,63	1,78	1,13	0,72	1,19	0,28	0,31	0,23	12,12	0,26	2,24	0,34	0,16	0,00	0,63	0,56	881,50
198	74,95	2,13	1,40	0,75	1,30	0,29	0,33	0,20	13,73	0,22	3,24	0,59	0,18	0,00	0,69	0,56	868,30
199	75,96	2,15	1,38	0,70	1,23	0,27	0,34	0,19	12,47	0,11	3,35	0,54	0,16	0,42	0,73	0,56	871,30
200	71,33	1,64	1,30	0,84	1,31	0,92	0,93	0,20	11,90	0,71	5,86	0,00	0,22	0,35	2,48	0,62	909,80
201	77,26	1,83	1,24	0,79	1,27	0,37	0,37	0,19	12,06	0,08	2,46	0,56	0,20	0,48	0,83	0,56	884,70
202	75,59	2,09	1,69	0,82	1,31	0,36	0,35	0,19	13,10	0,04	2,35	0,59	0,25	0,52	0,75	0,56	881,70
203	71,53	2,15	1,28	0,93	1,77	0,41	0,52	0,17	12,06	0,49	6,53	0,55	0,19	0,00	1,42	0,60	874,20
204	67,86	3,57	2,59	0,78	1,16	0,42	0,48	0,15	11,27	1,21	8,68	0,51	0,18	0,11	1,02	0,62	851,50
205	72,09	1,91	1,25	1,21	2,43	0,36	0,34	0,16	11,96	0,82	6,08	0,53	0,19	0,00	0,66	0,60	866,60
206	70,22	6,91	1,20	1,82	1,19	0,54	0,53	0,41	11,65	0,38	3,67	0,51	0,19	0,14	0,65	0,61	935,80
207	73,45	1,94	1,15	0,76	1,19	0,30	0,31	0,17	11,85	0,98	6,37	0,52	0,22	0,14	0,64	0,58	837,50

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES DE COMPOSICIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE																	
# Observación	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	DR	X ₁
208	72,06	1,58	1,25	0,75	1,19	0,31	0,32	0,18	12,24	1,10	7,61	0,52	0,23	0,00	0,66	0,58	822,30
209	77,22	2,19	0,91	0,75	1,24	0,33	0,33	0,32	12,54	0,03	2,62	0,58	0,24	0,00	0,69	0,56	883,40
210	77,76	1,97	0,66	0,73	1,14	0,33	0,32	0,31	11,90	0,03	2,94	0,58	0,35	0,34	0,65	0,56	874,50
211	77,80	1,68	1,01	0,84	1,31	0,35	0,36	0,41	12,10	0,05	2,37	0,52	0,24	0,27	0,69	0,56	889,10
212	76,36	1,46	1,09	0,82	1,21	0,41	0,44	0,30	12,20	0,27	3,66	0,53	0,18	0,18	0,89	0,57	877,00
213	73,85	2,73	1,28	1,08	1,52	0,43	0,40	0,33	13,98	0,02	2,18	0,64	0,24	0,49	0,82	0,57	894,20
214	75,71	2,50	1,04	0,90	1,37	0,42	0,39	0,33	13,55	0,02	2,18	0,60	0,17	0,00	0,82	0,56	894,30
215	75,22	2,42	0,82	0,93	1,37	0,42	0,41	0,31	13,90	0,03	2,32	0,61	0,19	0,23	0,82	0,56	886,60
216	72,21	3,26	1,22	1,35	1,90	0,61	0,63	0,44	13,77	0,04	2,17	0,58	0,21	0,26	1,35	0,59	932,40
217	75,83	3,29	1,40	1,10	1,31	0,48	0,45	0,29	12,48	0,04	2,34	0,00	0,23	0,00	0,76	0,57	912,50
218	73,55	2,98	1,31	1,11	1,46	0,44	0,40	0,28	15,06	0,02	2,39	0,00	0,17	0,00	0,82	0,56	894,70
219	71,10	2,26	1,26	1,57	0,00	0,65	0,65	0,37	14,65	0,08	2,55	0,62	0,26	0,01	1,53	0,56	877,10
220	71,26	2,45	2,36	0,90	1,38	0,34	0,33	0,28	13,33	0,63	4,40	0,85	0,20	0,54	0,74	0,58	864,80
221	69,09	2,31	0,94	1,49	0,00	0,00	1,04	0,30	14,82	0,04	5,61	0,00	0,25	0,00	1,99	0,57	854,20
222	59,33	4,33	1,97	2,67	0,00	0,00	1,14	0,29	19,58	0,45	4,12	0,00	0,16	0,00	1,65	0,55	846,80
223	58,21	2,80	0,83	2,78	5,87	0,96	1,21	0,24	20,66	0,11	2,56	0,83	0,15	0,00	2,77	0,64	992,80
224	68,27	2,98	0,95	1,69	0,00	0,84	1,08	0,16	15,84	0,15	2,40	0,66	0,41	0,57	1,97	0,57	887,70
225	70,47	1,91	1,38	1,40	2,43	0,65	0,71	0,27	15,86	0,01	2,18	0,76	0,25	0,00	1,71	0,59	924,00
226	68,82	1,67	1,61	1,57	2,71	0,76	0,92	0,28	15,51	0,00	2,31	1,30	0,37	0,00	2,17	0,60	942,40
227	68,69	2,34	1,39	1,50	2,60	0,73	0,95	0,25	15,59	0,03	2,08	0,95	0,20	0,59	2,10	0,60	940,60
228	57,89	2,04	1,17	1,76	3,16	0,62	0,79	0,39	12,17	2,97	15,25	0,00	0,00	0,00	1,78	0,69	828,10
229	68,92	3,02	1,20	1,12	1,52	0,63	0,79	0,78	13,43	0,48	5,63	0,68	0,15	0,00	1,65	0,62	910,40
230	69,89	2,87	1,20	1,19	1,76	0,57	0,63	0,30	14,28	0,47	4,54	0,79	0,18	0,00	1,34	0,60	893,20
231	62,91	4,13	1,74	1,68	2,57	0,00	0,80	0,72	17,78	0,06	2,42	1,44	0,19	0,38	1,87	0,59	917,90
232	66,19	3,31	1,29	1,60	2,46	0,78	0,80	0,45	17,00	0,02	2,31	1,48	0,21	0,30	1,80	0,60	932,70

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														
# Observación	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y
1	100,96	334,53	653,09	532,40	312,16	267,40	312,34	785,25	215,66	233,22	7156,06	67456,13	1,80	87,90
2	97,97	319,25	636,75	519,71	304,94	264,20	310,26	782,49	194,88	214,26	6563,59	64241,13	2,13	87,96
3	93,21	320,62	645,12	526,88	308,26	263,02	308,72	784,48	204,94	226,31	7082,96	66195,67	1,70	88,06
4	95,43	319,75	641,00	523,15	307,05	262,32	307,89	783,77	201,32	221,86	6980,81	64712,32	1,73	88,04
5	98,46	317,22	633,63	515,53	303,74	261,96	307,39	782,78	195,21	213,54	6678,57	61312,14	1,81	88,04
6	104,52	312,18	618,87	500,28	297,13	261,26	306,39	780,82	183,00	196,89	6074,11	54511,79	1,97	88,04
7	100,09	307,94	623,64	506,98	305,14	265,00	309,54	779,50	184,51	202,62	6248,91	58643,90	2,10	87,96
8	101,37	308,65	627,02	510,70	308,53	267,30	311,74	779,90	187,87	206,29	6347,50	59774,17	2,10	87,84
9	98,09	321,89	659,26	538,72	328,41	267,21	310,88	786,28	219,93	239,45	7057,75	68451,40	2,17	87,22
10	94,25	317,07	652,32	533,37	321,86	266,72	310,58	785,89	211,88	231,44	7025,06	67077,08	2,20	87,40
11	94,38	316,13	650,56	531,42	321,51	267,09	311,33	785,17	209,66	229,99	7142,06	66227,00	2,06	87,49
12	96,16	313,57	641,83	522,59	312,69	267,78	311,40	780,01	200,72	220,07	6638,57	63483,64	2,11	87,74
13	94,39	317,27	652,79	533,37	323,94	267,81	312,15	782,08	211,42	232,51	7045,80	67797,84	2,19	87,34
14	96,36	317,78	653,04	530,27	323,21	266,83	310,79	782,82	210,96	231,87	7095,52	66395,72	1,89	87,54
15	95,60	316,93	650,59	530,44	321,93	266,75	311,79	781,61	206,51	226,80	7025,34	67186,96	2,38	87,34
16	91,54	319,37	657,68	538,43	328,40	268,11	313,75	783,07	214,29	235,22	7395,04	70937,55	2,50	87,07
17	92,33	316,24	651,24	531,53	324,38	268,11	313,02	782,41	208,35	229,30	7204,49	67757,63	2,28	87,29
18	97,98	319,86	655,31	533,52	327,99	268,89	313,03	783,71	213,78	235,18	7386,81	67657,11	1,90	87,41
19	103,14	320,54	650,53	529,14	329,55	268,00	312,16	782,33	207,99	228,81	7181,90	66417,69	2,01	87,28
20	99,92	318,45	650,45	530,86	328,86	269,36	313,26	782,21	210,56	231,62	7035,62	66788,36	2,08	87,26
21	99,22	314,29	643,06	521,96	326,68	267,04	310,30	782,00	202,50	221,95	6917,91	63317,04	1,80	87,48
22	99,43	316,99	648,05	526,75	332,04	266,98	310,92	782,21	205,75	226,31	7244,44	65139,70	1,92	87,23
23	102,42	316,54	642,53	522,43	331,37	266,10	310,22	781,23	200,05	219,23	6943,33	63935,83	2,10	87,19
24	102,23	312,78	635,98	515,61	326,63	266,21	310,01	779,43	192,86	210,96	6612,56	61454,02	2,10	87,33
25	101,56	314,45	639,42	519,38	328,48	266,46	310,59	780,45	196,00	214,81	6749,22	62755,95	2,10	87,27
26	102,77	322,95	654,25	533,79	340,53	268,30	313,06	782,49	211,24	232,23	7322,22	68041,26	2,10	86,91

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														
# Observación	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y
27	102,94	316,16	640,72	519,17	331,40	268,89	312,69	779,82	195,68	214,46	6774,79	63137,69	2,20	87,02
28	98,72	315,05	640,18	520,73	333,13	267,01	311,28	780,76	193,40	210,98	6679,37	63702,07	2,50	86,92
29	99,07	325,00	659,44	538,55	346,59	264,64	310,13	785,46	213,71	235,71	7457,65	70670,30	2,40	86,54
30	99,81	313,55	637,27	517,78	333,43	267,30	311,42	779,81	192,23	210,46	6499,38	62721,09	2,40	86,95
31	100,94	316,22	641,21	521,32	336,60	267,24	311,16	781,11	196,40	215,42	6639,36	64029,99	2,33	86,92
32	96,64	311,25	637,41	516,72	329,40	266,52	309,80	780,33	193,61	211,94	6448,42	62331,23	2,30	87,11
33	101,20	314,22	638,57	517,57	333,17	268,21	311,42	780,20	193,95	212,48	6602,42	62489,57	2,30	87,03
34	93,28	333,08	681,68	556,93	357,82	266,73	311,72	789,83	241,22	266,49	8454,01	76849,24	1,77	86,58
35	93,65	332,62	679,12	555,63	358,16	268,34	313,06	788,52	240,74	264,72	8192,23	76722,96	1,89	86,52
36	100,85	317,94	639,92	520,21	334,90	268,39	312,01	780,26	197,84	216,96	6471,81	63788,66	2,11	87,08
37	106,16	312,57	616,81	498,65	326,03	268,65	311,74	773,83	171,70	186,52	5721,08	56598,35	2,75	86,94
38	100,65	310,03	615,95	498,67	319,22	268,68	311,76	773,94	171,01	186,00	5803,32	56553,93	2,73	84,39
39	103,59	313,48	621,76	503,49	322,63	268,86	312,38	775,11	175,33	190,88	5990,68	57873,68	2,71	87,09
40	99,19	311,50	621,93	503,55	322,20	268,82	312,42	775,03	175,39	191,39	5950,63	58329,22	2,79	87,08
41	99,81	311,63	624,55	506,43	322,54	268,93	312,81	775,98	178,32	193,62	5948,19	59446,27	2,80	87,07
42	97,67	311,34	633,10	512,97	331,66	268,30	312,25	778,04	186,69	203,93	6277,76	61326,48	2,51	86,96
43	100,46	312,60	634,02	512,58	334,37	268,38	312,35	777,53	186,75	204,19	6438,62	61569,57	2,60	86,80
44	97,04	310,60	633,33	513,16	333,48	268,36	312,52	777,69	186,40	204,12	6286,84	62051,14	2,65	86,83
45	99,90	313,46	636,18	516,46	339,66	268,47	312,92	778,65	189,31	206,51	6331,33	63109,42	2,70	86,61
46	94,82	311,50	638,13	517,68	341,62	269,01	312,92	779,69	192,56	209,91	6421,67	63594,96	2,54	86,62
47	101,05	314,17	634,25	513,23	343,11	270,27	312,51	778,71	189,91	206,99	6318,42	61489,86	2,30	86,71
48	102,76	323,63	653,73	531,67	357,43	267,78	312,10	783,37	210,58	230,84	6862,00	68578,40	2,30	86,30
49	101,46	320,83	648,93	527,60	352,93	268,01	311,95	781,30	206,97	226,79	6445,61	67092,64	2,42	86,38
50	97,59	312,57	643,68	517,16	339,51	260,15	304,74	779,28	197,60	216,38	5919,58	64337,82	2,65	86,31
51	101,09	311,60	635,28	509,68	336,13	262,60	306,13	776,16	189,33	206,73	5519,70	61071,98	2,60	86,77
52	104,60	313,89	631,85	507,23	336,98	266,63	309,49	774,23	187,63	204,37	5242,06	60192,58	2,52	86,79

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

# Observación	VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														Y
	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y	
53	101,82	314,12	640,62	512,37	340,15	262,96	306,75	777,30	193,47	211,63	5546,60	62427,68	2,40	86,74	
54	101,92	332,31	674,23	545,73	366,08	262,18	308,01	786,25	229,39	252,73	7076,67	74983,20	2,26	86,06	
55	99,13	333,25	679,01	550,90	367,64	264,44	310,35	785,22	233,14	256,33	7086,23	77328,26	2,48	85,92	
56	97,46	315,68	639,71	513,18	338,32	265,83	308,98	774,34	192,96	210,48	5280,50	62442,46	2,54	86,76	
57	104,28	314,34	630,28	508,22	338,15	267,60	311,11	776,15	183,70	200,74	5809,62	60548,50	2,63	86,70	
58	103,39	315,40	633,01	509,41	339,07	266,27	309,23	778,16	188,62	206,48	6209,44	60412,76	2,13	86,94	
59	95,83	312,12	636,39	510,46	336,81	264,87	307,46	776,21	192,73	210,90	5609,89	61126,12	2,15	87,00	
60	101,72	313,86	640,60	513,40	344,23	264,42	307,51	775,09	195,40	213,09	5399,63	62355,25	2,32	86,68	
61	101,49	316,36	645,79	517,59	347,09	261,67	305,58	777,84	199,50	218,27	5626,27	64236,23	2,33	86,57	
62	100,72	321,81	652,88	527,49	353,97	261,82	307,20	782,96	206,58	226,62	6708,70	68324,74	2,48	86,31	
63	100,82	314,10	635,47	511,66	340,63	265,93	309,71	778,62	189,04	206,60	6299,32	61510,64	2,36	86,77	
64	104,28	314,00	628,78	505,96	337,03	265,08	308,79	776,89	182,17	199,67	6055,30	59264,31	2,33	86,87	
65	103,79	314,23	631,41	506,95	337,94	262,66	306,74	777,99	184,11	202,38	6161,32	59820,41	2,26	86,88	
66	103,80	323,52	651,85	528,05	354,86	265,87	311,00	781,59	205,45	226,26	6852,07	68118,27	2,45	86,30	
67	105,66	322,44	648,33	525,14	353,37	267,63	312,08	779,77	202,40	222,68	6293,01	66530,82	2,49	86,32	
68	102,65	317,80	645,75	519,73	348,82	265,34	309,59	778,70	198,24	217,67	5985,82	64506,20	2,43	86,46	
69	99,67	322,78	656,21	531,31	356,03	266,32	311,07	782,86	209,99	230,44	6647,57	69218,00	2,39	86,30	
70	98,64	327,38	663,81	539,48	361,75	264,94	310,65	784,80	217,51	238,61	7095,79	73116,28	2,50	86,03	
71	97,20	322,65	657,61	534,24	360,72	266,46	311,57	783,64	212,35	232,35	7123,04	70262,93	2,39	86,10	
72	99,47	334,11	674,54	550,47	374,27	268,13	313,96	785,82	229,67	251,68	7935,74	76653,55	2,33	85,76	
73	98,87	338,10	683,52	558,98	379,95	267,80	314,33	787,04	238,31	261,23	8284,21	80111,75	2,39	85,59	
74	96,85	334,40	677,76	553,24	374,27	267,94	313,81	786,44	233,76	256,27	8045,56	77174,24	2,20	85,83	
75	101,07	327,92	662,38	537,18	364,20	267,63	312,94	782,68	214,80	234,78	7489,08	70946,33	2,33	86,11	
76	100,35	314,55	635,76	513,34	343,82	264,98	308,49	779,96	189,65	203,85	6396,09	61754,17	2,30	86,68	
77	101,09	332,59	670,28	544,92	369,85	266,39	311,44	785,59	223,78	244,22	7947,44	73057,23	2,07	85,98	
78	101,46	319,87	645,03	523,48	352,50	267,75	312,48	779,38	196,09	214,03	6839,49	65841,05	2,60	86,34	

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														
# Observación	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y
79	99,21	329,50	666,18	543,08	367,43	268,52	313,42	783,86	220,33	241,36	7637,58	72552,31	2,24	86,03
80	96,24	327,74	665,42	542,61	365,63	268,77	313,78	783,29	219,17	240,49	7587,90	72782,30	2,30	86,05
81	96,47	330,63	670,25	547,23	369,71	269,21	314,36	784,03	224,18	246,16	7764,65	74572,11	2,30	85,94
82	95,40	334,59	680,01	554,55	375,06	269,12	314,18	785,94	234,96	258,14	8287,15	76866,02	2,00	85,96
83	98,97	319,78	650,55	527,09	354,00	264,20	308,97	781,92	203,29	223,12	6860,24	67138,78	2,20	86,46
84	94,89	323,45	661,37	536,45	359,75	268,18	312,66	782,85	214,27	234,53	7519,22	69916,09	2,05	86,37
85	101,25	314,83	636,10	513,39	344,07	267,83	310,95	778,52	189,41	207,13	6537,96	61212,99	2,00	86,83
86	100,61	319,04	645,84	522,91	352,80	268,42	311,96	780,34	200,06	219,04	6898,55	64632,16	2,00	86,58
87	100,60	315,03	634,31	511,96	344,33	269,37	312,03	777,35	188,56	205,48	6317,88	60528,17	2,00	86,86
88	103,90	317,57	637,15	515,83	348,25	269,08	312,29	777,80	191,31	208,82	6461,66	62225,75	2,13	86,67
89	103,85	315,24	628,76	508,36	342,01	269,12	312,30	774,78	181,30	197,85	6102,92	59666,21	2,35	82,49
90	105,98	317,59	633,98	512,50	346,97	269,53	312,68	776,58	186,29	203,63	6369,07	60869,69	2,18	86,67
91	104,58	316,34	630,89	508,91	343,37	269,00	311,81	776,13	183,46	200,88	6266,65	59569,45	2,09	86,83
92	104,37	315,59	631,77	510,32	344,32	267,95	311,19	776,06	183,42	200,44	6231,34	60437,13	2,30	86,65
93	99,23	315,38	637,47	515,67	346,56	267,98	311,41	777,85	189,43	206,73	6604,10	62374,52	2,30	86,58
94	103,88	320,87	645,01	522,92	354,36	267,95	311,91	779,53	196,27	214,59	6869,18	64918,03	2,30	86,39
95	100,84	317,18	641,97	519,55	352,32	267,62	311,30	778,18	193,36	212,28	6757,13	63328,09	2,31	86,44
96	102,79	318,05	641,11	518,53	352,35	266,33	310,24	778,51	192,46	211,20	6748,51	63292,97	2,30	86,46
97	102,51	318,64	642,48	520,20	353,51	266,27	310,46	778,65	193,42	211,93	6750,14	63931,02	2,37	85,62
98	103,78	318,26	639,98	517,61	351,48	267,07	310,50	778,09	192,46	210,54	6556,50	62915,81	2,27	86,42
99	106,65	320,59	642,90	519,77	354,37	267,69	310,66	779,15	196,66	214,93	6666,14	63373,32	2,03	86,53
100	106,29	317,62	636,28	513,28	348,94	267,45	310,07	777,84	190,45	207,87	6376,63	60949,37	2,00	86,73
101	106,52	318,49	638,20	515,99	350,95	267,17	310,64	777,62	190,53	208,41	6393,63	62478,79	2,33	86,47
102	103,73	316,12	635,37	513,83	348,23	268,54	312,11	776,48	186,91	204,24	6261,10	62143,34	2,50	86,46
103	100,10	313,88	635,63	513,94	346,44	267,22	310,61	777,49	187,99	205,42	6236,27	62051,53	2,38	86,41
104	98,18	318,79	647,95	524,74	353,32	264,51	308,71	781,30	200,59	219,74	6767,73	66259,41	2,20	86,51

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														
# Observación	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y
105	100,54	314,77	635,00	512,61	345,31	268,40	311,22	778,03	188,31	205,33	6270,42	61374,55	2,20	86,75
106	102,77	319,02	642,58	521,26	352,59	268,51	312,12	779,09	195,32	213,44	6487,32	64659,59	2,41	86,38
107	101,20	312,94	627,02	505,70	339,49	267,66	310,67	774,70	179,06	195,19	5850,16	59085,72	2,46	86,77
108	104,66	314,81	625,44	504,65	340,02	268,99	311,66	774,16	177,97	193,75	5822,58	58191,90	2,40	86,73
109	102,98	313,38	628,23	506,70	342,19	266,92	310,23	776,03	179,57	195,15	5843,68	59791,11	2,53	86,53
110	104,15	313,91	626,40	505,92	342,67	268,17	311,59	775,01	177,17	192,77	5769,73	59345,43	2,69	86,55
111	97,24	310,49	625,78	504,19	342,88	266,69	309,94	775,01	176,61	192,54	5754,28	59179,53	2,61	86,58
112	99,24	313,67	629,37	507,44	349,05	267,25	310,42	776,09	180,45	196,22	5878,50	59701,09	2,50	86,24
113	100,70	314,83	631,68	508,47	349,98	266,74	309,22	777,22	184,89	200,97	5940,95	59742,90	2,16	86,61
114	100,07	313,31	627,40	505,05	346,02	266,08	308,47	777,05	181,43	197,31	5908,80	58553,11	2,00	86,68
115	98,98	314,19	631,93	508,86	348,36	265,45	308,15	778,20	185,01	201,70	6095,01	59743,24	2,00	86,72
116	98,98	314,07	629,20	506,18	347,65	266,74	309,00	776,77	182,71	199,33	5920,93	58771,30	2,00	86,78
117	98,87	312,73	627,12	504,39	346,60	264,48	307,05	776,75	180,57	197,44	5897,47	58297,20	2,00	86,75
118	102,16	313,60	623,95	502,75	347,00	266,80	309,28	774,84	177,08	192,95	5719,97	58000,64	2,30	86,62
119	99,23	314,25	630,64	509,01	350,58	266,13	309,18	776,94	182,78	199,20	6043,10	60299,71	2,30	86,50
120	100,61	316,27	639,30	517,22	359,64	266,25	309,89	779,11	191,28	208,67	6458,39	63054,81	2,30	86,22
121	102,82	316,99	636,56	515,23	357,58	266,42	310,27	778,55	188,11	205,05	6510,08	62295,31	2,30	86,29
122	104,51	317,86	636,71	515,08	357,47	266,28	310,08	778,44	188,34	205,26	6525,40	62357,10	2,30	86,27
123	102,28	314,97	631,06	509,22	352,86	267,78	309,53	777,24	183,23	200,02	6328,49	60122,02	2,10	86,55
124	103,18	315,13	628,66	507,42	352,01	266,03	309,21	776,28	180,61	197,40	6246,55	59360,02	2,15	86,40
125	98,53	324,51	657,79	534,58	369,59	264,02	309,05	783,45	209,59	230,34	7355,60	69929,24	2,16	86,03
126	101,35	328,70	662,15	539,47	374,50	266,12	310,98	783,46	214,57	235,45	7468,41	71392,55	2,20	85,86
127	102,86	316,43	634,76	513,61	356,54	268,37	311,06	777,06	189,39	206,48	6069,28	61788,46	2,20	86,40
128	103,58	316,16	631,64	510,15	355,06	267,57	310,45	776,44	185,29	202,05	6017,41	60481,34	2,20	86,17
129	104,51	322,92	647,47	526,03	367,96	267,57	311,53	780,84	200,67	219,31	6868,78	66511,05	2,20	86,03
130	102,69	321,70	645,93	523,75	366,09	266,78	310,75	780,73	198,65	216,89	6834,93	65866,98	2,20	86,07

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														
# Observación	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y
131	103,98	330,81	664,12	541,16	378,40	266,16	311,37	783,79	216,25	237,12	7614,85	72102,30	2,20	85,73
132	103,81	336,35	674,46	550,82	385,20	266,01	311,83	785,50	226,37	247,83	8113,27	75963,54	2,20	85,54
133	102,75	332,89	668,82	545,43	381,25	266,46	311,89	784,35	220,42	241,00	7887,48	73756,77	2,20	85,65
134	97,72	330,67	670,17	546,72	380,06	266,44	311,93	784,30	221,62	243,17	7936,05	74234,32	2,20	85,67
135	95,11	329,53	671,75	547,45	381,92	263,90	309,58	785,64	222,36	244,72	8008,84	74536,38	2,16	85,64
136	98,08	334,74	679,23	553,95	388,39	262,98	308,73	787,52	231,57	254,83	8361,67	76914,10	1,93	85,62
137	99,18	338,19	685,30	559,85	393,34	265,13	310,42	788,24	240,32	264,14	8643,53	78861,18	1,80	85,54
138	98,82	339,10	689,05	562,98	397,47	262,81	308,90	789,54	244,08	267,56	8803,31	80596,35	1,80	85,39
139	99,13	337,62	684,09	559,06	395,53	265,16	310,77	788,14	239,23	261,99	8514,42	78706,59	1,80	85,45
140	97,19	334,55	680,29	555,71	391,72	263,32	309,68	786,43	231,78	254,26	8134,51	78081,33	2,21	85,30
141	95,98	328,42	668,40	544,85	382,21	264,53	310,17	784,47	220,01	241,16	7640,89	73933,16	2,20	85,59
142	97,32	331,65	672,54	549,32	385,57	266,90	312,27	784,67	225,14	246,29	7815,42	75371,72	2,20	85,51
143	99,60	333,04	672,68	549,19	386,83	267,59	312,91	784,65	224,64	245,42	7890,32	75162,22	2,20	85,49
144	99,85	332,67	672,48	548,50	383,53	266,64	312,14	785,28	224,31	244,86	7943,34	75282,77	2,20	85,59
145	101,81	332,03	669,99	546,07	379,88	267,01	312,15	784,55	221,82	243,40	7878,26	73749,33	2,05	85,76
146	100,30	332,13	671,49	547,64	379,87	266,54	311,74	785,07	223,92	245,69	7941,18	74336,23	2,00	85,83
147	96,78	329,91	672,18	548,06	378,77	266,83	311,81	785,35	224,66	246,39	7942,56	74723,49	2,00	85,85
148	100,48	331,05	669,77	545,52	380,19	267,82	312,57	785,03	222,00	242,63	7854,51	73573,82	1,95	85,86
149	97,16	329,42	669,50	546,57	378,94	267,62	312,79	784,30	221,47	241,94	7803,33	74358,87	2,20	85,73
150	98,52	329,41	667,16	544,68	377,99	268,10	313,35	783,58	218,50	238,73	7639,94	74009,59	2,31	85,68
151	96,43	335,06	684,12	560,19	388,59	266,01	312,55	785,73	235,91	258,72	8244,09	80453,25	2,40	85,27
152	100,28	324,43	656,42	534,02	369,88	266,38	311,38	782,03	207,05	226,48	7292,75	69959,51	2,27	85,95
153	102,88	317,14	638,30	517,90	358,03	267,32	311,67	779,59	189,94	205,81	6430,21	64257,48	2,32	86,29
154	103,89	325,50	653,79	532,79	369,47	267,28	312,30	782,15	205,76	223,78	7042,82	69809,23	2,35	85,94
155	102,43	314,70	631,57	511,50	352,06	267,31	311,30	776,76	182,09	197,48	6049,14	61798,46	2,50	86,32
156	102,08	312,74	631,80	510,66	351,83	262,97	307,74	777,93	180,86	197,09	6165,04	62056,56	2,50	86,26

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														
# Observación	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y
157	98,15	312,80	634,10	513,05	351,39	263,30	308,10	777,94	183,59	200,50	6365,34	63147,68	2,48	86,22
158	102,13	322,43	651,63	529,44	366,04	264,26	309,26	783,48	203,73	222,65	6979,41	68189,25	2,08	86,11
159	101,85	316,50	641,41	518,55	356,84	260,98	305,88	781,74	192,32	210,61	6533,13	64411,12	2,03	86,45
160	95,89	323,05	660,81	537,95	372,53	263,50	308,91	785,02	213,11	233,76	7232,38	71608,64	2,10	85,98
161	100,28	335,88	680,27	557,11	386,10	266,27	312,07	785,71	234,42	256,60	8050,82	78705,63	2,21	85,46
162	98,92	339,19	689,31	565,03	394,01	267,39	313,27	786,93	243,16	265,70	8774,66	81441,69	2,10	85,33
163	102,39	334,92	675,77	552,25	385,06	267,19	312,52	785,04	229,22	249,96	8117,12	76384,29	2,14	85,59
164	98,04	332,89	676,60	553,09	383,43	266,91	312,07	785,13	230,86	252,10	7959,31	76776,42	2,10	85,65
165	94,78	325,09	666,07	541,55	372,83	264,58	309,12	784,01	219,62	239,81	7563,97	72205,74	2,03	86,03
166	102,12	319,40	646,68	523,33	362,24	266,26	309,82	780,47	199,21	216,99	6842,52	65556,53	2,07	86,30
167	104,00	321,75	648,89	525,71	365,24	264,39	308,63	781,26	200,96	218,89	6924,09	66889,78	2,18	86,17
168	104,23	316,69	638,10	516,88	363,62	264,79	309,40	779,16	188,71	205,55	6364,84	64204,30	2,30	86,10
169	95,78	322,82	661,44	538,08	377,20	263,48	309,15	783,76	212,44	232,45	7344,63	72685,62	2,28	85,71
170	101,33	313,59	634,49	513,17	357,73	265,45	309,47	777,51	185,51	202,00	6305,23	62855,85	2,28	84,08
171	104,47	314,57	633,48	512,58	356,91	262,81	307,43	779,10	184,15	200,02	6270,31	63122,24	2,37	86,26
172	103,93	314,41	636,91	515,36	357,86	265,16	308,85	780,03	189,63	206,77	6457,10	63150,05	1,99	86,48
173	99,11	311,07	632,22	510,80	353,32	265,62	308,59	778,72	186,17	202,82	6266,99	61371,99	1,85	86,43
174	103,18	313,42	634,50	513,85	358,06	265,71	309,55	778,52	186,80	203,53	6368,31	62779,41	2,20	86,36
175	103,41	314,10	634,52	514,77	358,70	265,71	309,73	778,96	187,16	204,00	6321,40	63344,60	2,20	86,32
176	102,42	316,89	640,73	521,34	362,74	265,69	310,16	780,51	193,00	210,76	6512,00	65680,67	2,29	86,14
177	101,96	320,10	648,07	527,51	368,00	263,51	308,71	782,80	199,28	217,76	6770,01	68262,54	2,30	85,98
178	102,83	320,37	648,13	527,16	368,40	262,01	307,37	783,26	199,24	217,41	6749,60	68519,68	2,30	85,96
179	93,72	313,60	646,71	525,51	360,36	261,98	307,20	781,76	196,61	214,76	6621,28	67859,64	2,42	86,13
180	97,25	315,48	644,87	523,87	362,16	262,62	307,90	780,84	193,75	211,29	6612,00	66899,53	2,50	85,92
181	99,67	318,61	648,13	527,36	366,56	265,19	309,91	781,92	199,11	216,41	6692,94	68560,02	2,42	85,98
182	100,03	310,70	630,17	508,67	351,46	265,15	307,87	776,30	183,45	198,69	5904,92	60810,46	2,24	86,16

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														
# Observación	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y
183	102,87	311,92	630,80	510,90	354,57	265,88	309,68	777,84	181,60	196,57	6164,87	61865,39	2,40	85,88
184	100,92	328,67	669,85	547,25	381,35	266,42	311,17	784,05	223,79	244,11	7483,13	74875,51	2,29	85,58
185	101,96	334,37	681,90	557,97	390,08	265,55	310,70	786,00	237,14	259,25	7854,94	78678,28	2,13	85,42
186	97,98	330,42	678,12	553,50	385,21	263,71	308,68	786,88	233,02	254,15	7760,16	77102,26	2,00	85,65
187	94,05	330,26	682,67	557,73	388,09	262,96	308,64	787,61	235,29	258,55	8252,57	78867,62	2,00	85,56
188	97,63	334,56	688,80	563,65	396,03	264,13	309,98	788,01	242,05	266,07	8527,13	80875,81	2,00	85,34
189	93,83	326,53	675,98	551,45	383,42	264,56	309,94	785,52	227,56	248,59	7858,63	76697,44	2,24	85,54
190	96,94	332,77	683,76	560,33	392,38	264,06	310,64	786,60	234,42	257,28	8271,52	80902,26	2,41	85,16
191	97,99	333,89	686,09	561,69	394,33	263,23	309,76	787,52	237,56	259,93	8442,51	81250,57	2,30	85,20
192	92,47	330,67	684,78	560,67	390,33	263,24	309,29	787,45	237,35	260,26	8353,24	80330,70	2,16	85,42
193	95,81	332,93	685,45	560,35	391,45	262,45	308,38	788,70	238,56	260,80	8564,25	80171,49	2,02	85,47
194	94,58	334,23	689,94	566,23	394,87	262,97	309,60	788,37	243,23	266,73	8681,84	82708,04	2,11	85,28
195	98,94	331,90	677,78	555,38	388,17	266,12	311,67	785,66	230,47	252,33	8134,87	78297,82	2,20	85,43
196	97,18	332,04	680,58	558,08	389,73	265,39	311,15	786,00	233,19	255,69	8257,13	79391,85	2,20	85,38
197	100,19	335,89	686,46	562,58	393,86	263,91	309,89	787,99	239,49	261,96	8540,36	80986,52	2,08	85,33
198	100,97	336,84	689,29	564,63	394,32	262,34	308,58	789,10	242,79	265,59	8680,10	81834,83	2,00	85,38
199	94,89	332,86	686,45	562,42	389,90	262,00	308,55	788,34	239,67	261,98	8482,26	81360,35	2,14	85,37
200	96,80	334,67	688,42	564,97	392,65	264,46	311,00	787,47	241,56	264,25	8557,75	82136,60	2,20	85,31
201	93,12	330,49	683,11	558,88	386,04	262,14	308,30	788,11	236,48	258,99	8427,61	79947,96	2,06	85,61
202	97,09	332,47	681,94	558,48	386,92	263,42	309,30	787,83	236,27	258,51	8413,04	79108,87	2,00	85,60
203	93,73	330,72	681,25	558,44	385,70	267,32	312,58	786,52	236,37	258,16	8271,88	78888,31	2,00	85,64
204	95,35	333,21	685,45	561,85	389,80	267,35	312,76	786,92	240,32	262,90	8418,35	80164,85	2,00	85,49
205	99,02	332,60	679,39	556,55	386,84	267,86	313,01	785,97	233,81	255,76	8176,47	77831,48	2,00	85,57
206	96,73	335,21	690,30	566,74	394,14	266,48	312,23	787,72	245,12	268,30	8618,28	82258,18	2,00	85,35
207	94,52	333,48	688,52	565,14	392,04	265,68	311,27	786,50	243,61	266,76	8554,83	81545,92	2,00	85,43
208	98,56	334,33	685,33	561,50	390,66	265,10	310,40	786,98	240,33	263,07	8444,80	80040,43	1,86	85,57

CONTINUACIÓN ANEXO A. DATOS DE LAS OBSERVACIONES

VARIABLES FÍSICAS DE LA CALDERA														
# Observación	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y
209	93,37	332,03	686,35	562,41	390,23	266,23	311,02	785,36	241,90	264,78	8484,28	80035,13	1,80	85,64
210	96,08	334,37	687,49	563,70	393,30	267,81	312,50	786,18	243,30	266,78	8531,62	80504,80	1,80	85,53
211	97,37	334,73	686,93	563,05	393,20	267,75	312,54	786,84	242,43	265,46	8510,49	80358,05	1,86	85,49
212	89,98	327,79	684,99	560,63	388,89	263,25	308,81	785,96	237,62	260,86	8420,61	80437,53	2,10	85,47
213	95,88	327,20	674,82	551,70	386,58	263,75	309,18	786,33	226,33	248,94	7929,71	76760,85	2,20	85,49
214	95,81	322,14	665,18	542,31	378,58	262,27	307,48	783,99	216,53	236,25	7636,44	73378,84	2,20	85,72
215	95,25	325,28	673,16	549,52	384,15	261,62	307,00	785,30	224,56	245,59	7830,59	76604,27	2,18	85,58
216	98,33	336,19	695,97	570,67	402,44	263,66	309,39	788,40	250,67	275,51	8897,60	84097,83	1,87	85,23
217	95,85	333,97	691,79	567,32	398,25	264,76	310,18	787,58	245,45	269,32	8671,31	82623,64	1,90	85,33
218	96,23	332,28	686,91	562,60	393,84	264,63	309,60	786,98	241,89	264,86	8287,29	80778,09	1,90	85,44
219	99,09	333,78	685,91	562,16	394,68	265,63	310,51	786,67	240,95	263,98	8318,20	80730,51	1,90	85,44
220	99,59	333,33	684,10	560,85	384,55	265,17	310,17	786,28	239,90	262,41	8038,93	80264,61	1,94	85,70
221	98,08	325,72	669,68	547,44	373,09	264,54	308,07	784,80	227,94	249,07	7276,30	75066,47	1,86	86,09
222	92,33	322,25	671,89	548,41	368,78	265,97	309,30	785,06	228,66	249,41	7314,80	75634,93	1,90	86,17
223	94,37	325,11	675,23	551,75	372,42	266,21	310,15	785,24	231,55	253,44	7498,72	76866,66	1,90	86,09
224	91,09	321,47	672,43	548,90	368,87	266,23	310,29	785,79	226,23	247,35	7711,49	75647,86	1,90	86,18
225	94,51	325,32	676,50	552,41	374,50	266,49	310,62	786,58	231,23	251,90	7836,27	76745,74	1,90	86,04
226	98,77	320,38	662,29	540,30	366,55	267,31	310,49	784,47	217,98	236,93	7293,70	72214,19	1,90	86,26
227	99,08	319,84	661,79	539,91	366,12	267,44	310,88	784,21	216,80	236,54	7323,97	72128,57	1,90	86,27
228	99,33	319,64	662,01	539,69	366,09	265,13	308,94	784,96	214,95	234,63	7492,37	72279,38	1,98	86,19
229	94,52	316,26	661,56	539,43	364,68	263,56	307,65	784,73	213,61	233,47	7504,97	72815,70	2,10	86,18
230	97,94	307,85	638,80	518,27	353,42	266,72	309,18	777,81	191,30	208,59	6272,74	64297,66	2,23	85,82
231	97,15	306,31	646,87	522,77	361,43	265,83	309,03	780,50	195,57	214,50	6718,95	67252,64	2,31	86,17
232	99,93	309,58	650,75	527,57	367,28	265,48	308,69	781,87	199,61	218,84	6851,64	68857,58	2,30	86,02

