

**DESARROLLO DE UN MODELO DE CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE
CALOR PARA INTERCAMBIADORES (PAILA) PIROTUBULARES DE LA
INDUSTRIA PANELERA**

**JULLY MILENA ZABALA PATIÑO
JUAN RAMÓN BONILLA PUERTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010**

DESARROLLO DE UN MODELO DE CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA INTERCAMBIADORES (PAILA) PIROTUBULARES DE LA INDUSTRIA PANELERA

**JULLY MILENA ZABALA PATIÑO
JUAN RAMÓN BONILLA PUERTO**

**Trabajo de grado presentado para
optar por el título de Ingeniero Químico**

Directores:

DAVID A. FUENTES D.

Ing. Mecánico, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

HUGO R. GARCIA B.

Ing. Agrónomo, MsC.

CORPOICA E. E. CIMPA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2010

ACLARATORIA

El presente trabajo de tesis de grado **“Desarrollo De Un Modelo De Cálculo De Transferencia De Calor Para Intercambiadores (Paila) Piro tubulares De La Industria Panelera”** forma parte del proyecto de Investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA: titulado “Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y la productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela” y fue coordinado, dirigido y financiado parcialmente por CORPOICA. Por tanto, los derechos de autor son de propiedad de la estudiante, de la Universidad Industrial de Santander y de CORPOICA y los resultados obtenidos podrán ser transferidos a la sociedad colombiana en actividades sin ánimo de lucro.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi motor para luchar por mis sueños y mi fuerza para seguir adelante

A mis padres por su cariño, esfuerzo

Y apoyo durante toda mi vida.

A mi universidad y a mis

**DESARROLLO
DE UN MODELO
DE CÁLCULO DE
TRANSFERENCIA
DE CALOR
PARA
INTERCAMBIAD**

*de gracias a ellos y a sus enseñanzas
o una formación integral e intelectual.*

A mis compañeros y amigos

*emocional apoyo y por compartir conmigo
una las mejores épocas de mi vida*

JULLY M. ZABALA P.

A Dios por permitirme este momento

A mi madre por ser la razón

A mi padre por su apoyo incondicional

A mis hermanos por guiarme

*A mis amigos por su apoyo, compañía y los buenos momentos que pasamos en el
transcurso de este logro.*

JUAN R. BONILLA P.

AGRADECIMIENTOS

A la **Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA**, quien por intermedio de su centro de Investigación para el Mejoramiento de la Industria Panelera CIMPA, asesoro, financio y puso a nuestra disposición sus instalaciones y equipos para el desarrollo de este proyecto.

A **DAVID ALFREDO FUENTES**, Ingeniero Mecánico, PhD., Director de proyecto por su carisma, apoyo y colaboración.

A **HUGO REINEL GARCIA B.**, Ingeniero agrónomo, Msc., Director de proyecto por su apoyo y colaboración.

A **ROSEMBERG HERNANDEZ**, Ingeniero Químico por su colaboración durante el desarrollo del proyecto.

A **LUZ ESPERANZA PRADA**, Ingeniera Química por su colaboración en la realización de este proyecto.

A **ZAMIR SANCHEZ**, Ingeniero Químico, por su colaboración durante el desarrollo del proyecto.

A los funcionarios y trabajadores de **CORPOICA-CIMPA** por su amabilidad y colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO DE REFERENCIA	2
1.1 HORNILLA PANELERA	2
1.2 CALOR REQUERIDO EN LA ELABORACION DE PANELA	2
1.2.1 Calor requerido en la clarificación.	2
1.2.2 Calor requerido para la evaporación.	3
1.2.3 Calor requerido en la concentración.	3
1.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR	3
1.4 CALOR TRANSFERIDO	4
1.5 FLUJO DE CALOR POR CONVECCIÓN	5
1.6 EBULLICIÓN NUCLEADA	5
1.7 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION	5
2.METODOLOGIA EXPERIMENTAL	6
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA HORNILLA PILOTO	6
2.2 modelo de CÁLCULO	6
2.3 Geometría y Número De Piro tubos	6
2.3.1 Facilidad para la circulación de los jugos.	7
2.3.2 Grado de dificultad de limpieza para diferentes geometrías de piro tubo.	7
2.3.3 Construcción	7
2.3.4 Fidelidad de resultados a las correlaciones matemáticas utilizadas	7
2.4 UBICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES	9
2.4.1 Posición de Equipos de medición.	9
2.5 VARIABLES DE PROCESO	10
2.6 DESARROLLO EXPERIMENTAL	10
2.6.1 Flujo De Calor De Los Gases Hacia El Agua	10
2.6.2 Control De Nivel De Agua Evaporada	11
2.6.3 Duración De Cada Experimento	11
2.7.4 Diseño Experimental	12

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	13
3.1 análisis del calor apartir del modelo teórico con respecto a el calor experimental para cada paila.	14
3.1.1 Paila pirotubular en tres diferentes posiciones (1,2,3).	14
3.1.2 Paila pirotubular circular en tres diferentes posiciones (1,2,3).	15
3.1.3 Paila pirotubular trapezoidal a tres posiciones diferentes (1,2,3).	16
3.2 ANÁLISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRÍA TRAPEZOIDAL	18
3.3 ANALISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRIA CIRCULAR	23
3.3.1 Análisis de varianza para la variable de respuesta Calor Latente (paila circular)	23
3.4 ANALISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRIA OVALADA	29
3.5 ANÁLISIS PARA LAS TRES GEOMETRÍAS	32
3.5.1 Comparación de las tres geometrías de pirotubo para cada potencia diferente	35
3.6 TENDENCIAS DEL CALOR SENSIBLE EN LAS PAILAS	37
3.6.1 Temperatura de gases a la entrada de los intercambiadores entre 370 y 430°C.	37
3.6.2 Temperatura de gases a la entrada de los intercambiadores entre 280 y 300 °C.	38
3.6.3. Temperatura de gases a la entrada de los intercambiadores entre 200 y 220 °C	38
3.7 Análisis Para La Paila De Geometría Trapezoidal	40
3.8 ANALISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRIA CIRCULAR	43
3.8.1 Analisis Para La Paila De Geometria Ovalada	46
3.9 ANÁLISIS PARA LAS TRES GEOMETRÍAS	49
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFIA	55
ANEXOS	56

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Representación de resistencias térmicas usadas en el modelo teórico de transferencia de calor	5
Figura 2. Geometrías de pirotubo seleccionadas para su evaluación.	8
Figura 3. Esquema general del sistema de registro de temperaturas y sistemas de control de nivel.	10
Figura 4. Diseño Experimental	12
Figura 5. Calor Total Experimental y Teórico, respecto a la temperatura media de los gases para la paila pirotubular elíptica	14
Figura 6. Calor Total Experimental y Teórico en función con respecto temperatura media de los gases para la paila pirotubular circular	15
Figura 7. Calor Total Experimental y Teórico en función de la temperatura media de los gases para la paila pirotubular trapezoidal	16
Figura 8. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Latente (paila trapezoidal)	19
Figura 9. Gráfica de Efectos Principales	20
Figura 10. Gráfica de Interacción de los factores Temperatura - Potencia	20
Figura 11. Gráfica de Probabilidad media normal para calor latente	21
Figura 12. Gráfica de Probabilidad normal para los residuos	22
Figura 13. Grafica de Residuos vs Orden de corrida	23
Figura 14. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Latente (paila circular)	24
Figura 15. Gráfica de Efectos Principales	25
Figura 16. Gráfica de Interacción de los factores Temperatura - Potencia	25
Figura 17. Gráfica de Probabilidad media normal para calor latente	27
Figura 18. Gráfica de Probabilidad normal para los residuos	27
Figura 19. Grafica de Residuos vs orden de corrida	28

Figura 20. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Latente (paila ovalada o elíptica)	29
Figura 21. Gráfica de Efectos Principales	30
Figura 22. Gráfica de Probabilidad media normal para calor latente	30
Figura 23. Gráfica de Probabilidad normal para los residuos	31
Figura 24. Grafica de Residuos vs orden de corrida	31
Figura 25. Diagramas de interacción para cada geometría	33
Figura 26. Grafico de Medias. Temperatura nivel 1 y potencia nivel 0	35
Figura 27. Calor transferido de los tres pirotubos (potencia 210KW)	39
Figura 29. Calor transferido de los tres pirotubos (potencia 230 KW)	35
Figura 30. Calor transferido de los tres pirotubos (potencia 230 KW)	40
Figura 31. Temperatura del agua Vs tiempo. Para la paila pirotubular trapezoidal con T de entrada de gases (370- 430°C) a diferentes potencias.	38
Figura 32. Temperatura del agua Vs tiempo. Para la paila pirotubular circular con T de entrada de gases entre (200 – 220 °C) a diferentes potencias.	39
Figura 33. Gráfica de Efectos Principales	41
Figura 34. Gráfica de probabilidad media normal para calor sensible	41
Figura 35. Gráfica de probabilidad normal para los residuos	42
Figura 36. Grafica de residuos vs orden de corrida	42
Figura 37. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Sensible (paila circular)	44
Figura 38. Gráfica de Efectos Principales	44
Figura 39. Gráfica de probabilidad media normal para calor sensible	45
Figura 40. Gráfica de probabilidad normal para los residuos	45
Figura 41. Grafica de residuos vs orden de corrida	46
Figura 43. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Sensible (paila ovalada o elíptica)	47
Figura 44 . Gráfica de Efectos Principales	47
Figura 45. Gráfica de probabilidad media normal para calor sensible	48
Figura 46. Gráfica de probabilidad normal para los residuos	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Criterios de selección de geometría de pirotubo	8
Tabla 2 .Variables dependientes e independientes	10
Tabla 3. Combinaciones de pailas pirotubulares en el ducto de gases.	12
Tabla 4. Transferencia de calor de las tres geometrías de pirotubo en función de la potencia y de la posición	16
Tabla 5. Calor transferido de la paila pirotubular elíptica	15
Tabla 6. Calor transferido de la paila pirotubular circular	16
Tabla 7. Calor transferido de la paila pirotubular trapezoidal	17
Tabla 8. diseño experimental. Calor latente para geometría trapezoidal	¡Error!
Marcador no definido.	
Tabla 9. Analisis de Varianza para el calor latente	18
Tabla 10. Coeficientes de regresión para calor latente en la paila de geometría trapezoidal	23
Tabla 11 . Analisis de Varianza para calor Latente	23
Tabla 12. Coeficientes de regresión para Calor Latente en la paila de geometría circular	28
Tabla 13. Analisis de varianza del Calor Latente	29
Tabla 14. Coeficientes de regresión para calor latente en la paila de geometría elíptica	32
Tabla 15. Factores estadísticamente significativos para cada geometría	32
Tabla 16. Niveles de Temperatura y potencia	33
Tabla 17. Método 95 %LSD	34
Tabla 18. Análisis de varianza para la variable de respuesta Calor Sensible (paila trapezoidal)	40
Tabla 19. Coeficientes de regresión para Calor Sensible en la paila de geometría trapezoidal	43

Tabla 20. Análisis de varianza para la variable de respuesta Calor Sensible (paila circular)	43
Tabla 21. Coeficientes de regresión para Calor sensible en la paila de geometría circular	46
Tabla 22. Analysis de Varianza calor sencible	46
Tabla 23 . Coeficientes de regresión para Calor sensible en la paila de geometría elíptica	49
Tabla 24 . Factores estadísticamente significativos para cada geometría de paila	49
Tabla 25. Niveles de Temperatura y potencia	50
Tabla 26. Mejor transferencia de calor para cada una de las tres geometrías	51

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. HORNILLA PANELERA	56
ANEXO B. DIMENSIONAMIENTO PAILAS PIROTUBULARES CIRCULAR, ELIPTICA, TRAPEZOIDAL	57
ANEXO C. CIRCUITO ELECTRONICO PARA EL CONTROL DE NIVEL DE AGUA EVAPORADA EN LOS INTERCAMBIADORES.	59
ANEXO D. COMPOSICIÓN DEL COMBUSTIBLE Y GASES DE COMBUSTIÓN	60
ANEXO E. CORRELACIONES Y CODIGO PROGRAMADO DEL MODELO TEÓRICO	62
ANEXO F. TRANSFERENCIA DE CALOR MODELO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL A DIFERENTES POTENCIAS	67
ANEXO G. TENDENCIAS DEL CALOR SENSIBLE EN LAS PAILAS.	72

NOMENCLATURA

- U_0 → Coeficiente global de transferencia de calor con base en el área de superficie exterior. [W/m².K]
- ΔT → Diferencia global de temperaturas masivas entre las dos corrientes. [°C]
- h_0 → Suma del coeficiente de transferencia por convección y radiación para el fluido externo. [W/m².K]
- h_i → Coeficiente de transferencia por convección del fluido interno. [W/m².K]
- Rd_0 → Factor de ensuciamiento externo. [s.K/J]
- Rd_i → Factor de ensuciamiento interno. [s.K/J]
- x → Espesor de la placa de intercambio de calor. [m]
- k_0 → Conductividad térmica de la placa de intercambio de calor. [W/m.K]
- A_0 → Área de la superficie exterior. [m²]
- A_i → Área de la superficie interior. [m²]
- A_{wm} → Área media de las superficies de la placa de intercambio de calor. [m²]
- T_{gas} → Temperatura del gas. [°C]
- T_e → Temperatura de ebullición. [°C]
- T_a → Temperatura de ambiente. [°C]
- Q_{clr} → Calor requerido en la clarificación. [W]
- Q_{evp} → Calor requerido en la evaporación. [W]
- Q_{con} → Calor requerido en la concentración. [W]
- m_{clr} → Masa de agua clarificada. [kg]
- m_{evp} → Masa de agua a evaporar. [kg]
- m_p → Masa de panela. [kg]
- ΔH_V → Entalpia de vaporización del agua. [kJ/kg]
- °B → Grados brix.
- m_h → Masa del fluido externo [gases] que intercambia calor [Kg]
- T_{hi} → Temperatura inicial del fluido externo. [°C]
- T_{ho} → Temperatura final del fluido externo. [°C]
- m_c → Masa del fluido interno (agua) que esta intercambiando calor. [kg]
- Cp_c → Poder calorífico del fluido interno (agua). [W/ kg °C]
- Cp_h → Poder calorífico del fluido externo (gases). [W/ kg °C]
- T_{ci} → Temperatura inicial del fluido interno. [°C]

T_{co} → Temperatura final del fluido interno. [°C]
 Q_{real} → Calor real transferido. [W]
 Q_{max} → Calor máximo que se puede transferir. [W]
 Q_{rad} → Calor radiante. [W]
 C_{min} → Poder calorífico mínimo entre el del fluido externo e interno. [W/kg °C]
 ΔT_{max} → Diferencia entre la temperatura inicial del fluido externo e interno. [°C]
 NTU → Número de Unidades de transferencia
 A → Área de transferencia de calor. [m²]
 E → Efectividad
 H → Coeficiente de ebullición nucleada. [W/m²·°C]
 c_{pl} → Calor específico del líquido. [W/kg·°C]
 λ → Calor latente de vaporización. [W/kg]
 μ_l → Viscosidad del líquido. [N·s/m²]
 σ → Tensión superficial. [N/m]
 ρ_l y ρ_v → Densidades del líquido y del vapor. [kg/m³]
 k_l → Conductividad calorífica del líquido. [W/m °C]
 g → Aceleración de la gravedad. [m/s²]
 P_w → Presión de saturación a T_w . [Pa]
 P_s → Presión de saturación a T_s . [Pa]
 T_s, T_w → Temperatura de saturación y de superficie. [°C]
 T_a → Temperatura ambiente. [°C]
 B → Coeficiente de convección. [K⁻¹]
 V_f → Viscosidad del fluido. [kg/h·m]
 A_p → Área de la placa horizontal (jugo) con la que hay transferencia de calor. [m²]
 Boltz → Constante de Boltzmann. [W/m²·K]
 Em_{gas} → Emisividad del gas. [W/m²]
 Em_{ac} → Emisividad del acero. [W/m²]
 Absor → Absorbitividad.
 T_p → Temperatura de la paila pirotubular. [°C]
 D_H → Diámetro hidráulico. [m]
 A_T → Área de sección transversal del flujo. [m²]
 P → Perímetro mojado. [m]

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UN MODELO DE CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA INTERCAMBIADORES (PAILA) PIROTUBULARES DE LA INDUSTRIA PANELERA.¹

AUTORES: Zabala Patiño Jully Milena; Bonilla Puerto Juan Ramón²

PALABRAS CLAVE: Tacho, Paila pirotubular, Hornilla, Transferencia de calor, Evaporación abierta.

DESCRIPCIÓN:

El trabajo propone un modelo de cálculo basado en el método NTU que describe la transferencia de calor, con diferentes correlaciones que se ajustan teóricamente a las condiciones del proceso permitiendo definir la ganancia de calor en función de la geometría de los pirotubos para contribuir más adelante en la optimización de estos tipos de intercambiadores. Se hizo una selección preliminar de las geometrías de pirotubo a evaluar entre varias geometrías, bajo criterios básicos de selección como la ganancia de transferencia de calor, construcción, facilidad para la circulación de los jugos, el grado de dificultad para la limpieza de diferentes geometrías etc.

El trabajo se realizó en la planta piloto del centro de investigación CIMPA Barbosa, Santander donde se evaluaron tres geometrías de pirotubo, la elíptica, circular y trapezoidal. Para determinar la ganancia de calor de cada geometría, se midió el calor sensible y latente de vaporización utilizando como fluido de trabajo el agua. Cada geometría fue evaluada bajo tres intervalos de temperatura y a tres diferentes potencias.

El modelo de cálculo tuvo el mejor ajuste a una temperatura media entre (700-500°C) con un porcentaje de error de aproximadamente el 4%. Para el intervalo más alto de temperaturas (800 y 700°C) tuvo un porcentaje de error del -10% y para el tercer intervalo de temperaturas (500-300°C) con el mayor porcentaje de error del 20%. Según los criterios de selección básicos presentados en este documento la mejor geometría de pirotubo es la elíptica. La ganancia de calor es función en primer lugar de la temperatura, seguida de la geometría y por último de la potencia. La geometría trapezoidal fue la que ganó más calor, jugando al parecer un papel importante el área transversal de paso de los gases y el área de lámina que rodea los pirotubos.

¹ Proyecto de grado

² Escuela De Ingeniería Química, Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Universidad Industrial De Santander.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE CALCULATION OF HEAT TRANSFER FOR EXCHANGERS (PAILA) PIROTUBULARES PANELERA INDUSTRY³

AUTHORS: Zabala Patiño Jully Milena; Bonilla Puerto Juan Ramón⁴

KEY WORDS: Tacho, Paila pirotubular, Burner, Heat Transfer, Open Evaporation.

DESCRIPTION:

The work proposes a model calculation based on the NTU method that describes heat transfer with different correlations that fit the conditions theoretically allowing the definition of the process heat gain depending on the geometry of pirotubos to contribute later in optimizing these types of exchangers. It made a preliminary selection of the geometries of pirotubo to evaluate among several geometries, under basic selection criteria as the gain of heat transfer, construction, ease of movement of the juices, the degree of difficulty for cleaning and so on.

The work was conducted at the pilot plant research center CIMPA Barbosa, Santander differences were analyzed pirotubo geometries, the elliptical, circular and trapezoidal. To determine the heat gain of each geometry were measured sensitive and latent heat of vaporization as the working fluid using water. Each geometry was assessed under three temperature ranges and three different strengths.

The calculation model was the best fit to an average temperature between (700-500 ° C) with an error rate of about 4%. For the highest range of temperatures (800 and 700 ° C) had an error rate of 10% and the third range of temperatures (500-300 ° C) with the highest error rate of 20%. According to the basic selection criteria presented in this paper pirotubo the best geometry is elliptical. The heat gain depends primarily on temperature, followed by geometry and ultimately power. The trapezoidal geometry was the one who won more heat, apparently playing an important role in passing the cross sectional area of the gases and the area surrounding the pirotubo sheet.

³ Final Project.

⁴ Chemical Engineering School, Physical-chemical Engineering Faculty, Universidad Industrial de Santander.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto se realizó en el centro de investigación CIMPA de CORPOICA, ubicado en el municipio de Barbosa, Santander con coordenadas 05°56' 52" N, 73°36' 24" N, a una altura de 1520 m.s.n.m, presión atmosférica de 0,86 atm, temperatura media de 22°C, precipitación media anual de 1800 mm y humedad relativa del 75%.

En la industria panelera, la forma y dimensiones de las actuales pailas paneleras hacen que la relación área de transferencia de calor - volumen de jugo sea muy baja, generando diseños con pailas y hornillas muy grandes, de costos elevados y altas pérdidas de calor. Cerca del 37% de la energía suministrada, es arrojada en los gases de la chimenea, este valor corresponde aproximadamente a $1,93 \times 10^{10}$ kJ/año, basados en una producción de 1'600.000 t/año de panela y en un poder calorífico de bagazo (a 30% de humedad) de 12.970 kJ/kg. Las pailas pirotubulares, dan una relación área-volumen mucho mayor que otros tipos de pailas para una misma capacidad térmica, lo cual indica que este tipo de paila puede disminuir el tiempo de residencia de los jugos a la mitad. Esto se logró gracias a diferentes estudios sobre el flujo del jugo dentro de este tipo de pailas (Gordillo G, 2000), coeficientes de transferencia de calor (Montoya L., Romero H., 1999) y (Hernández R., 2004). La paila pirotubular fue desarrollada por GARCIA H. Estos estudios nos suministraron valiosa información para el desarrollo de este trabajo.

El objetivo principal fue desarrollar un modelo de cálculo que permita definir la ganancia de calor en función de la geometría de los pirotubos para contribuir más adelante en la optimización de estos tipos de intercambiadores. Inicialmente se escogieron y se programaron las correlaciones que se ajustaran al proceso de transferencia de calor basadas en el método NTU. En segundo lugar se realizó la selección de las tres mejores geometrías según los criterios de selección como limpieza, facilidad de construcción, eficiencia térmica etc. Para determinar el calor experimental se utilizó como fluido de trabajo agua, evaluándose cada geometría bajo tres intervalos de temperatura y a tres diferentes potencias. El modelo de cálculo tuvo el mejor ajuste a una temperatura media entre (700-500°C) con un porcentaje de error de aproximadamente el 4-5%. Para el rango más alto de temperaturas (700 y 800°C) tuvo un porcentaje de error del -10% y para el tercer rango de temperaturas (500-300°C) con el mayor porcentaje de error del 20%.

1. MARCO DE REFERENCIA

La panela es un edulcorante que resulta de la concentración de los sólidos contenidos en los jugos de la caña de azúcar.

1.1 HORNILLA PANELERA:

La hornilla panelera (ANEXO A), es el sitio donde se realiza la concentración de los jugos, al evaporar el agua de los mismos. Las partes principales que la componen son la cámara de combustión, pailas o intercambiadores de calor y chimenea.

Las pailas o intercambiadores utilizados en las hornillas juegan un papel importante, ya que ellos transfieren directamente a los jugos parte del calor disponible en la combustión. Existen pailas de forma semiesférica, semicilíndrica, planas, aleteadas, acanaladas y pirotubulares. De manera experimental Hernández R., (2004) determinó el coeficiente global de transferencia de calor para estas pailas encontrando valores entre 15 y 23 W/m²°C para la aleteada, 70 y 80 W/m²°C para la semiesférica, 30 y 90 W/m²°C para la plana, 30 y 35 W/m²°C para la pirotubular y entre 20 y 70 W/m²°C para el caso de la semicilíndrica, encontrando una variación sensible respecto a la temperatura solo en el caso de la paila plana, la cual lo analizó respecto a la velocidad de los gases sin encontrar una tendencia o dependencia del coeficiente respecto a esta velocidad.

1.2 CALOR REQUERIDO EN LA ELABORACION DE PANELA

1.2.1 Calor requerido en la clarificación. En la clarificación la temperatura de los jugos se aumenta desde la temperatura ambiente hasta la de ebullición⁵. El calor sensible requerido para llevar los jugos hasta las condiciones anteriores esta dado por la ecuación:

$$Q_{clr} = mC_p(T_e - T_a); \quad C_p = 4.18(1 - 0.006 \text{ Brix}) \quad (1)$$

⁵ GARCIA, H., Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras, Barbosa, 1992.

1.2.2 Calor requerido para la evaporación. En promedio el jugo alcanza el punto de ebullición a 95°C. Después de la clarificación de los jugos se inicia la evaporación, removiendo casi un 89% del agua presente en el jugo clarificado. Los sólidos solubles existentes en el jugo pasan de un brix inicial cercano a 17 hasta 65°B (°B: cantidad de sólidos solubles presentes en un jugo o pulpa expresados en porcentaje de sacarosa). El calor latente de evaporación depende de la cantidad de agua a evaporar para llevar los jugos hasta una concentración de 65°B y está dado por:

$$Q_{evp} = \Delta H_V(m_{clr} - m_{evp}); m_{evp} = \frac{m_{clr} B}{65} \quad (2)$$

1.2.3 Calor requerido en la concentración. Cuando los jugos alcanzan los 65°B (102-106°C), se inicia el proceso de concentración. Continuándose el proceso de evaporación hasta retirar el agua que se necesite para llegar al brix de panela (90 - 93°B). En la concentración se remueve entre el 9% y el 10% del agua que traía en jugo clarificado. Las mieles alcanzan el “punto de panela” entre 116°C y 126 °C, normalmente. El calor requerido en la concentración, se puede calcular a partir de la siguiente relación:

$$Q_{con} = \Delta H_V(m_{evp} - m_p) \quad (3)$$

1.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR:

La ecuación de diseño para intercambiadores de calor se expresa de la siguiente forma:

$$dA = \frac{dQ}{U\Delta T} \quad (4)$$

En donde dA es el elemento de área superficial que se requiere para transferir una cantidad de calor dQ en un punto en el intercambiador donde el coeficiente global de transferencia de calor es U y la diferencia global de temperaturas masivas entre las dos corrientes es ΔT. Si se basa U sobre el área de la superficie exterior A0 (suponiendo que está en contacto con el fluido caliente) se obtiene el coeficiente global de transferencia de calor:

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + R_{d0} + \frac{x A_0}{k_0 A_{wm}} + \left(\frac{1}{h_i} + R_{di}\right) A_0 / A_i} \quad (5)$$

El coeficiente global de transferencia de calor está en función de las resistencias o coeficientes locales de transferencia de calor h_o del fluido externo (gases de combustión), h_i fluido interno (jugos de caña), al igual que la resistencia de la lámina según su conductividad K_o y espesor x , R_{do} factor de ensuciamiento ya que con el tiempo se acumulan materiales extraños sobre las superficies de transferencia de calor de los intercambiadores los cuales incrementan la resistencia térmica y hacen que disminuya la velocidad de transferencia de calor.

1.4 CALOR TRANSFERIDO

El calor transferido se puede calcular usando el método NTU⁵ (Numero de Unidades de Transferencia) el cual se basa en un parámetro adimensional llamado Efectividad de la transferencia de calor (ϵ) definido de la siguiente forma:

$$\epsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{max}} = \frac{\text{velocidad de transferencia real}}{\text{velocidad máxima posible de transferencia de calor}} \quad (6)$$

- Calor transferido del fluido externo:

$$Q = m_h * Cp_h * (T_{hi} - T_{ho}); \quad C_h = m_h * Cp_h \quad (7)$$

- Calor transferido del fluido interno:

$$Q = m_c * Cp_c * (T_{co} - T_{ci}); \quad C_c = m_c * Cp_c \quad (8)$$

- Calor máximo transferido:

$$Q_{max} = C_{min} * \Delta T_{max} \quad (9)$$

$$\Delta T_{max} = T_{hi} - T_{co}; \quad C_{min} = \text{menor entre } C_c \text{ y } C_h \quad (10)$$

- Calor real transferido:

$$Q_{real} = \epsilon * Q_{max} \quad (11)$$

$$NTU = U * \frac{A}{C_{min}}; \quad NTU = f(\epsilon, C) \quad (12)$$

$$\epsilon = 1 - \text{Exp}(-NTU); \quad C = \frac{C_{min}}{C_{max}}; \quad \epsilon = f(NTU, C) \quad (13)$$

1.5 FLUJO DE CALOR POR CONVECCIÓN:

El calor por convección se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido líquido o gaseoso que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. En el caso de las pailas pirotubulares la transferencia de calor es por convección donde el fluido que transporta el calor es gaseoso (gases de combustión) y el fluido al cual es transferido este calor es líquido (jugo de caña). Correlaciones (ANEXO E)

1.6 EBULLICIÓN NUCLEADA

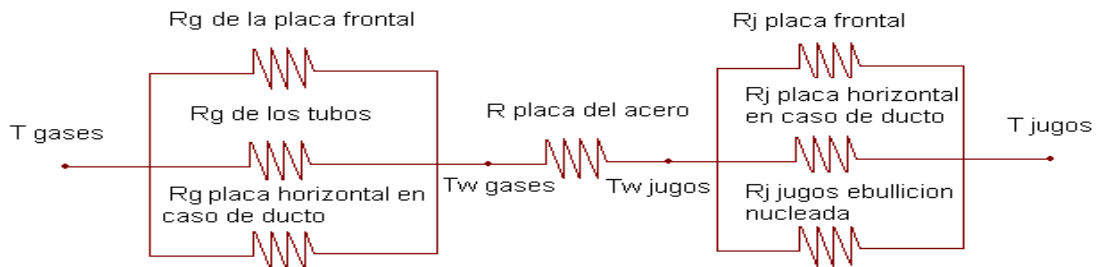
En este proceso se distinguen dos regímenes de flujo diferentes en donde se forman burbujas aisladas en los lugares de nucleación y se separan de la superficie. En este régimen la mayor parte del intercambio de calor es por medio de la transferencia directa de la superficie al líquido en movimiento en la superficie y no mediante las burbujas de vapor que se elevan de la superficie⁶. La Correlación usada para el modelo teórico ver (ANEXO E).

1.7 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION:

El flujo de calor por radiación es un fenómeno por el cual fluye energía a través de ondas electromagnéticas entre dos cuerpos de diferente temperatura.

$$Q_{rad} = Boltz * (T_{gas} ^ 4) * Em_{gas} - (Tp ^ 4) * Absor) * Em_{ac} \quad (14)$$

Figura 1. Representación de resistencias térmicas usadas en el modelo teórico de transferencia de calor



⁶FRANK KREITH, Principios de transferencia de calor, Editorial Thomson 2001.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA HORNILLA PILOTO:

La hornilla piloto (Anexo A) con cámara de combustión plana construida en el Centro De Investigación Para El Mejoramiento De La Panela - CIMPA, cuenta con un generador de calor, intercambiadores de calor pailas y chimenea. Para el estudio se empleó un quemador diesel, colocado en la entrada del ducto con el cual se varió la potencia suministrada a la hornilla y así variar las condiciones de combustión (temperatura y velocidad). Se utilizó este equipo ya que permite un sistema estacionario y de fácil manejo.

2.2 MODELO DE CÁLCULO

Se desarrolló un modelo de cálculo que describe la transferencia de calor, con correlaciones de convección forzada en placas verticales, horizontales y ebullición nucleada de los jugos que se ajustan teóricamente a las condiciones del proceso. Se realizó la programación del modelo y la simulación de la paila pirotubular variando las geometrías de pirotubos, potencia del quemador de ACPM, las temperaturas de entrada a la paila, número de tubos. Con ayuda de este modelo de cálculo teórico, se realizó la selección de las tres mejores geometrías de pirotubo que mostraban una mejor transferencia de calor y basados en parámetros de diseño básicos a tener en cuenta en los intercambiadores pirotubulares de la industria panelera.

2.3 GEOMETRÍA Y NÚMERO DE PIROTUBOS:

La geometría del pirotubo y el número de estos en cada paila se definió por la evaluación del área de transferencia de calor, construcción, facilidad para la circulación de los jugos, el grado de dificultad para la limpieza de diferentes geometrías de pirotubo y la fidelidad de resultados a las correlaciones matemáticas utilizadas; llegando así a descartar varias geometrías y a un número de pailas a evaluar experimentalmente.

2.3.1 Facilidad para la circulación de los jugos.

De la geometría del pirotubo depende la buena circulación de los jugos para evitar puntos de estancamiento (como pliegues y bases de tubo planas) que puedan generar vapor en sitios donde no puede salir fácil.

2.3.2 Grado de dificultad de limpieza para diferentes geometrías de pirotubo.

Los tubos se dispusieron en la paila de forma lineal horizontal, ya que si se utilizaba una configuración de banco de tubos, de más de una fila de tubos, se incrementa la dificultad de llegar a todos los espacios de la paila que están en contacto con los jugos convirtiendo la limpieza del intercambiador en un trabajo tedioso y hasta imposible como ha ocurrido anteriormente. Entre los tubos hay distancias iguales y una distancia suficiente para asegurar su fácil mantenimiento y limpieza del fondo de la paila y entre ellos; además de la anterior consideración cada tubo debe tener el mínimo número de pliegues para reducir la aglomeración de tierra y otros materiales extraños dentro de ellos.

2.3.3 Construcción

Un número alto de pliegues debidos a las formas del pirotubo dificulta su construcción además de contribuir a una mala circulación de los jugos (un buen ejemplo la geometría estrella) y en la dificultad de la limpieza de tubos, entre y dentro de ellos; además de esto los pliegues son un riesgo para el personal de mantenimiento y limpieza de las pailas por ser partes afiladas que pueden llegar a generar un accidente.

Cabe resaltar que la línea de soldadura en los tubos de las pailas pirotubulares se ubico en la parte superior para disminuir el impacto térmico de los gases.

2.3.4 Fidelidad de resultados a las correlaciones matemáticas utilizadas

Cuando el canal a través del cual fluye el fluido no tiene una sección transversal circular se recomienda que las correlaciones de transferencia de calor se basen en el diámetro hidráulico D_H .

$$D_H = \frac{4A_T}{P} \quad (15)$$

“A pesar de que el concepto de diámetro hidráulico con frecuencia nos proporciona relaciones satisfactorias para la fricción del fluido y transferencia de

calor en muchos problemas prácticos, existen excepciones notables en las que el método no funciona”⁷. La gran mayoría de las correlaciones matemáticas de transferencia de calor y pérdidas de carga se aplican a una sección transversal circular en la cual se utiliza el diámetro físico de esta, el cual se deberá utilizar para calcular los números de

Nusselt , Reynolds, y para establecer el coeficiente de fricción; asegurándonos un mínimo de incertidumbre hacia los resultados.

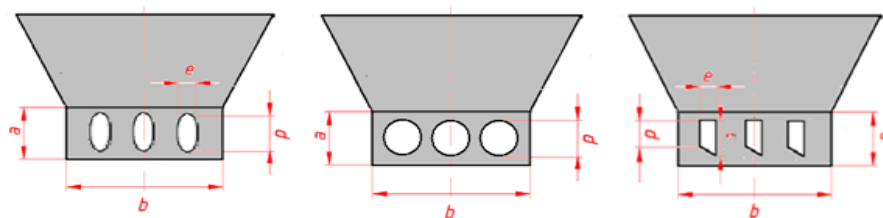
En la siguiente Tabla se comparan nueve geometrías basándose en los anteriores criterios:

Tabla 1. Criterios de selección de geometría de pirotubo

CRITERIOS DE SELECCIÓN	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Facilidad de movimiento de los jugos	X	✓	X	X	✓	X	✓	X	✓
Facilidad de limpieza de tubos (entre y dentro de ellos)	✓	✓	X	X	✓	X	X	X	✓
Construcción	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓
Valores más precisos	X	X	X	X	✓	X	X	X	X

Bajo estos criterios básicos de selección de geometría de pirotubo, se escogieron tres geometrías de pirotubo a evaluar, elíptica, circular y trapezoidal (figura 2)

Figura 2. Geometrías de pirotubo seleccionadas para su evaluación.



Los resultados del dimensionamiento de cada una de las pailas que se construyeron se resumen en el ANEXO B.

Según los anteriores criterios de selección se construyeron seis pailas pirotubulares con tres geometrías de pirotubo (2 circulares, 2 ovaladas y 2

⁷ HOLMAN, J. P., Transferencia de calor, Compañía Editorial Continental S.A., Mexico, 1995.

trapezoidales), con el objetivo de obtener un alto espectro de medición. Las pailas se construyeron en acero galvanizado calibre 16, con dimensiones iguales en largo (1 m) y ancho (0,6 m), dispuestas con tres pirotubos con perímetro de 41 cm.

2.4 UBICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES

Para la evaluación de la ganancia de calor de los intercambiadores, se ordenaron en la zona de intercambio de calor de una hornilla convencional, zona en la que se medirá el calor necesario para evaporar una cantidad de agua (en donde el jugo alcanza el punto de ebullición a 95°C) y el calor necesario para elevar la temperatura de una cantidad de agua de la temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición. En estas configuraciones de hornilla, la temperatura de entrada de los gases a cada intercambiador de calor variaba debido al cambio de posición de estos en la hornilla y el cambio de velocidad se daba debido a la potencia del quemador de ACPM, la cual era regulada y modificada por la cantidad de aire suministrada al quemador. Los intercambiadores yacían en el piso del ducto impidiendo por completo el paso de gases de combustión a través de este y logrando el paso de los gases de combustión únicamente por los tubos de las pailas pirotubulares.

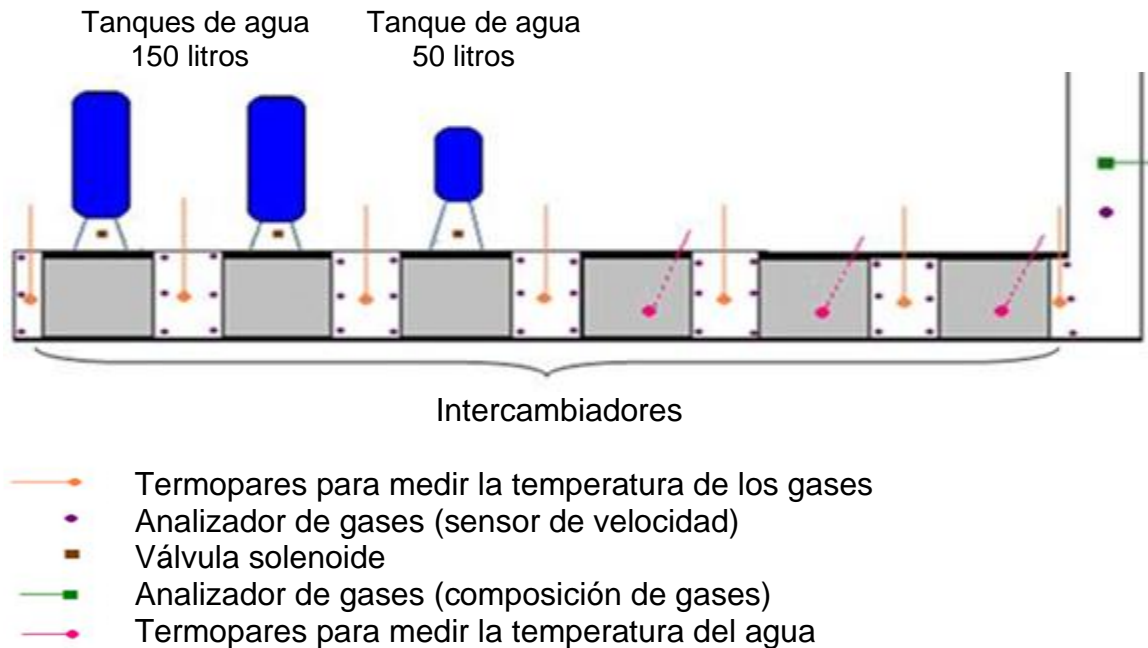
2.4.1 Posición de Equipos de medición.

Para medir la temperatura de los gases se utilizaron termopares tipo k Chromel Alumel con capacidad de medición de hasta 1500°C distribuidas verticalmente en la sección transversal del ducto, al principio y final de cada intercambiador. Termopares tipo K Chromel Alumel con capacidad de hasta 1500 °C en contacto con el agua (fluido de trabajo) almacenada en los intercambiadores de calor con el fin de medir la velocidad de calentamiento del fluido de trabajo. Los termopares enviaban la medida de temperatura a un equipo registrador de datos Data Logger multiplexor con 16 entradas análogas y 4 digitales, que reportaba los datos a un computador portátil cada 30 segundos, por medio de un software llamado MicroScan V5 Start.

Las velocidades de los gases se registraron por medio de un sensor conectado al Analizador de gases Testo 350K-L controlador 3508, el cual se colocó en la

sección transversal del ducto, a la entrada y salida de cada paila en tres puntos diferentes para analizar el perfil de velocidad.

Figura 3. Esquema general del sistema de registro de temperaturas y sistemas de control de nivel.



2.5 VARIABLES DE PROCESO:

Tabla 2 .Variables dependientes e independientes

Variables independientes	Variables dependientes
<ul style="list-style-type: none"> • Caudal de gases de combustión • Geometría de pirotubo • Temp. de entrada de los gases 	<ul style="list-style-type: none"> • Temp. de salida de los gases • Cantidad de agua evaporada • Velocidad de los gases

2.6 DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.6.1 Flujo De Calor De Los Gases Hacia El Agua

Los intercambiadores se evaluaron en condiciones de estado estable con una potencia calorífica constante durante cada experimento y manteniendo el nivel del agua constante en los intercambiadores. Se realizaron experimentos durante los

cuales se utilizó agua como fluido modelo ya que desde el punto de vista de transferencia de calor su comportamiento es similar al del jugo de caña. El flujo de calor de los gases hacia el agua se midió de tres maneras:

Por la cantidad de agua evaporada, teniendo en cuenta una entalpía de evaporación 2262 kJ/kg, el agua evaporada se obtendrá por la diferencia de nivel en el tanque de abastecimiento en las tres primeras pailas.

Por la cantidad de calor sensible transferido a una determinada cantidad de agua en los tres intercambiadores más cercanos a la chimenea.

Midiendo las temperaturas de los gases de combustión, estimando al mismo tiempo el flujo, composición y la densidad de los gases. Con los modelos de la literatura se calculará el flujo de calor teórico, el cual depende del mecanismo de transferencia de calor por convección.

2.6.2 Control De Nivel De Agua Evaporada

El nivel del agua de las pailas se mantuvo constante, controlándose por medio de un sistema electrónico de control de nivel de agua (ANEXO C), desarrollado por Hernández R. (2004), alimentado a 9 VCD (voltios de corriente directa), gracias al cual el nivel del agua solo variaba de 2 a 3 milímetros. Para evitar que el oleaje generado por la ebullición del agua interfiriera en el contacto de los electrodos del circuito de control con el agua, se diseñó un tubo especial con obstrucciones que generaban la suficiente caída de presión para que el oleaje no perturbara el nivel dentro del tubo, pero con la capacidad de reflejar el nivel promedio en menos de 2 segundos. Este circuito de control manipulaba una válvula solenoide de 110 VCA (voltios de corriente alterna) que permitía el paso de agua desde un tanque elevado hasta el intercambiador, cada intercambiador de evaporación tenía su tanque elevado.⁸

2.6.3 Duración De Cada Experimento.

Cada experimento tuvo una duración de 3 horas, una de ajuste de equipos, una de estabilización de los datos y una hora para toma de información.

⁸ HERNÁNDEZ, Rosember. Determinación dinámica de los coeficientes globales de transferencia de calor para pailas aleteada, redonda, plana, piro-tubular y caldera enterrada (semicilíndrica) usadas en la industria panelera. Bucaramanga, 2004

La ubicación de las pailas pirotubulares en el ducto generó las siguientes posibles combinaciones:

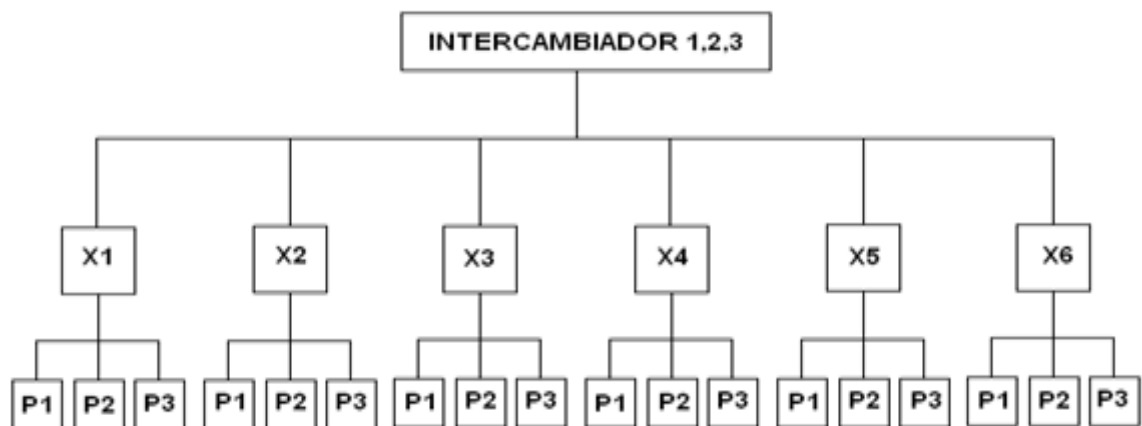
Tabla 3. Combinaciones de pailas pirotubulares en el ducto de gases.

POSICION EN EL DUCTO						
	1	2	3	4	5	6
i	Circular	Trapezoidal	Elíptica	Circular	Trapezoidal	Elíptica
ii	Trapezoidal	Elíptica	Circular	Trapezoidal	Elíptica	Circular
iii	Elíptica	Circular	Trapezoidal	Elíptica	Circular	Trapezoidal

La posición en el ducto de gases de seis posiciones comienza desde las temperaturas más altas, hasta las temperaturas más bajas de entrada de los gases de combustión a cada paila, de la cámara de combustión a la chimenea respectivamente. La experimentación se realizó en el orden dado anteriormente, presentándose tres repeticiones para cada una de las tres configuraciones anteriores. Se llevaron a cabo 27 pruebas teniendo como variables de entrada el tipo de paila pirotubular, la potencia del quemador de ACPM y la temperatura de los gases que se variaban con la posición de cada intercambiador.

2.7.4 Diseño Experimental

Figura 4. Diseño Experimental



X: Posición de la paila

P: Potencia

INTERCAMBIADOR: Según el tipo de geometría del pirotubo

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los datos tomados experimentalmente se analizaron los resultados para cada tipo de geometría de pirotubo con la ayuda de un paquete estadístico y herramientas estadísticas de Microsoft Office Excel. Por medio de gráficas y tablas, se presentarán resultados y análisis hechos entre el calor teórico y el calor experimental a tres rangos de temperatura de entrada de los gases y a tres diferentes potencias (210 KW, 230 KW y 250 kW), para cada geometría de pirotubo (circular, trapezoidal y elíptico).

El promedio de error total obtenido entre el calor teórico y el calor experimental, fue del 6%, lo cual es un buen porcentaje de error, mostrándose que el modelo tiene un buen ajuste con respecto a los resultados experimentales

Tabla 4. Transferencia de calor de las tres geometrías de pirotubo en función de la potencia

Geometría	Potencia (KW)	T media de los gases (°C)	Q medido (w)/A ²	Q Teórico (w)/A ²	%Error
Elíptica	250	739	55590	47629	-14,3
Circular	250	724	51562	49026	-4,9
Trapezoidal	250	690	56194	51803	-7,8
Elíptica	250	516	22639	24306	7,4
Circular	250	573	27795	29246	5,2
Trapezoidal	250	527	30494	33483	9,8
Elíptica	250	358	13533	16577	22,5
Circular	250	417	12720	14230	11,9
Trapezoidal	250	450	16706	19761	18,3
Elíptica	230	756	53978	45885	-15
Circular	230	729	48017	45563	-5,1
Trapezoidal	230	732	58410	53135	-9
Elíptica	230	548	27110	28002	3,3
Circular	230	569	23122	24184	4,6
Trapezoidal	230	529	29084	31470	8,2
Elíptica	230	314	12441	15107	21,4

Circular	230	420	13431	14877	10,8
Trapezoidal	230	454	15615	19190	22,9
Elíptica	210	782	50031	47078	-5,9
Circular	210	757	48339	46801	-3,2
Trapezoidal	210	703	58410	54134	-7,3
Elíptica	210	583	25338	28002	10,5
Circular	210	602	26184	26376	0,74
Trapezoidal	210	535	30212	33750	11,7
Elíptica	210	319	8353	10312	23,5
Circular	210	418	13228	14877	12,5
Trapezoidal	210	464	14726	17045	15,8
Promedio			31866,76923	31723,2308	5,5
			Desv Estándar		11,5

3.1 ANÁLISIS DEL CALOR APARTIR DEL MODELO TEÓRICO CON RESPECTO A EL CALOR EXPERIMENTAL PARA CADA PAILA.

La primera posición esta en un intervalo entre (800-700°C), la segunda entre (700-500°C) y la tercera entre (500-300°C).

3.1.1 Paila pirotubular en tres diferentes posiciones (1,2,3).

Figura 5. Calor Total Experimental y Teórico, respecto a la temperatura media de los gases para la paila pirotubular elíptica

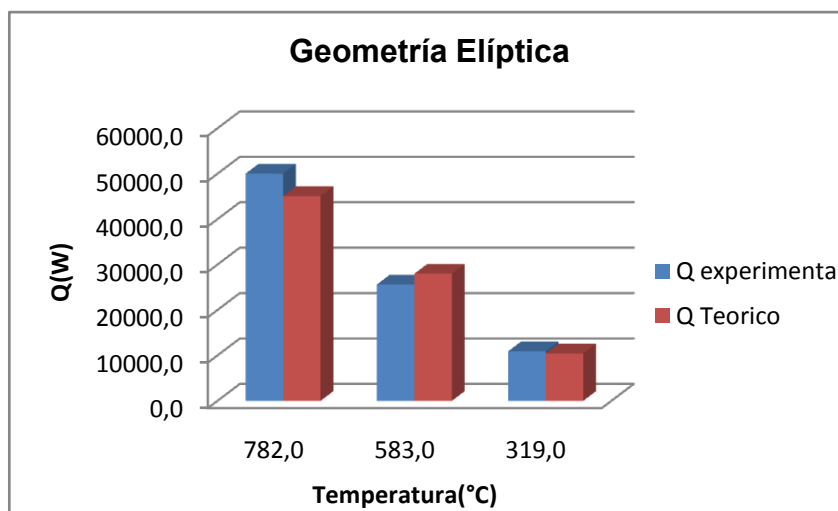


Tabla 5. Calor transferido de la paila pirotubular elíptica

T media de los gases(°C)	Q Experimental(W)	Q Teórico(W)	%Error
782	50030	47058	-5,9
583	25337	28001	10,5
319	8353	10312	23,5
Promedio	27906	28457	9,36

La figura 8 y la tabla 5, muestran el comportamiento del calor real y teórico en cada posición del ducto para una sola potencia (250 KW), las otras dos potencias siguen un comportamiento similar y una variación muy baja entre una potencia y otra.(ANEXO G)

El modelo teórico sigue una tendencia similar al calor teórico, pero en el intervalo alto de temperaturas (800-700°C) el calor teórico no supera al experimental, mientras que en los otros dos intervalos (700-500°C) y (500-300°C), el calor experimental es sobrestimado. La paila con geometría elíptica presenta el mayor porcentaje de error entre (4-9,4%).

3.1.2 Paila pirotubular circular en tres diferentes posiciones (1,2,3).

Figura 6. Calor Total Experimental y Teórico en función con respecto temperatura media de los gases para la paila pirotubular circular

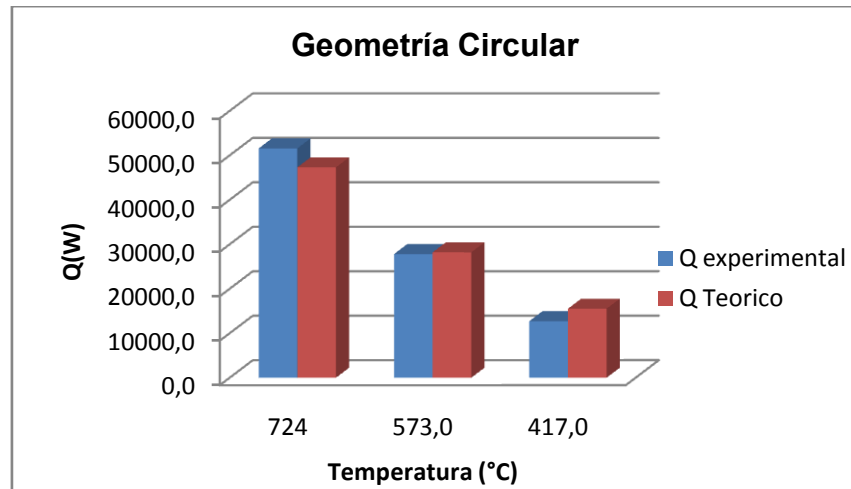


Tabla 6. Calor transferido de la paila pirotubular circular

T media de los gases (°C)	Q Experimental(W)	Q Teórico(W)	%Error
729	48016	45563	-5,1
569	23122	24183	4,6
420	13431	14876	10,8
Promedio	28189	28207	3.43

La figura 9 y la tabla 6, muestran la tendencia del calor experimental con el calor teórico para la paila pirotubular circular a una sola potencia (250 KW) las otras 2 potencias no muestran mayor diferencia. (ver Anexo G)

Para las paila pirotubular circular el modelo teórico se ajusta un poco más a los valores reales del calor en comparación con las otras dos pailas con diferente geometría de pirotubo, ya que tiene un porcentaje de error entre (3-4%). Para esta geometría, se observa un mejor ajuste del modelo teórico debido seguramente a que todas las correlaciones utilizadas son para geometrías circulares. Mientras que para las otras geometrías se utilizan estas mismas correlaciones pero aproximándolas a un diámetro hidráulico.

3.1.3 Paila pirotubular trapezoidal a tres posiciones diferentes (1,2,3).

Figura 7. Calor Total Experimental y Teórico en función de la temperatura media de los gases para la paila pirotubular trapezoidal

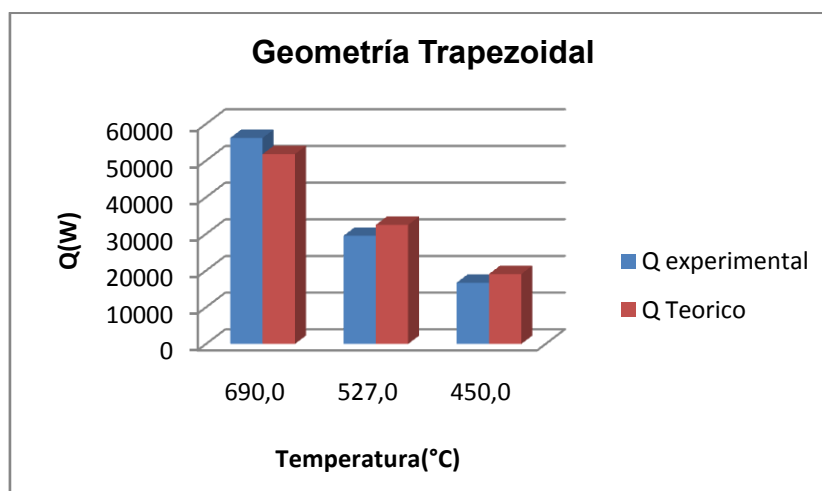


Tabla 7. Calor transferido de la paila pirotubular trapezoidal

T media de los gases (°C)	Q Experimental(W)	Q Teórico(W)	%Error
732	58409	53134	-9
529	29083	31469	8,2
454	15614	19189	22,9
Promedio	34368	34597	7,36

La figura 10 y la tabla 7, muestran el comportamiento del calor experimental y teórico de la paila con pirotubo trapezoidal a una sola potencia (230 KW) observándose la misma tendencia con las otras dos potencias. (ver Anexo G)

La paila pirotubular trapezoidal presenta un comportamiento muy similar al de las otras dos pailas pirotubulares con respecto a la temperatura. El porcentaje de error del modelo teórico con respecto al experimental con este tipo de geometría fué entre (6,5-7,5%). La paila trapezoidal presenta una mayor transferencia de calor

En la segunda posición (700-500°C) para las tres pailas se observó un mejor ajuste aproximadamente del 4%, ya que en el modelo se tuvo en cuenta la resistencia de parte de los gases contra la placa vertical que rodea los tubos, lo cual puede indicar que en esta posición influyen los gases sobre esta placa mientras que en la posición tres (500-300°C), el porcentaje de error aumenta debido seguramente a que los gases no chocan contra esta placa sino que siguen directamente a los tubos de la siguiente paila y la transferencia de calor se da por los tubos.

Debido a que el porcentaje de error varió bastante de un rango de temperatura a otro se obtuvo una desviación estandar casi del doble con respecto al porcentaje de error total por la dispersión de los datos con respecto a la media. Por esta razón el 6 % en general no es tan significativo siendo más significativo analizar el porcentaje de error según el intervalo de temperatura entre (800-700°C) del -10% entre (700-500°C) 4% y entre (500-300°C) del 20%.

El diseño experimental es un diseño factorial 3^2 con dos repeticiones, para un total de 27 datos, con tres niveles para cada factor Temperatura y Potencia.

Se hizo un análisis estadístico para cada geometría, así como se encontró la ecuación de regresión con los mejores valores de los coeficientes de determinación R^2 y R^2 ajustado.

Temperatura:

Nivel -1: 500 – 300°C
 Nivel 0: 700 – 500°C
 Nivel 1: 800 – 700°C

Potencia:

Nivel -1: 210 kW
 Nivel 0: 230 kW
 Nivel 1: 250 kW

Luego se compararon los resultados para las tres geometrías y se hicieron las correspondientes conclusiones.

3.2 ANÁLISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRÍA TRAPEZOIDAL

3.2.1 Análisis de varianza para la variable de respuesta Calor Latente (paila trapezoidal)

Tabla 9. Analisis de Varianza para el calor latente

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-Ratio	P-valor
A:Temperatura	8,387E9	1	8,387E9	13820,22	0,0000
B:Potencia	1,015E7	1	1,015E7	16,72	0,0005
AA	3,913E8	1	3,913E8	644,89	0,0000
AB	3,607E7	1	3,607E7	59,45	0,0000
Total error	1,335E7	22	6,068E5		
Total (corr.)	8,838E9	26			

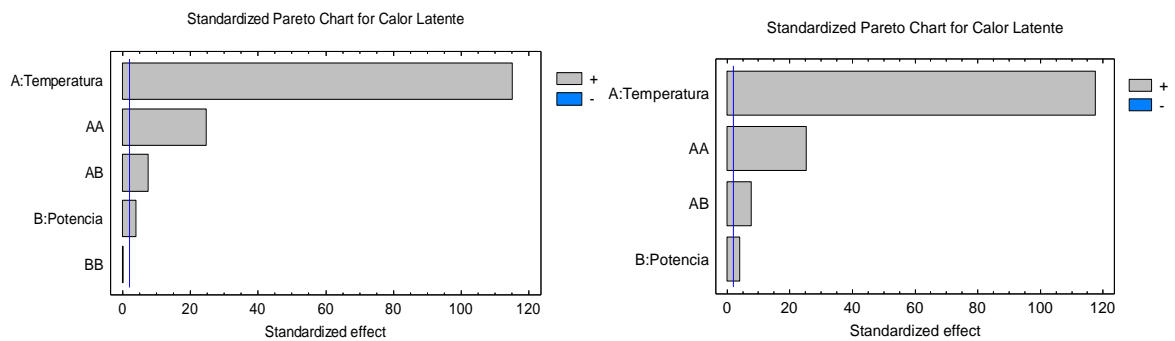
$R^2 = 99,85 \%$
 R^2 (ajustado para D.F.) = 99,82 %

La tabla de variabilidad para el calor latente Anova, muestra la significancia estadística de cada uno de los efectos comparando el cuadrado medio contra una estimación del error experimental. En este caso, 4 efectos han obtenido valores-p

inferiores a 0,05, lo que indica que son estadísticamente significativos en el 95,0% de nivel de confianza.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo obtenido explica el 99,85% de la variabilidad de los datos para la variable de respuesta calor latente. El coeficiente de determinación R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,82%, lo que indica un ajuste muy bueno del modelo obtenido a los datos.

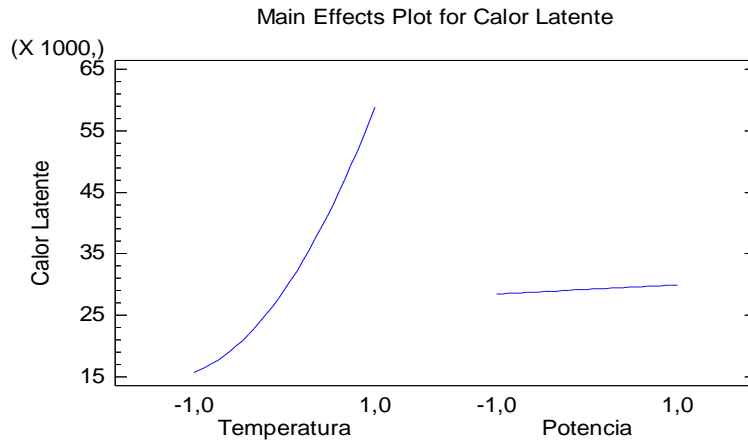
Figura 8. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Latente (paila trapezoidal)



En la grafica de Pareto se observan los factores que son estadísticamente significativos a la variable de respuesta calor latente, en la grafica de la izquierda se encuentran todos los factores con dos niveles de interacción, en la grafica de la derecha, los efectos que no son significativos han sido excluidos, el cual solo es el factor interacción potencia – potencia.

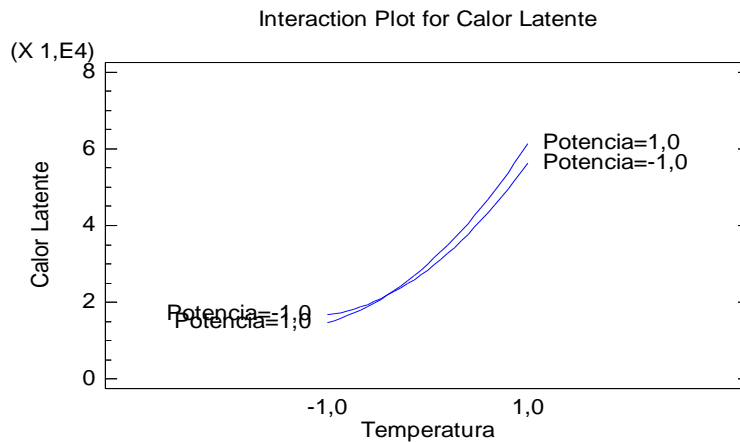
Se observa que existe un efecto significativo tanto en los factores principales (temperatura y potencia), como en los factores de interacción, sin embargo el factor potencia es menos significativo que los factores de interacción. También se observa que todos los factores tienen un efecto positivo sobre la variable de respuesta, eso quiere decir que entre mayor sea el valor de temperatura y potencia, mayor es el valor de calor latente.

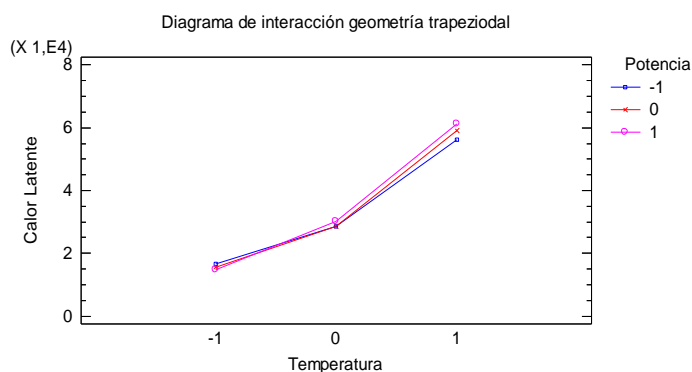
Figura 9. Gráfica de Efectos Principales



En la grafica de efectos principales, se observa que el efecto significativo del factor temperatura es mayor al efecto que tiene el factor potencia. La temperatura en su nivel más alto, es decir en el rango entre 700-800°C, da como resultado un mayor valor de calor latente para el tipo de geometría de la paila trapezoidal. Igualmente sucede con el factor potencia, pero este efecto es mucho menor, el valor de calor latente para los niveles del factor potencia no presentan altas diferencias, y se corrobora con esto lo observado en el grafico de Pareto.

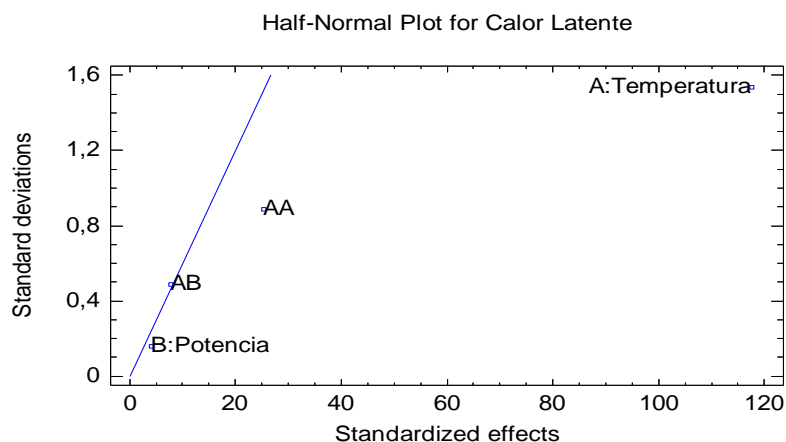
Figura 10. Gráfica de Interacción de los factores Temperatura - Potencia





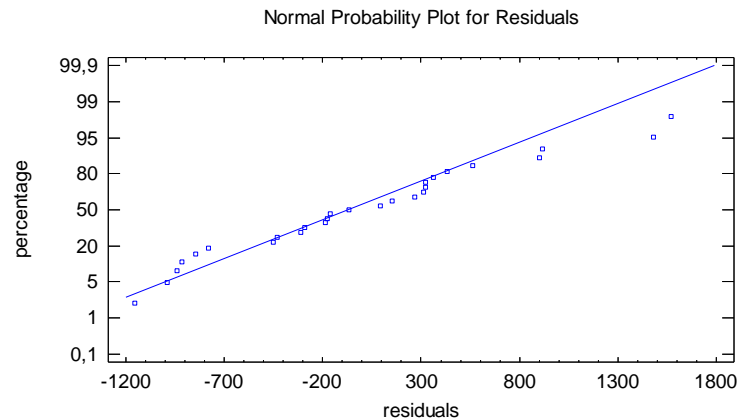
Como existe efecto significativo de la interacción Temperatura – Potencia, la grafica de interacción muestra que a medida que aumenta la temperatura, la potencia tiene una misma tendencia, tanto para su nivel bajo, como para su nivel alto. Esta tendencia da la certeza que mientras que se aumenta la temperatura, cuando la potencia está en su nivel mayor, es decir, 250 kW, la variable de respuesta aumenta; igualmente, si la temperatura se aumenta, cuando la potencia está en su nivel menor, es decir, 210 kW, la variable de respuesta aumenta. También se observa que las líneas representadas en ésta grafica se encuentran muy juntas, lo que indica que este efecto es significativo, pero es uno de los efectos que es menos significativo, confirmando igualmente lo observado en la grafica de Pareto. La interpretación de la grafica de interacción es de vital importancia para entender cómo actúan los factores sobre la variable de respuesta, y de esta manera acumular conocimiento para lograr un mejor desempeño del proceso correspondiente.

Figura 11. Gráfica de Probabilidad media normal para calor latente



En la grafica de probabilidad media normal, los factores principales y los de interacción que se encuentren cerca o sobre la línea, son los menos significativos. El factor temperatura es el más significativo a la variable de respuesta calor latente, seguido por la interacción temperatura – temperatura. Las interacción temperatura – potencia y el factor potencia son los menos significativos, sin embargo, el modelo conservo estos factores ya que aumentaban los coeficientes de determinación R^2 y R^2 ajustado, llegando a ser mayores a 99%, lo cual es un muy buen ajuste.

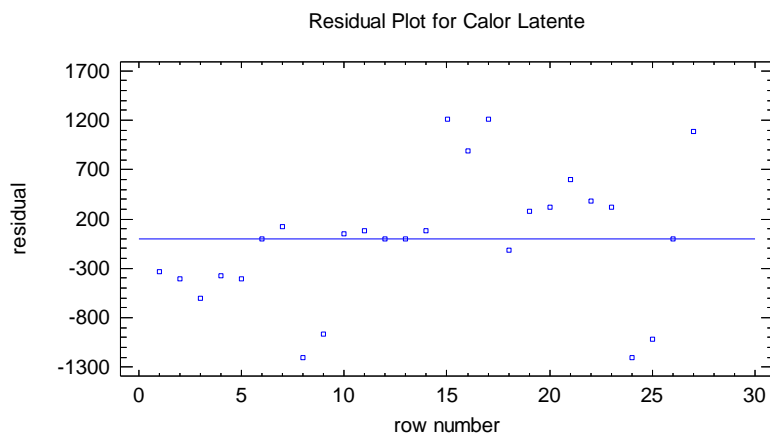
Figura 12. Gráfica de Probabilidad normal para los residuos



Con la grafica de probabilidad normal se observa que los residuos están alineados en una línea recta, se cumple que el supuesto de normalidad es correcto, lo que quiere decir que la variable de respuesta sigue una distribución normal con media cero. La línea no es completamente recta, pero dado que el procedimiento de Anova es robusto, admite desviaciones moderadas de dichos supuestos.

Cuando los puntos no se encuentran en una tendencia alineada, es posible que los datos sigan otro tipo de distribuciones como Poisson, Binomial o Gamma. En estas distribuciones la media está relacionada con la desviación estándar (variabilidad) y naturalmente al cambiar la media de un tratamiento a otro, con ello cambia la variabilidad de la respuesta. En este caso no ocurre esta situación. Esta comprobación de supuesto de varianza constante se hizo de acuerdo al modelo que correspondió al mejor Anova.

Figura 13. Grafica de Residuos vs Orden de corrida



En la grafica de residuos vs orden de corrida se muestra que si se cumple el supuesto de independendia de los factores, los puntos en la gráfica se distribuyen aleatoriamente, bajo y sobre la línea horizontal.

Tabla 10. Coeficientes de regresión para calor latente en la paila de geometría trapezoidal

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	2,919E4
A:Temperatura	2,159E4
B:Potencia	750,8
AA	8076,
AB	1734,

$$\text{Calor} = 2,919E4 + 2,159E4 * \text{Temperatura} + 750,8 * \text{Potencia} + 8076, * \text{Temperatura}^2 + 1734, * \text{Temperatura} * \text{Potencia}$$

3.3 ANALISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRIA CIRCULAR

3.3.1 Análisis de varianza para la variable de respuesta Calor Latente (paila circular)

Tabla 11 . Analisis de Varianza para calor Latente

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-Ratio	P-valor
A:Temperatura	6,001E9	1	6,001E9	5220,62	0,0000

B:Potencia	1,917E7	1	1,917E7	16,68	0,0005
AA	2,077E8	1	2,077E8	180,70	0,0000
AB	9,069E6	1	9,069E6	7,89	0,0105
BB	1,784E7	1	1,784E7	15,52	0,0008
Total error	2,414E7	21	1,149E6		
Total (corr.)	6,279E9	26			

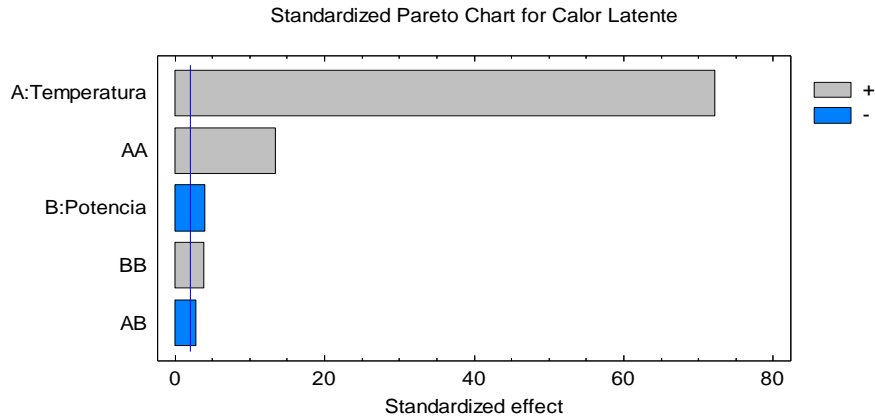
$R^2 = 99,62 \%$

R^2 (ajustado para D.F.) = 99,52 %

La tabla de variabilidad para el calor latente Anova, muestra la significancia estadística de cada uno de los efectos comparando el cuadrado medio contra una estimación del error experimental. En este caso, 5 efectos han obtenido valores-p inferiores a 0,05, lo que indica que son estadísticamente significativos en el 95,0% de nivel de confianza.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo obtenido explica el 99,62% de la variabilidad de los datos para la variable de respuesta calor latente. El coeficiente de determinación R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,52%, lo que indica un ajuste por encima de 95% del modelo obtenido a los datos.

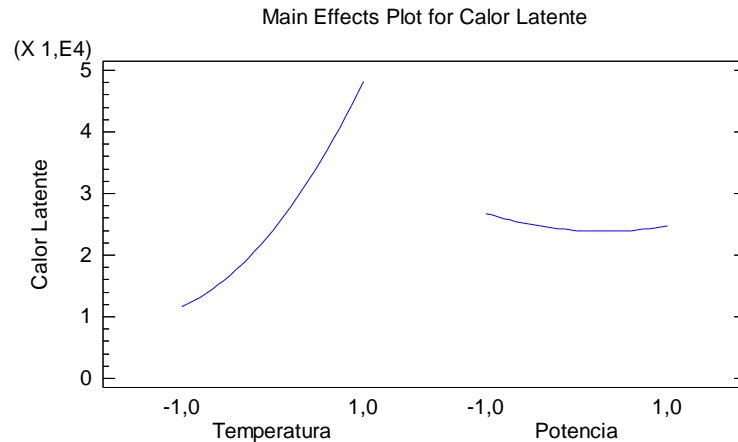
Figura 14. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Latente (paila circular)



En la grafica de Pareto se observan los factores que son estadísticamente significativos a la variable de respuesta calor latente. Se observa que existe efecto significativo de todos los factores, principales y de interacción. El factor temperatura es el más significativo. También se observa que algunos factores tienen efecto positivo y otros negativo sobre la variable de respuesta, eso quiere

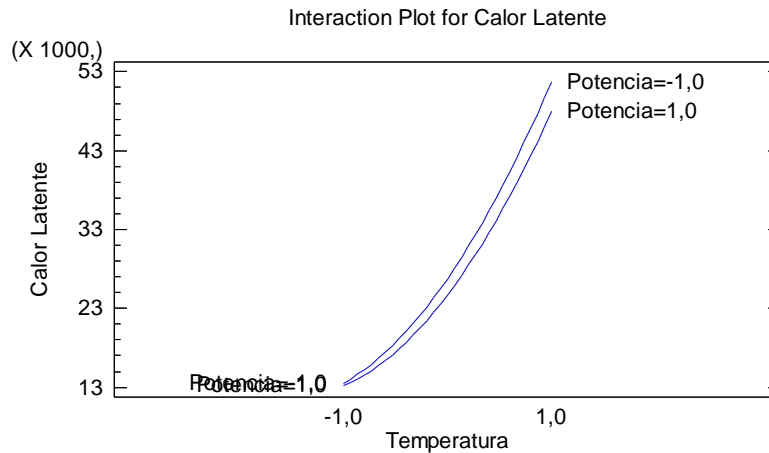
decir que entre mayor sea el valor de temperatura, temperatura – temperatura y potencia - potencia, mayor es el valor de calor latente. Por el contrario, entre mayor sea el valor en el modelo de los factores potencia y temperatura – potencia, menor es el calor obtenido.

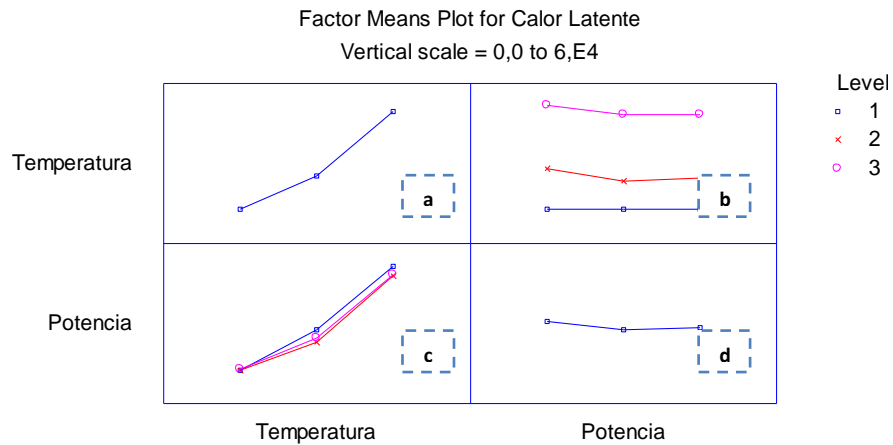
Figura 15. Gráfica de Efectos Principales



La grafica de efectos principales muestra el efecto de los dos factores principales temperatura y potencia a lo largo de los ejes X y Y. Esto indica que al cambiar el nivel de la temperatura de menor a mayor, el calor latente es mayor, mientras que al cambiar el nivel de potencia de menor a mayor, el calor latente disminuye pero luego tiene una alza muy leve en cuanto al valor de la variable de respuesta.

Figura 16. Gráfica de Interacción de los factores Temperatura - Potencia





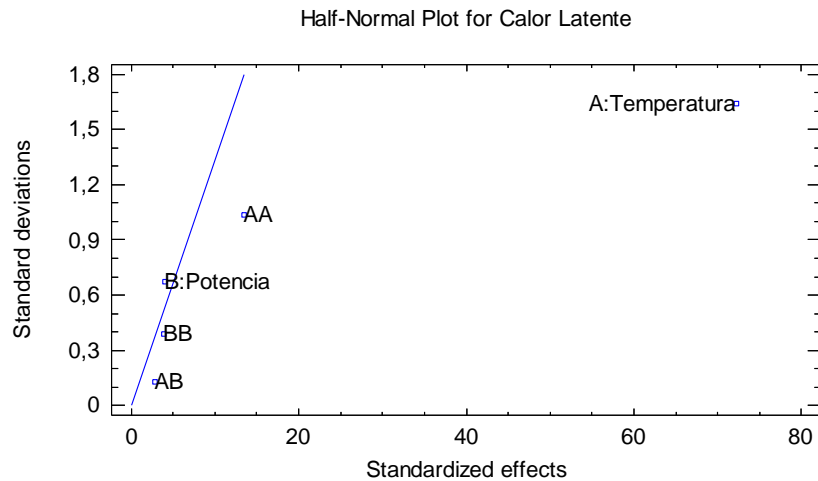
A medida que el nivel de temperatura aumenta de -1 a 1, es decir, a medida que los rangos de temperatura cambian, cambia la variable de respuesta calor latente dependiendo del nivel en el que se encuentra el factor potencia. Para el nivel más bajo de potencia, a medida que se aumenta la temperatura, el calor latente es mayor, lo mismo sucede en el nivel superior de potencia a medida que la temperatura aumenta, el calor latente aumenta. En esta grafica no se muestra el nivel intermedio de la potencia. Para esto se hace el grafico de factores medios, el cual muestra los niveles medios para los factores y su interacción, donde los niveles 1 2 y 3 son los niveles -1, 0 y 1 respectivamente y el eje Y es el calor latente. En la parte c) de la segunda grafica se observa la interacción que se tiene en la primera grafica pero con el nivel medio de potencia, en donde este nivel de potencia, se comporta igualmente que los niveles, alto y bajo.

La parte b) de la grafica de factores medios, muestra el efecto de la temperatura cuando el nivel de potencia aumenta de su nivel más bajo a su nivel más alto e igualmente se puede interpretar de la misma manera como se interpreto la parte c) de la misma grafica. A medida que aumenta el nivel de potencia, para el nivel alto de T hay una leve disminución en el calor latente, para el nivel medio de T hay una leve disminución en el calor latente, para el nivel bajo de T el calor latente se mantiene estadísticamente constante.

Se observa una relación muy importante en la parte c) de la grafica de factores medios y es que cuando la temperatura se encuentra en su nivel bajo, no existe diferencia significativa en cuanto al calor latente, independientemente del nivel de potencia.

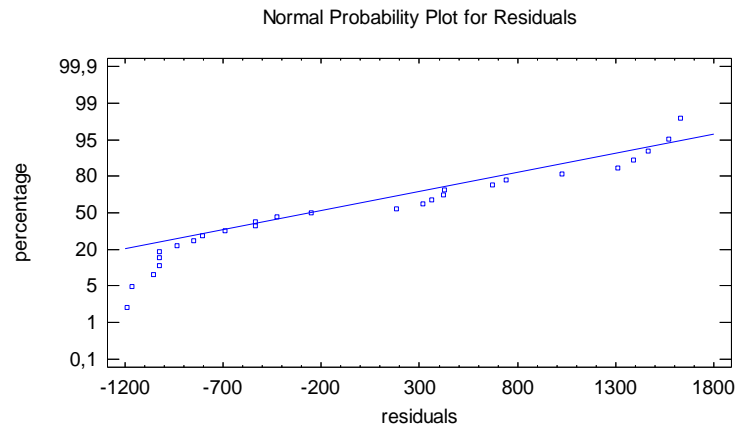
Los gráficos a) y d) son el comportamiento de la temperatura y la potencia respectivamente con respecto a la variable de respuesta y esto se analizó en el gráfico de efectos principales.

Figura 17. Gráfica de Probabilidad media normal para calor latente



El factor temperatura es el más significativo a la variable de respuesta calor latente, seguido por la interacción temperatura – temperatura – temperatura y así sucesivamente. Esta gráfica confirma lo observado en el Pareto.

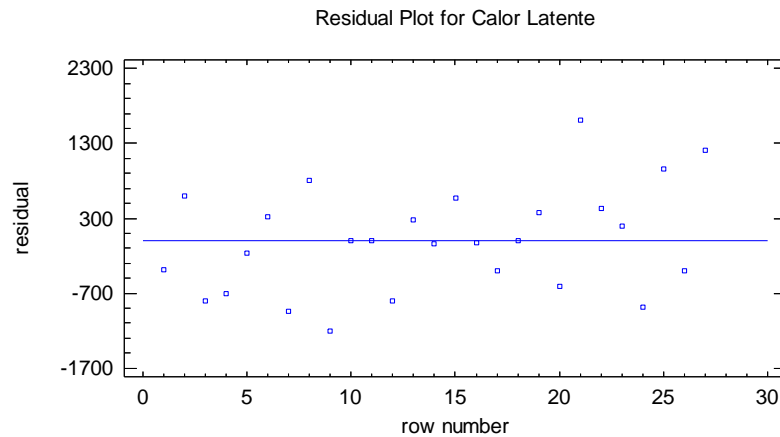
Figura 18. Gráfica de Probabilidad normal para los residuos



Con la gráfica de probabilidad normal se observa que los residuos están alineados en una línea recta, se cumple que el supuesto de normalidad es correcto, lo que quiere decir que la variable de respuesta sigue una distribución normal con media cero. La línea no es completamente recta, pero dado que el procedimiento de Anova es robusto, admite desviaciones moderadas de dichos supuestos.

Para aclarar mejor si es supuesto se cumple, ya que la línea no es totalmente recta, se hicieron varias transformaciones dentro de las cuales están raíz cuadrada (Poisson), recíproco, recíproco de la raíz cuadrada y transformación logaritmo. Ninguna de las anteriores transformaciones dio mejor resultado que la presente. Esta comprobación de supuesto de varianza constante se hizo de acuerdo al modelo que correspondió al mejor Anova.

Figura 19. Grafica de Residuos vs orden de corrida



En la grafica de residuos vs orden de corrida se muestra que si se cumple el supuesto de independencia de los factores, los puntos en la gráfica se distribuyen aleatoriamente, bajo y sobre la línea horizontal.

Tabla 12. Coeficientes de regresión para Calor Latente en la paila de geometría circular

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
<i>constante</i>	2,401E4
<i>A:Temperatura</i>	1,826E4
<i>B:Potencia</i>	-1032,
<i>AA</i>	5884,
<i>AB</i>	-869,3
<i>BB</i>	1724,

$$\text{Calor} = 2,401E4 + 1,826E4 * \text{Temperatura} - 1032, * \text{Potencia} + 5884, * \text{Temperatura}^2 - 869,3 * \text{Temperatura} * \text{Potencia} + 1724, * \text{Potencia}^2$$

3.4 ANALISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRIA OVALADA

Tabla 13. Analisis de varianza del Calor Latente

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-Ratio	P-valor
A:Temperatura	7,529E9	1	7,529E9	1725,69	0,0000
AA	3,932E8	1	3,932E8	90,14	0,0000
Total error	1,047E8	24	4,363E6		
Total (corr.)	8,027E9	26			

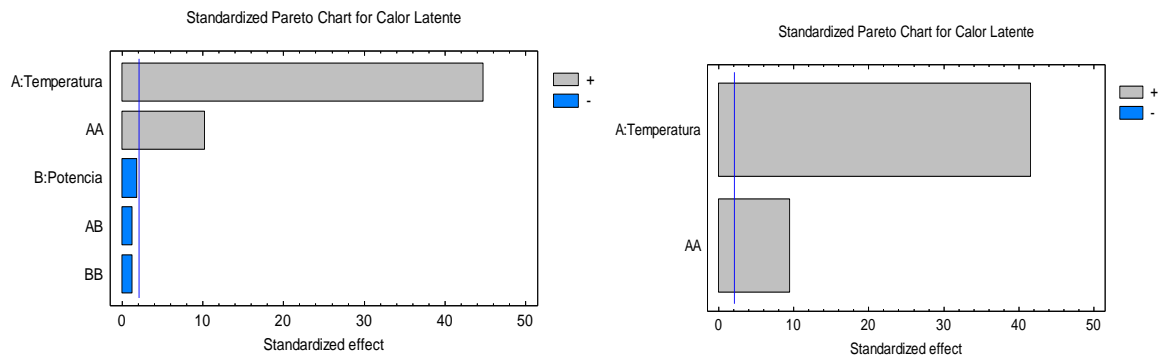
$$R^2 = 98,7 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para D.F.)} = 98,59 \%$$

La tabla de variabilidad para el calor latente Anova, muestra la significancia estadística de cada uno de los efectos comparando el cuadrado medio contra una estimación del error experimental. En este caso, 2 efectos han obtenido valores-p inferiores a 0,05, lo que indica que son estadísticamente significativos en el 95,0% de nivel de confianza.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo obtenido explica el 99,7% de la variabilidad de los datos para la variable de respuesta calor latente. El coeficiente de determinación R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98,59%, lo que indica un ajuste bueno del modelo obtenido a los datos.

Figura 20. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Latente (paila ovalada o elíptica)

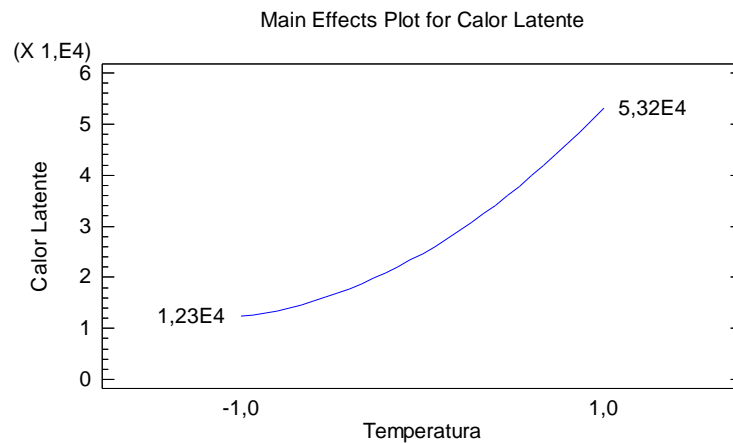


En la grafica de Pareto se observan los factores que son estadísticamente significativos a la variable de respuesta calor latente, en la grafica de la derecha, los efectos que no son significativos han sido excluidos, por lo tanto los factores

temperatura y temperatura – temperatura son estadísticamente significativos a la variable de respuesta.

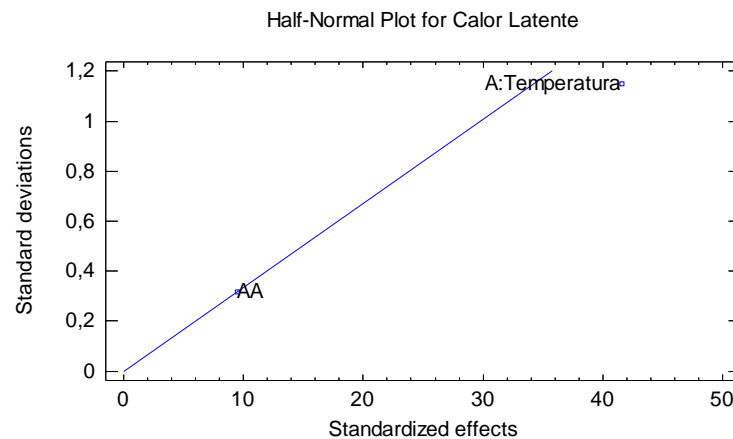
El factor de interacción temperatura es más significativo que el factor de interacción temperatura - temperatura. También se observa que los factores tienen un efecto positivo sobre la variable de respuesta, eso quiere decir que entre mayor sea el valor de temperatura y temperatura - temperatura, mayor es el valor de calor latente.

Figura 21. Gráfica de Efectos Principales



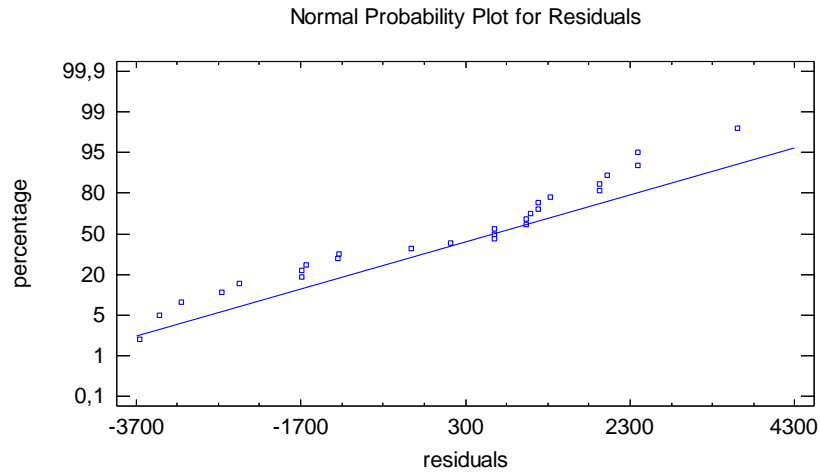
Solo existe un efecto principal y este es el efecto de la temperatura, como se afirmo en el análisis de la grafica de Pareto acerca del efecto positivo, mientras aumenta el nivel de la temperatura de menor a mayor, el valor de calor latente es mayor. No existe efecto de interacción, por lo tanto no se presenta el grafico de interacción ni el grafico de factor medio.

Figura 22. Gráfica de Probabilidad media normal para calor latente



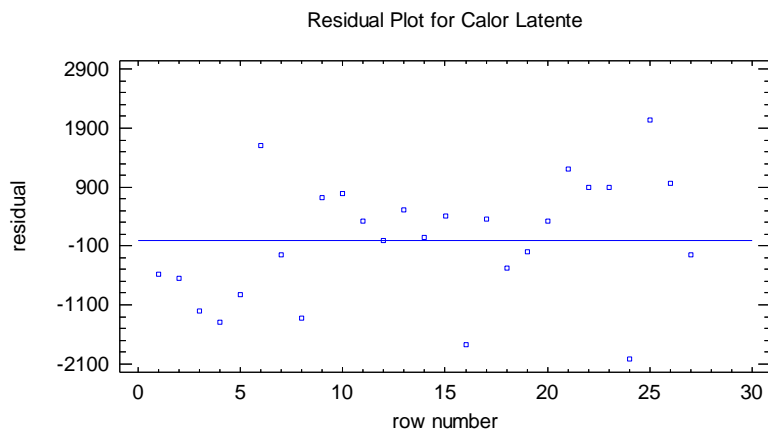
En la grafica de probabilidad media normal se observa que el factor temperatura es más significativo que el factor temperatura – temperatura. Además, se puede concluir que el factor de interacción AA (temperatura - temperatura) ayuda a que los coeficientes de determinación R^2 y R^2 ajustado se encuentren por encima del 95%, lo cual es un buen ajuste del modelo.

Figura 23. Gráfica de Probabilidad normal para los residuos



Con esta grafica el supuesto de normalidad se cumple, como en el anterior caso, se analizaron y graficaron varias transformaciones que no siguieron un patrón tan marcado como este.

Figura 24. Grafica de Residuos vs orden de corrida



En la grafica de residuos vs orden de corrida se muestra que se cumple el supuesto de independencia de los factores, los puntos en la gráfica se distribuyen aleatoriamente, bajo y sobre la línea horizontal. No tienen forma de corneta, lo que es importante para cuando los datos no cumplen el supuesto de independencia.

Tabla 14. Coeficientes de regresión para calor latente en la paila de geometría elíptica

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	2,465E4
A:Temperatura	2,045E4
AA	8096,

$$\text{Calor} = 2,465E4 + 2,045E4 * \text{Temperatura} + 8096, * \text{Temperatura}^2$$

3.5 ANÁLISIS PARA LAS TRES GEOMETRÍAS

Para todos los casos de las tres geometrías de paila, los supuestos con los que se hace este análisis de varianza constante, independencia de los factores y que los datos tengan una distribución normal se cumplen.

En la siguiente tabla se muestran los factores estadísticamente significativos para cada geometría de paila.

Tabla 15. Factores estadísticamente significativos para cada geometría

	Temperatura	Potencia	Temperatura - Potencia	Temperatura - Temperatura	Potencia - Potencia
Trapezoidal					
Circular					
Ovalada					

Lo que demuestra que las geometrías tienen diferencias marcadas en cuanto a los factores significativos a la variable de respuesta.

En la siguiente tabla se muestran los niveles de temperatura y potencia en los que se encuentran mayores valores de calor latente para las tres geometrías de paila de acuerdo a los gráficos de interacción y factores medios.

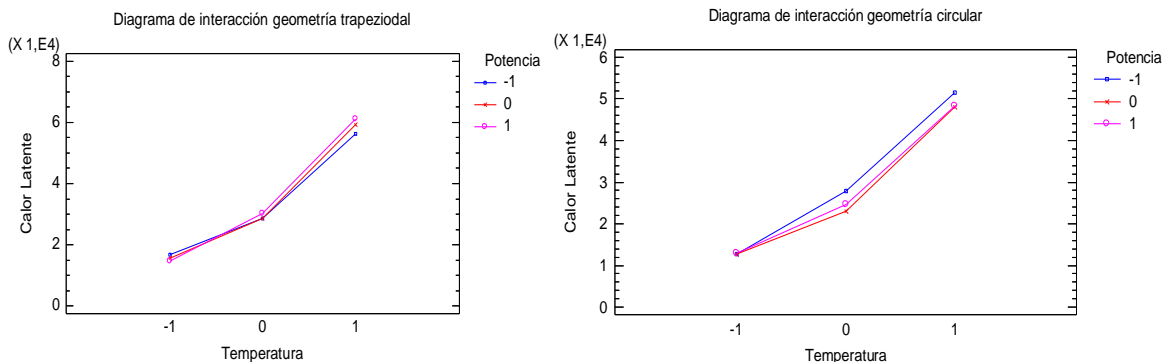
Tabla 16. Niveles de Temperatura y potencia

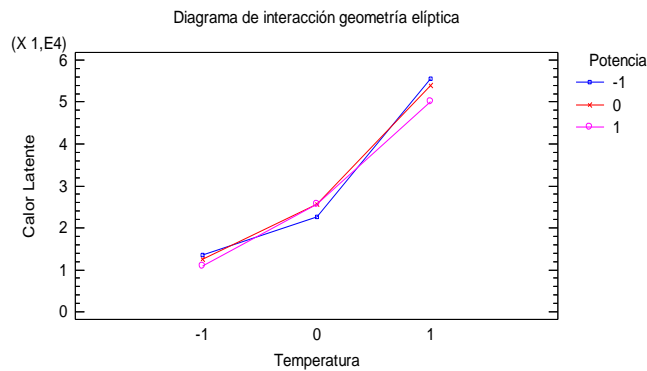
	Temperatura			Potencia		
	300-500°C	500-700°C	700-800°C	210kW	230kW	250kW
Trapezoidal			Verde, Azul, Rojo	Verde	Azul	Rojo
Circular			Rojo, Verde, Azul	Rojo	Verde	Azul
Ovalada			Rojo, Rojo, Rojo			

Las casillas de color rojo, son los valores de calor latente más altos, seguido el color azul y por ultimo verde. Se observa que para los casos de paila trapezoidal y circular, los tres niveles de potencia favorecen la transferencia de calor, mientras que para la paila ovalada o elíptica no importa el nivel de potencia, solo que a mayor nivel de temperatura se encuentran mayores valores de calor latente. Aquí es importante aclarar que es diferente que el factor potencia no sea significativo a la variable de respuesta, y que la interacción temperatura – potencia si lo sea.

Como se ha observado, existen diferencias entre las geometrías de las pailas, sin embargo en las tres se presento el mismo fenómeno en cuanto a las potencias, es decir, al mismo rango de temperatura, en los diferentes niveles de potencia dan valores muy cercanos de calor latente, como se muestra en los siguientes tres gráficos. Por esto se quiso hacer la comparación de las tres geometrías en el nivel más alto de temperatura y nivel medio de potencia, para ver si existe diferencia significativa o no en los niveles determinados de temperatura y potencia.

Figura 25. Diagramas de interacción para cada geometría





Para lo anterior, se compararon las medias y el total de medias comparadas son:

$$\text{Pares de Medias} = \frac{k(k-1)}{2} = \frac{3(3-1)}{2} = \frac{6}{2} = 3$$

$$\begin{array}{ll} H_0: \mu_1 = \mu_2 & H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \\ H_0: \mu_2 = \mu_3 & H_A: \mu_2 \neq \mu_3 \\ H_0: \mu_1 = \mu_3 & H_A: \mu_1 \neq \mu_3 \end{array}$$

Para probar la igualdad de todos los posibles pares de medias en comparaciones de rangos múltiples es conveniente usar el método LSD (diferencia mínima significativa). La diferencia de medias muestrales que en valor absoluto sea mayor que el número LSD se declara significativa.

Tabla 17. Método 95 %LSD

	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Circular	3	4,802E4	X
Elíptica	3	5,398E4	X
Trapezoidal	3	5,922E4	X

<i>Contrast</i>	<i>Sig.</i>	<i>Difference</i>	<i>+/- Limits</i>
Trapezoidal – Elíptica	*	5237,	2699,
Trapezoidal - Circular	*	1,12E4	2699,
Elíptica – Circular	*	5962,	2699,

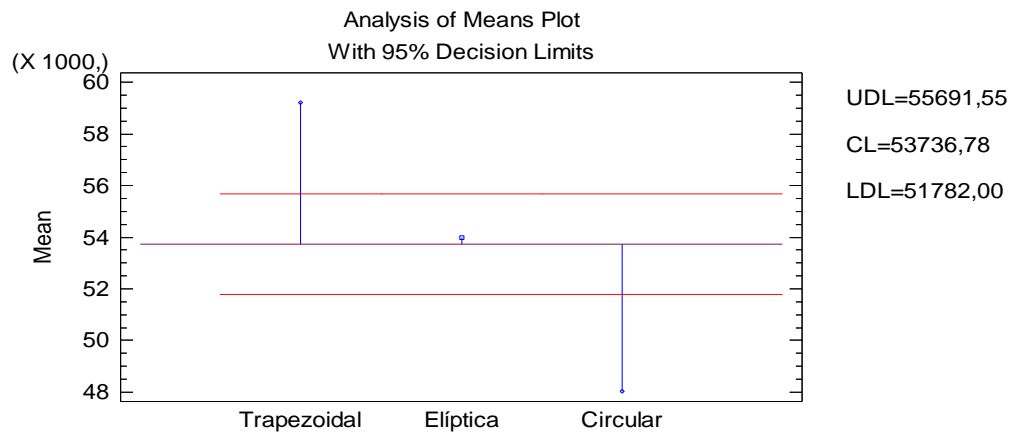
* denota una diferencia estadísticamente significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medios son significativamente diferentes de las que otros. Un asterisco se ha colocado al lado de 3 pares, lo que indica que estos pares muestran diferencias

estadísticamente significativas en el 95,0% de nivel de confianza. En la tabla superior, los niveles con forma de X en diferente posición denotan que existen diferencias estadísticamente significativas. El método actualmente utilizado para observar si hay diferencia estadísticamente significativa o no es la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD). Con este método, existe el riesgo de 5,0% de llamar a cada par de medias muy diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Por lo tanto, se concluye que existe la diferencia estadísticamente significativa entre las tres geometrías para el rango de temperatura entre 700 – 800°C y una potencia de 230. Para las tres medias comparadas se cumple la hipótesis alternativa.

Figura 26. Grafico de Medias. Temperatura nivel 1 y potencia nivel 0



En el grafico de medias se observa que con la geometría de paila trapezoidal se logra un valor mayor de calor latente en un nivel de temperatura entre 700-800°C y nivel de potencia 230 kW.

3.5.1 Comparación de las tres geometrías de piro tubo para cada potencia diferente.

Figura 27 . Calor transferido de los tres pirotubos (potencia 210KW)

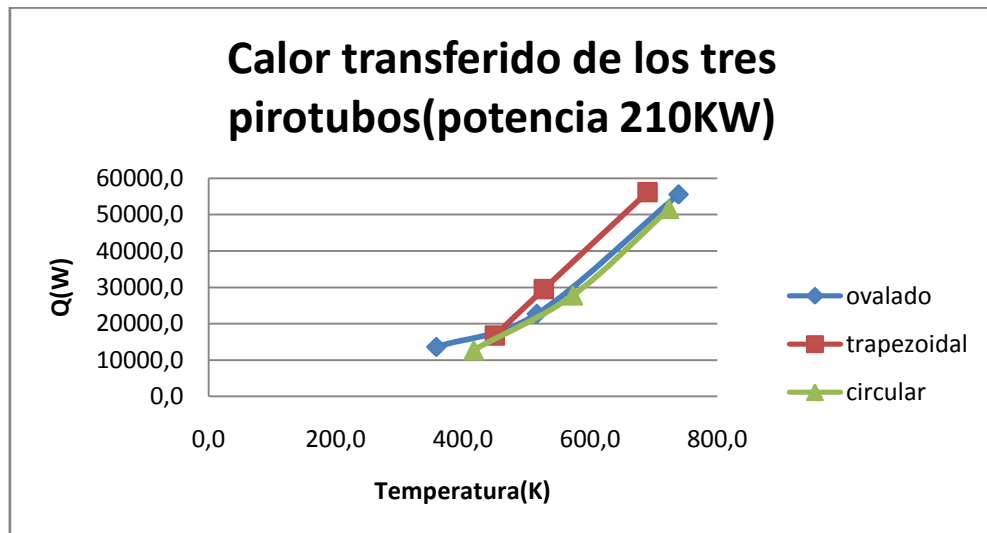


Figura 28. Calor transferido de los tres pirotubos (potencia 230KW)

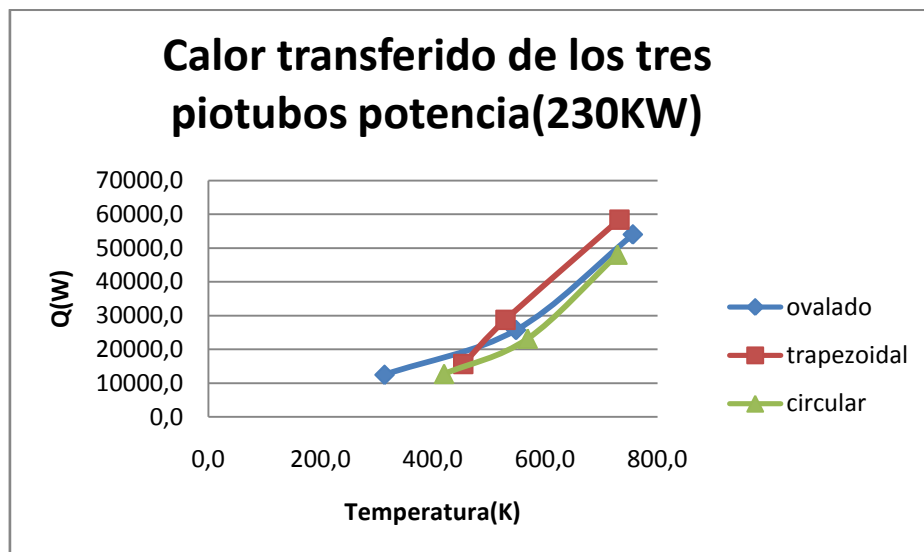
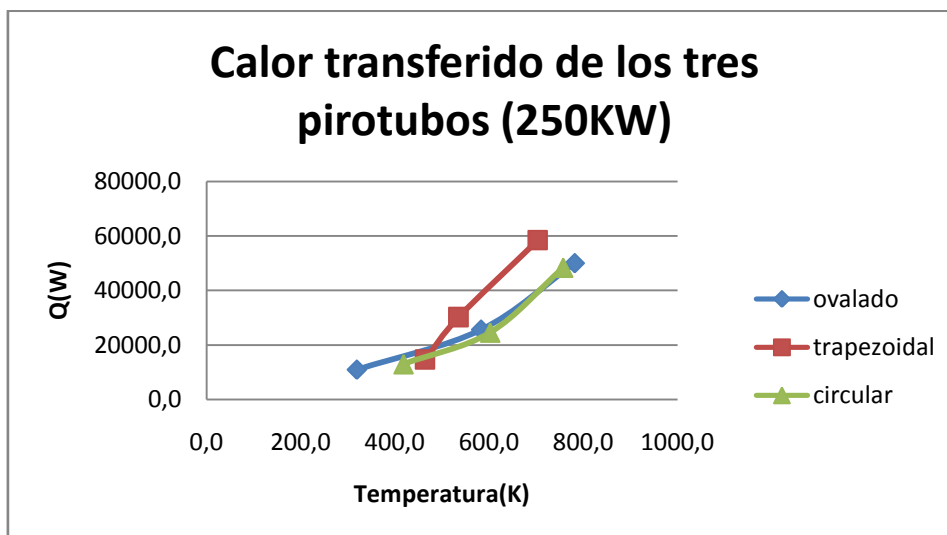


Figura 29. Calor transferido de los tres pirotubos (potencia 250KW)



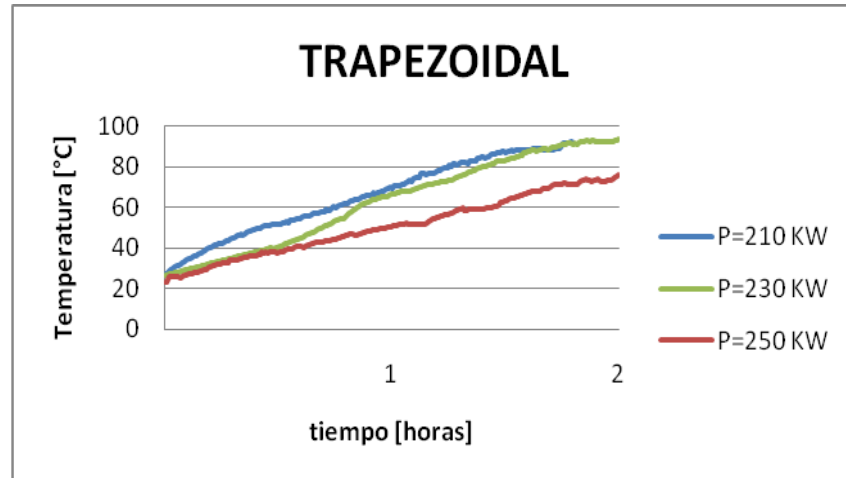
De las anteriores graficas se observa que el pirotubo trapezoidal transfiere mayor calor en las temperaturas mas altas del ducto entre 450-800°C mientras que para temperaturas mas bajas no se observa un cambio apreciable entre un pirotubo y otro. El pirotubo ovalado y el circular tienen un comportamiento similar en la transferencia de calor observandose que el pirotubo ovalado posee a temperaturas bajas casi la misma transferencia de calor que las otras geometrias a un temperatura mas alta.

3.6 TENDENCIAS DEL CALOR SENSIBLE EN LAS PAILAS.

3.6.1 Temperatura de gases a la entrada de los intercambiadores entre 370 y 430°C.

Para las pailas pirotubulares circular y elíptica, se observó un comportamiento similar en su velocidad de calentamiento del agua, aun cuando se varía la potencia (210 KW, 230 KW y 250 KW). Esto representa que para temperaturas entre 370 y 430 °C una variación en la potencia del quemador de ACPM no genera cambios en la velocidad de calentamiento del agua para estas pailas. Sin embargo, la paila pirotubular trapezoidal revela un comportamiento diferente para las potencia impuestas como se muestra en la figura 11.

Figura 30. Temperatura del agua Vs tiempo. Para la paila pirotubular trapezoidal con T de entrada de gases (370- 430°C) a diferentes potencias.



Se presenta una pendiente menor en la velocidad de calentamiento del agua para la potencia de 250 KW, lo cual muestra que a velocidades bajas y altas temperaturas (370 y 430°C) la paila pirotubular trapezoidal tiene un buen desempeño, esto podría estar ligado a su geometría en forma de paralelepípedo.

3.6.2 Temperatura de gases a la entrada de los intercambiadores entre 280 y 300 °C.

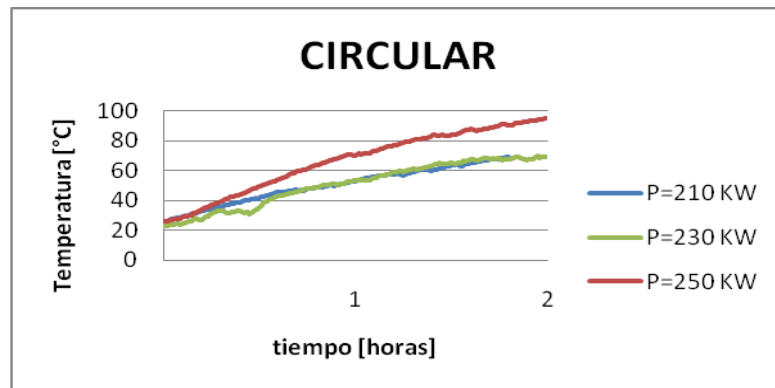
Para este intervalo de temperaturas las pailas pirotubulares circular, trapezoidal y elíptica mostraron comportamientos similares respecto a la velocidad de los gases a las temperaturas entre 280 y 300°C.(ver Anexo F)

3.6.3. Temperatura de gases a la entrada de los intercambiadores entre 200 y 220 °C.

Para temperaturas de entrada de los gases entre 200 y 220°C en las pailas trapezoidal y elíptica, se pudo observar un comportamiento similar respecto a la pendiente de las líneas de velocidad de calentamiento del agua. Además de requerir un intervalo de tiempo mayor a 2 horas, para poder transferir el calor necesario al agua, para hacerla llegar a su temperatura de ebullición. Eso quiere decir que para temperaturas entre 200 y 220 °C las pailas pirotubulares trapezoidal y elíptica registran rendimientos bajos. Al contrario de la paila circular

en la figura 12, la cual refleja una marcada diferencia para la potencia de 250 KW respecto de las potencias de 230 KW y 210 KW, esto lo podemos interpretar diciendo que a regímenes de velocidades altas y temperaturas bajas (200 y 220°C) la paila pirotubular circular registra un buen rendimiento a la potencia de 250 KW. Diferencia que se fue acentuando con la disminución de la temperatura de entrada de los gases a la paila.

Figura 31. Temperatura del agua Vs tiempo. Para la paila pirotubular circular con T de entrada de gases entre (200 – 220 °C) a diferentes potencias.



El diseño experimental es un diseño factorial 3^2 , con tres niveles para cada factor Temperatura y Potencia.

Temperatura:

Nivel -1: 200 – 220°C

Nivel 0: 280 – 300°C

Nivel 1: 370 – 430°C

Potencia:

Nivel -1: 210 kW

Nivel 0: 230 kW

Nivel 1: 250 kW

Se hizo un análisis estadístico para cada geometría, así como se encontró la ecuación de regresión con los mejores valores de los coeficientes de determinación R^2 y R^2 ajustado.

Luego se compararon los resultados para las tres geometrías y se hicieron las correspondientes conclusiones.

3.7 ANÁLISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRÍA TRAPEZOIDAL

Tabla 18. Análisis de varianza para la variable de respuesta Calor Sensible (paila trapezoidal)

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-Ratio	P-valor
A:Temperatura	1,61E7	1	1,61E7	79,26	0,0000
Total error	1,422E6	7	2,032E5		
Total (corr.)	1,753E7	8			

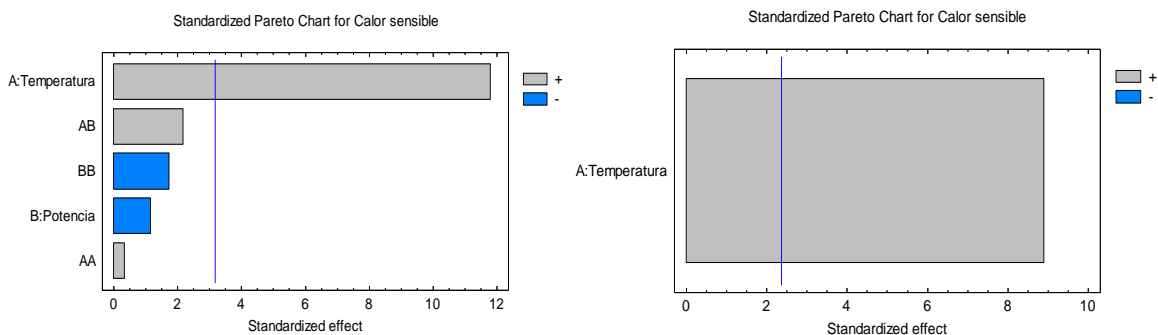
$$R^2 = 91,88 \%$$

$$R^2 \text{ (adjusted for d.f.)} = 90,73 \%$$

La tabla de variabilidad para el calor sensible Anova, muestra la significancia estadística de cada uno de los efectos comparando el cuadrado medio contra una estimación del error experimental. En este caso, 1 efecto ha obtenido valores-p inferiores a 0,05, lo que indica que este es estadísticamente significativo en el 95,0% de nivel de confianza.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo obtenido explica el 91,88% de la variabilidad de los datos para la variable de respuesta calor sensible. El coeficiente de determinación R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 90,73%, lo que indica un ajuste muy bueno del modelo obtenido a los datos.

Figura 32. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Sensible (paila trapezoidal)

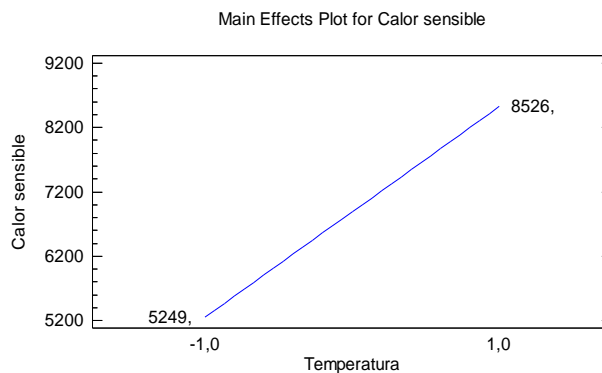


En la grafica de Pareto se observan los factores que son estadísticamente significativos a la variable de respuesta calor sensible, en la grafica de la izquierda se encuentran todos los factores con dos niveles de interacción, en la grafica de la derecha, los efectos que no son significativos han sido excluidos.

Se observa que existe un efecto significativo de solo un factor principal (temperatura), se observa que el factor tiene un efecto positivo sobre la variable de respuesta, eso quiere decir que entre mayor sea el valor de temperatura, mayor es el valor de calor sensible.

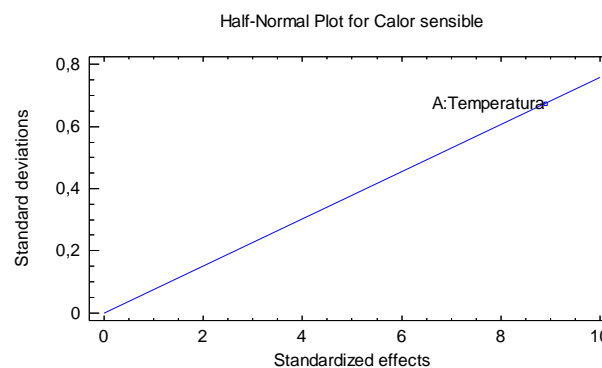
No existe efecto significativo de la interacción temperatura – potencia, por lo cual la grafica de interacción no se presenta.

Figura 33. Gráfica de Efectos Principales



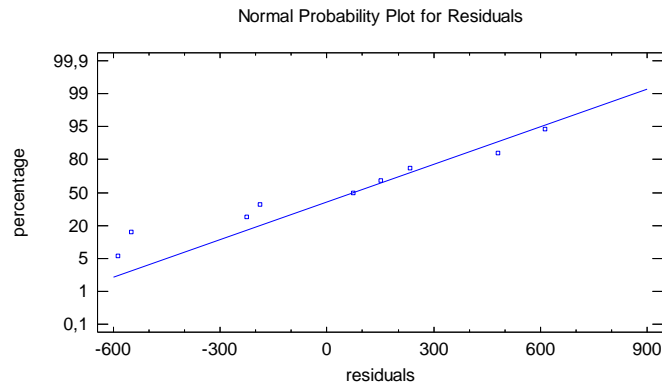
En la grafica de efectos principales, se observa el efecto significativo del factor temperatura, esta grafica explica que mientras que la temperatura esté en su nivel menor, el valor de calor sensible es menor y si la temperatura está en su nivel mayor, el valor de calor sensible será mayor. También muestra los valores máximo y mínimo de calor sensible dados por el modelo.

Figura 34. Gráfica de probabilidad media normal para calor sensible



En la grafica de probabilidad media normal, se muestra el factor principal temperatura como el único factor significativo a la variable de respuesta calor sensible y se encuentra en un punto alto de acuerdo a los efectos estandarizados.

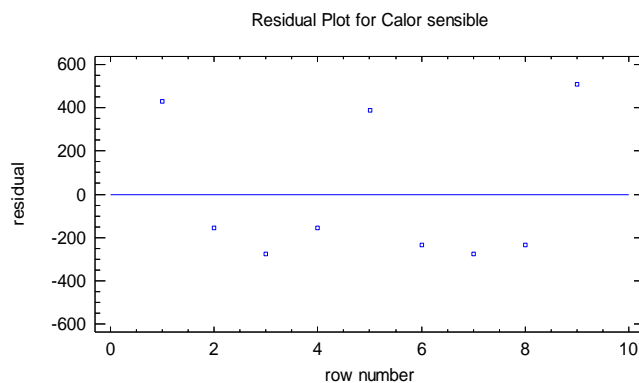
Figura 35. Gráfica de probabilidad normal para los residuos



Como se explico para el calor latente, la grafica de probabilidad normal muestra la alineación de los residuos, si muestra una cierta alineación se cumple que el supuesto de normalidad es correcto, lo que quiere decir que la variable de respuesta sigue una distribución normal con media cero. La línea no es completamente recta, pero dado que el procedimiento de Anova es robusto, admite desviaciones moderadas de dichos supuestos.

Para verificar que la alineación mejor se da en una distribución normal de los datos, se obtuvieron varios anovas con grafica de probabilidad normal para distribuciones Poisson (raíz cudrada), reciproco, reciproco de la raíz cuadrada y transformación logaritmo. Ninguna de las anteriores transformaciones dio mejor resultado que la presente. Esta comprobación de supuesto de varianza constante se hizo de acuerdo al modelo que correspondió al mejor Anova.

Figura 36. Grafica de residuos vs orden de corrida



En la grafica de residuos vs orden de corrida se muestra que si se cumple el supuesto de independencia de los factores, los puntos en la gráfica se distribuyen aleatoriamente, bajo y sobre la línea horizontal. También es importante que los puntos no tengan una forma de corneta, para los cual no se cumpliría el principio de independencia de los factores.

Tabla 19. Coeficientes de regresión para Calor Sensible en la paila de geometría trapezoidal

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
<i>Constante</i>	<i>2400</i>
<i>A:Temperatura</i>	<i>14,25</i>

$$\text{Calor sensible} = 2400 + 14,25 * \text{Temperatura}$$

3.8 ANALISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRIA CIRCULAR

Tabla 20. Análisis de varianza para la variable de respuesta Calor Sensible (paila circular)

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-Ratio	P-valor
A:Temperatura	5,607E6	1	5,607E6	48,54	0,0002
Total error	8,086E5	7	1,155E5		
Total (corr.)	6,415E6	8			

$$R^2 = 87,4 \%$$

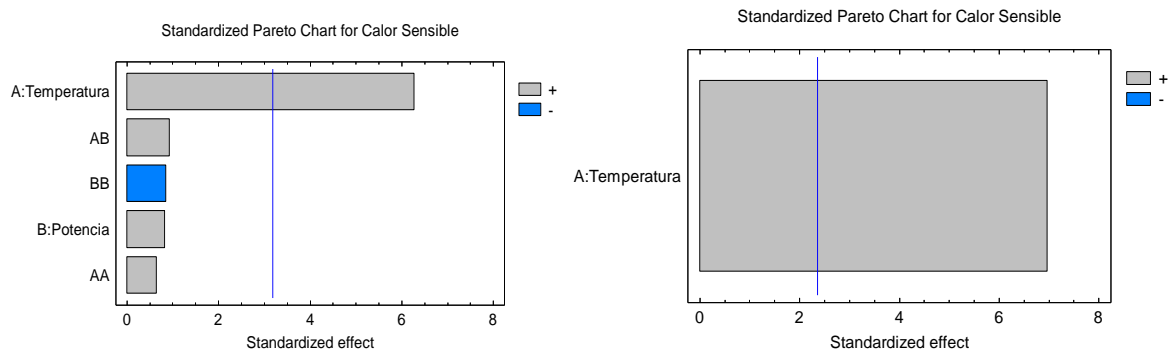
$$R^2 \text{ (adjusted for d.f.)} = 85,59 \%$$

La tabla de variabilidad para el calor sensible Anova, muestra la significancia estadística de cada uno de los efectos comparando el cuadrado medio contra una estimación del error experimental. En este caso, 1 efecto ha obtenido valores-p inferiores a 0,05, lo que indica que es estadísticamente significativo en el 95,0% de nivel de confianza.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo obtenido explica el 87,4% de la variabilidad de los datos para la variable de respuesta calor sensible. El coeficiente de determinación R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar

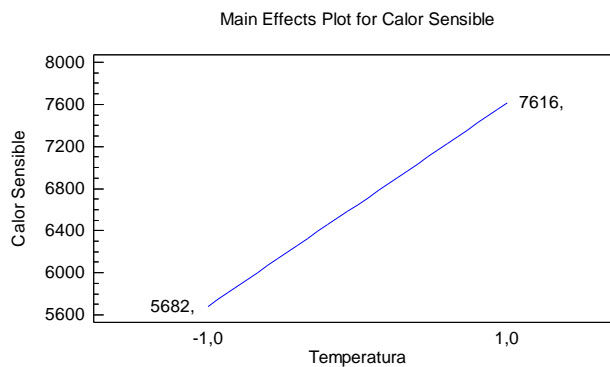
modelos con diferente número de variables independientes, es 85,59%, lo que indica un ajuste por encima de 85% del modelo obtenido a los datos.

Figura 37. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Sensible (paila circular)



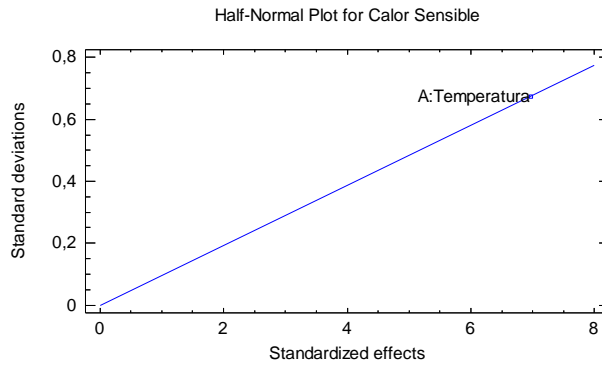
En la grafica de Pareto se observan los factores que son estadísticamente significativos a la variable de respuesta calor sensible. Al igual que en el caso anterior solo el factor principal temperatura es significativo a la variable de respuesta y este efecto es positivo a la variable de respuesta.

Figura 38. Gráfica de Efectos Principales



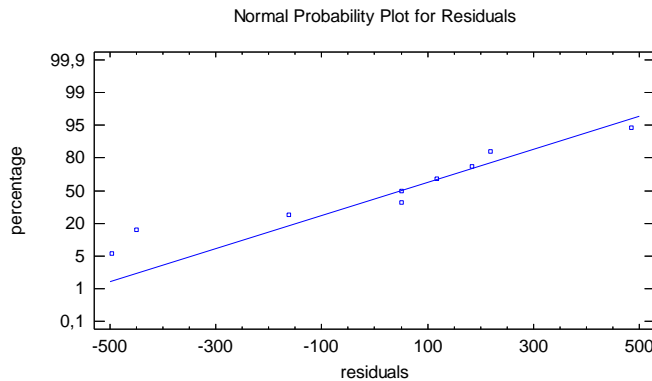
Como el único efecto es el del factor temperatura, la grafica muestra el efecto positivo, para el rango de temperatura entre 200-220°C, la respuesta de calor sensible es menor, para el rango de temperatura entre 370-430°C, el calor sensible es mayor. También muestra los valores mínimo y máximo de calor sensible dado por el modelo con coeficientes de regresión mayores a 85%.

Figura 39. Gráfica de probabilidad media normal para calor sensible



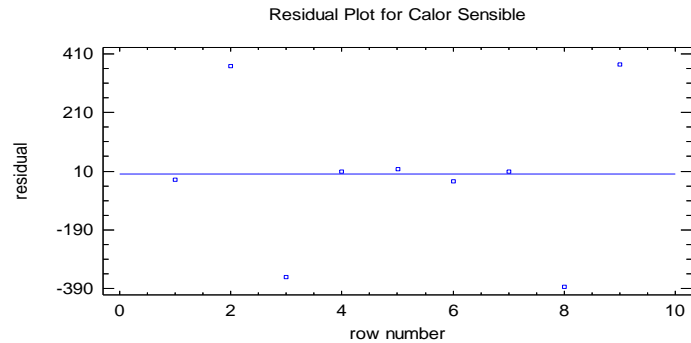
Al igual que en el caso anterior solo se muestra el factor principal temperatura, ya que este es el único factor significativo a la variable de respuesta calor sensible. Esta grafica confirma lo observado en el Pareto.

Figura 40. Gráfica de probabilidad normal para los residuos



Se realizo el mismo procedimiento con la paila de geometría trapezoidal haciendo diferentes transformaciones para observar con cual transformación se alineaban mejor los puntos. Ninguna de las transformaciones dio mejor resultado que la mostrada, donde se cumple el supuesto de normalidad y que la variable de respuesta sigue una distribución normal con media cero. La línea no es completamente recta, pero dado que el procedimiento de Anova es robusto, admite desviaciones moderadas de dichos supuestos.

Figura 41. Grafica de residuos vs orden de corrida



En la grafica de residuos vs orden de corrida se muestra que si se cumple el supuesto de independencia de los factores, los puntos en la gráfica se distribuyen aleatoriamente, bajo y sobre la línea horizontal y no tienen forma de corneta, una expresión que se da para cuando los datos no cumplen los supuestos, en este caso independencia de los factores.

Tabla 21. Coeficientes de regresión para Calor sensible en la paila de geometría circular

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
Constante	4001,
A:Temperatura	8,406

$$\text{Calor Sensible} = 4001 + 8,406 * \text{Temperatura}$$

3.8.1 ANALISIS PARA LA PAILA DE GEOMETRIA OVALADA

Tabla 22. Analysis de Varianza calor sensible

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	F-Ratio	P-valor
A:Temperatura	1,31E7	1	1,31E7	23,94	0,0018
Total error	3,83E6	7	5,471E5		
Total (corr.)	1,693E7	8			

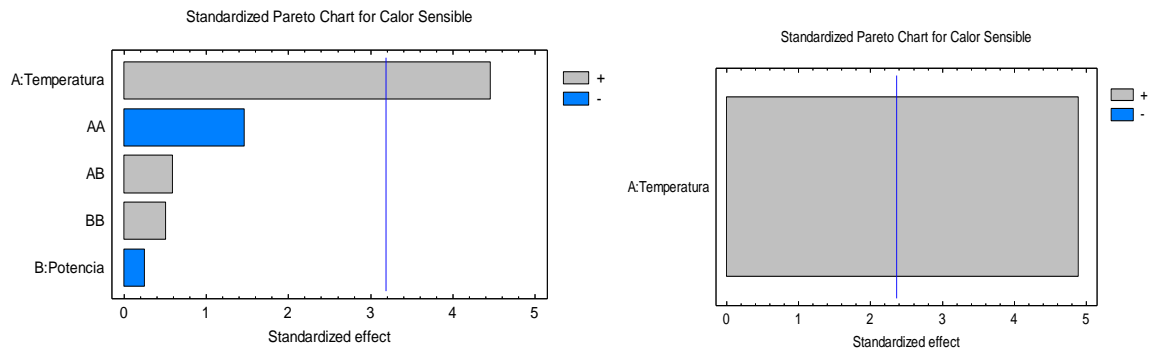
$$R^2 = 77,37 \%$$

$$R^2 \text{ (adjusted for d.f.)} = 74,14 \%$$

La tabla de variabilidad para el calor sensible Anova, muestra la significancia estadística de cada uno de los efectos comparando el cuadrado medio contra una estimación del error experimental. En este caso, 1 efecto ha obtenido valores-p inferiores a 0,05, lo que indica que es estadísticamente significativo en el 95,0% de nivel de confianza.

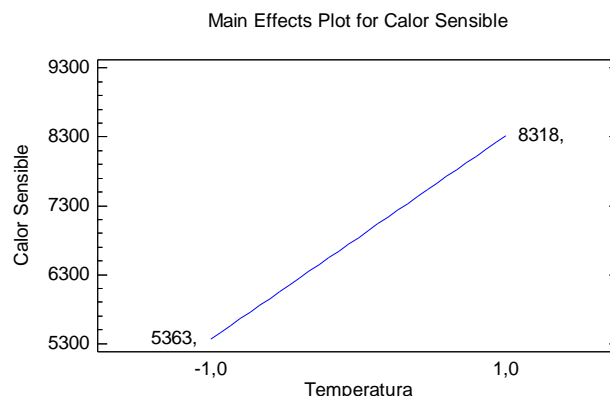
El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo obtenido explica el 77,37% de la variabilidad de los datos para la variable de respuesta calor sensible. El coeficiente de determinación R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 74,14%, lo que indica un ajuste bueno del modelo obtenido a los datos.

Figura 42. Gráfica Estandarizada de Pareto para la variable de respuesta Calor Sensible (paila ovalada o elíptica)



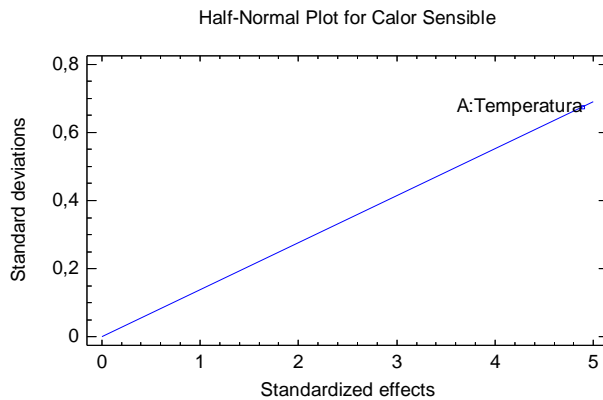
En la grafica de Pareto se observa que el factor significativo es la temperatura, igual que en la paila trapezoidal y circular. La temperatura fue el único factor significativo a la variable de respuesta calor sensible. Igualmente la grafica muestra que el efecto de la temperatura es positivo con respecto al calor sensible.

Figura 43 . Gráfica de Efectos Principales



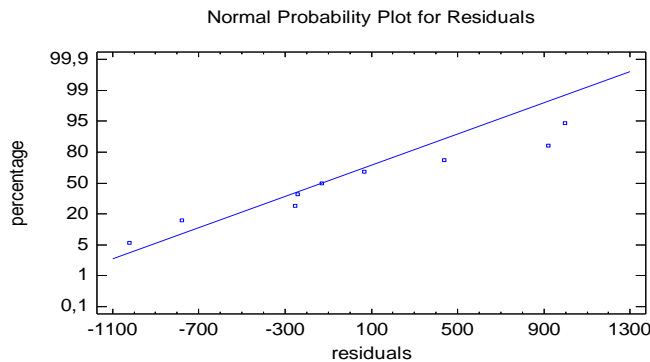
Solo existe un efecto principal y este es el efecto de la temperatura, como se afirmo en el análisis de la grafica de Pareto acerca del efecto positivo, mientras aumenta el nivel de la temperatura de menor a mayor, el valor de calor sensible es mayor. No existe efecto de interacción, por lo tanto no se presenta el grafico de interacción ni el grafico de factor medio. Esta grafica también muestra que el valor de calor sensible mayor obtenido con el modelo presentado más abajo, es 8318 y se encuentra en el nivel mayor de temperatura, luego el valor óptimo de T para maximizar el valor de la respuesta es en el rango de 370 – 430°C. Además solo interesa observar el rango de temperatura, ya que la potencia no es influyente en la variable de respuesta calor sensible.

Figura 44. Gráfica de probabilidad media normal para calor sensible



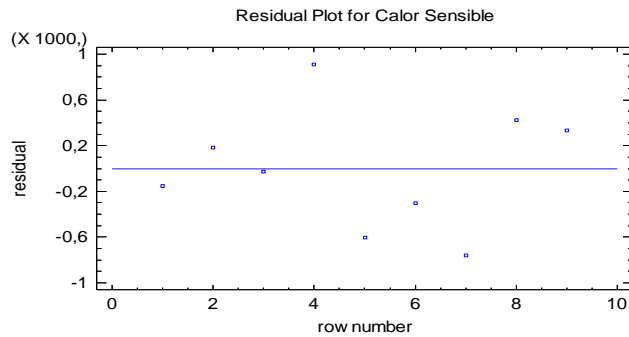
Al igual que en el caso de la paila trapezoidal y circular, solo se muestra el factor principal temperatura, ya que este es el único factor significativo a la variable de respuesta calor sensible. Esta grafica confirma lo observado en el Pareto.

Figura 45. Gráfica de probabilidad normal para los residuos



Con esta grafica el supuesto de normalidad se cumple, como en el anterior caso, se analizaron y graficaron varias transformaciones que no siguieron un patrón lineal.

Figura 46. Grafica de residuos vs orden de corrida



En la grafica de residuos vs orden de corrida se muestra que se cumple el supuesto de independencia de los factores, los puntos en la gráfica se distribuyen aleatoriamente, bajo y sobre la línea horizontal.

Tabla 23 . Coeficientes de regresión para Calor sensible en la paila de geometría elíptica

Coeficiente	Estimado
Constante	2793
A:Temperatura	12,85

$$\text{Calor Sensible} = 2793 + 12,85 * \text{Temperatura}$$

3.9 ANÁLISIS PARA LAS TRES GEOMETRÍAS

Para todos los casos de las tres geometrías de paila, los supuestos con los que se hace este análisis de varianza constante, independencia de los factores y que los datos tengan una distribución normal se cumplen.

Tabla 24 . Factores estadísticamente significativos para cada geometría de paila.

	Temperatura	Potencia	Temperatura - Potencia	Temperatura -	Potencia -
--	-------------	----------	---------------------------	------------------	---------------

				Temperatura	Potencia
Trapezoidal					
Circular					
Ovalada					

Lo que demuestra que las geometrías tienen cierta igualdad en cuanto a los factores significativos a la variable de respuesta calor sensible.

En la siguiente tabla se muestran los niveles de temperatura y potencia en los que se encuentran mayores valores de calor sensible para las tres geometrías de paila de acuerdo a los gráficos de efectos principales, ya que en ninguno de los casos hubo significancia de ninguno de los factores de interacción.

Tabla 25. Niveles de Temperatura y potencia

	Temperatura			Potencia		
	200-220°C	280-300°C	370-430°C	210kW	230kW	250kW
Trapezoidal						
Circular						
Ovalada						

Las casillas de color rojo, son los valores de calor sensible más altos. Se observa que para todos los casos, los niveles de potencia no son significativos a la transferencia de calor.

Se concluye que la mejor transferencia de calor para cada una de las tres geometrías, tomando el valor de calor sensible mayor es la siguiente:

Tabla 26. Mejor transferencia de calor para cada una de las tres geometrías

Geometría	Rango de Temperatura	Potencia
Trapezoidal	370-430°C	-
Circular	370-430°C	-
Ovalada	370-430°C	-

Como se ha observado, existe igualdad entre las geometrías de las pailas, en cuanto al rango de temperatura y la no significancia de la potencia con respecto a la variable de respuesta calor sensible.

CONCLUSIONES

El modelo de cálculo tuvo el mejor ajuste a una temperatura media entre (700-500°C) con un porcentaje de error de aproximadamente el 4%. Para el intervalo más alto de temperaturas (700 y 800°C) tuvo un porcentaje de error del -10% y para el tercer intervalo de temperaturas (500-300°C) con el mayor porcentaje de error del 20%. El modelo de cálculo subestimó de esta forma al calor medido en la primera posición (rango más alto de temperatura entre 800-700°C) y sobrestimó al calor medido en las otras dos posiciones intervalo de temperatura entre (700-400°C).

Se observa que el efecto significativo del factor temperatura es mayor al efecto que tiene el factor potencia. La temperatura en su nivel más alto, es decir en el rango entre 700-800°C, da como resultado un mayor valor de calor latente para el tipo de geometría de la paila trapezoidal. Igualmente sucede con el factor potencia, pero este efecto es mucho menor, el valor de calor latente para los niveles del factor potencia no presentan altas diferencias.

Como existe efecto significativo de la interacción Temperatura – Potencia, la medida en que aumenta la temperatura, la potencia tiene una misma tendencia, tanto para su nivel bajo, como para su nivel alto. Esta tendencia da la certeza que mientras que se aumenta la temperatura, cuando la potencia está en su nivel mayor, es decir, 250 kW, la variable de respuesta aumenta; igualmente, si la temperatura se aumenta, cuando la potencia está en su nivel menor, es decir, 210 kW, la variable de respuesta aumenta.

Se observa que existe un efecto significativo tanto en los factores principales (temperatura y potencia), como en los factores de interacción, sin embargo el factor potencia es menos significativo que los factores de interacción. También se observa que todos los factores tienen un efecto positivo sobre la variable de respuesta, eso quiere decir que entre mayor sea el valor de temperatura y potencia, mayor es el valor de calor latente.

A pesar de que entre una paila y otra no había una diferencia predominante en el área transversal de paso de los gases, al parecer es un factor importante, ya que esta influye en el régimen que se desarrolle dentro de los tubos (turbulento, transitorio o laminar), influyendo en la transferencia de calor. Igualmente el área transversal de lámina que rodea los tubos fue un factor importante en la transferencia de calor, siendo más notorio en la primera posición (800 y 700 °C). En términos generales y teniendo en cuenta los factores anteriores, la paila con mejor transferencia de calor experimental fue la trapezoidal seguida de la elíptica y por último la circular.

Las pailas de pirotubo trapezoidal y elíptico en términos de (Número de Pirotubos x Área ocupada) presentan bastantes ventajas, debido a su forma alargada, ocupan menos espacio en una misma área. Gracias a esta ventaja se puede incrementar el área de transferencia de calor, aumentando el número de pirotubos y mejorando en gran medida la eficiencia del proceso de transferencia de calor. Además su forma permite mantener una distancia adecuada para facilitar su mantenimiento entre los tubos. Ventajas que no presenta la paila pirotubular circular que ocupa un mayor espacio debido a su geometría.

En términos de calor sensible, la paila elíptica es la que mejor se comporta a diferentes potencias e intervalos de temperatura.

La paila pirotubular trapezoidal muestra la mejor velocidad de calentamiento, a velocidades bajas y altas temperaturas de los gases de combustión y para regímenes de velocidades altas y temperaturas bajas, la paila pirotubular circular incrementa la velocidad de calentamiento del agua.

Basados en los criterios básicos de selección de geometría de pirotubo presentados en este documento la paila elíptica se convierte en la mejor opción de geometría.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar las geometrías elípticas en hornillas paneleras, por su buen rendimiento y por las ventajas que presentan según los criterios básicos de selección de geometría mostrados en este documento.

Se recomienda seguir con los estudios de evaluación de las pailas pirotubulares con diferentes geometrías, teniendo en cuenta el ducto de gases, con el fin de aproximar el estudio a las condiciones de operación reales en que se utilizan estas pailas.

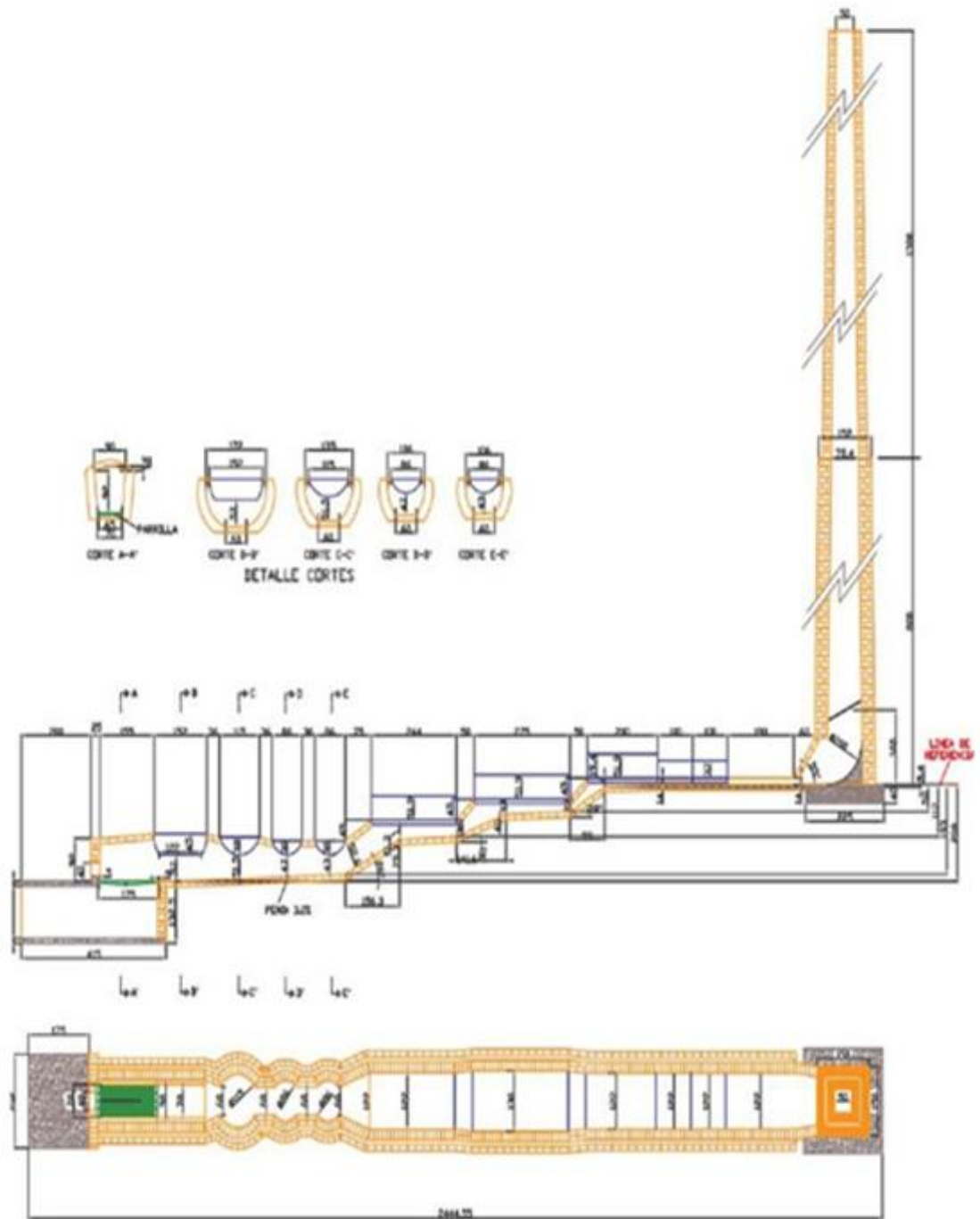
Aun cuando el modelo teórico mostro un porcentaje de error bajo, se recomienda que para la primera posición (rango de temperaturas entre 800°C-700°C) donde se subestima al calor real transferido, adicionar una resistencia de convección nucleada para una placa vertical y una desviación estandar menor en la tercera para una paila pirotubular en esta posición y para el tercer rango de temperaturas(500-300°C) se podria hacer un ajuste del 20 % o quitar la resistencia del gas contra una placa vertical (mirar su comportamiento) para obtener así un menor porcentaje de error y una desviación estandar menor.

BIBLIOGRAFIA

- GERARDO GORDILLO, Simulación Del Movimiento Del Jugo En Un Intercambiador Piro-tubular Para La Industria Panelera, artículo, Universidad de los andes, 2000.
- PERILLA C., SIERRA R., Modelo De Transferencia De Calor Para Pailas En La Industria Panelera, Tesis De Grado, Universidad América, 1991.
- HERNANDEZ, R., Determinación Dinámica de los Coeficientes Globales de Transferencia de Calor para las apilas Aleteada, Redonda, Plana, Piro-tubular y caldera enterrada (Semicilíndrica) usadas en la industria panelera, Bucaramanga, 2004.
- MAHECHA. B. Desarrollo de una herramienta computacional para el diseño óptimo de hornillas paneleras. Tesis de grado (Ingeniería Química) Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga, 1997.
- MONTOYA L., ROMERO H., Estudio hidrotérmico para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor en tres tipos de pailas para hornillas paneleras, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1999.
- CIMPA (Convenio ICA-HOLANDA De Investigación y Divulgación Para El Mejoramiento De La Industria Panela). Investigación y Generación de Tecnología para el Mejoramiento De Hornillas Paneleras. Barbosa, 1992.
- BUSTOS ROMERO, José A. y HERNANDEZ SUAREZ, Joaquín. Modelos matemáticos para el diseño óptimo de hornillas paneleras. 1979.
- GORDILLO A., G. y GARCÍA B., H. Manual para el diseño y construcción de hornillas paneleras. R. 1992.
- INCROPERA., F WITT D., Fundamentos de Transferencia de Calor. Editorial Pearson. Cuarta edición. Mexico. 1999.
- FRANK KREITH, Principios de transferencia de calor, Editorial Thomson 2001.
- HOLMAN, J. P., Transferencia de calor, Compañía Editorial Continental S.A., Mexico, 1995.
- OSIZIC N., Transferencia de calor. Ed. McGraw Hill. Primera edición 1979.
- PERRY R., et al. Chemical Engineers Handbook, New York. 6a. Ed. 1985.

ANEXOS

ANEXO A. HORNILLA PANELERA



ANEXO B. DIMENSIONAMIENTO PAILAS PIROTUBULARES CIRCULAR, ELIPTICA, TRAPEZOIDAL

Paila pirotubular circular:



Paila pirotubular circular	
Largo	1 m
Ancho	0,6 m
Profundidad	0,25 m
Número de tubos	3
Diámetro de tubo	0.13 m
Área de intercambio de calor	1.34 m ²
Área transversal para flujo de gases	0.04 m ²
Perímetro de tubo	0.41 m

Paila pirotubular elíptica:



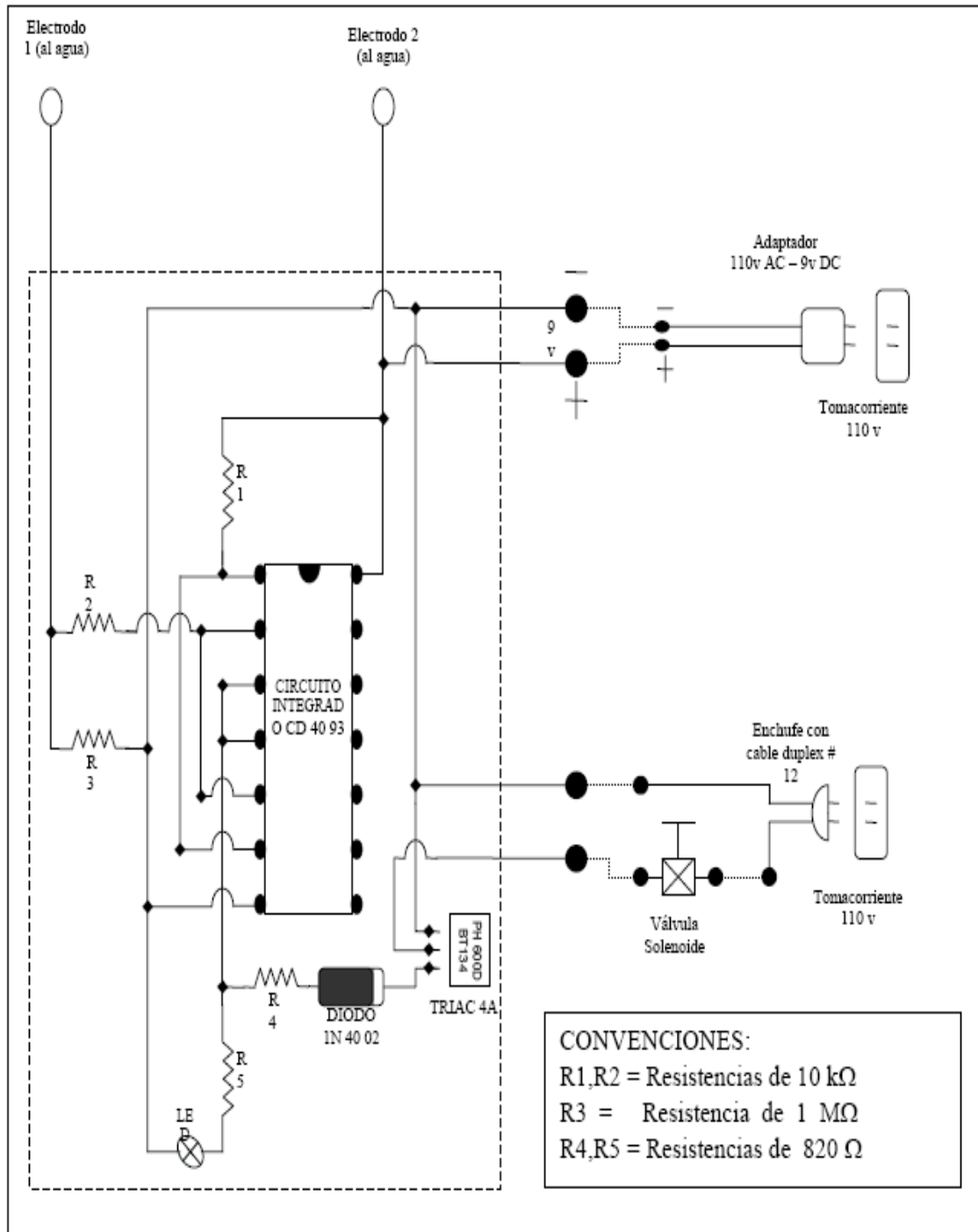
Paila pirotubular elíptica	
Largo	1 m
Ancho	0,60 m
Profundidad	0,25 m
Número de tubos	3
Eje menor	0.11 m
Eje mayor	0.14 m
Área de intercambio de calor	1.368 m ²
Área transversal para flujo de gases	0.0363 m ²
Perímetro de tubo	0.41 m

Paila pirotubular trapezoidal:



Paila pirotubular trapezoidal	
Largo	1 m
Ancho	0.6 m
Profundidad	0.25 m
Número de tubos	3
Ancho de tubo	0.08 m
Base menor del trapecio del tubo	0.11 m
Base mayor del trapecio del tubo	0.14 m
Área de intercambio de calor	1.37 m ²
Área transversal para flujo de gases	0.036 m ²
Perímetro de tubo	0.41 m

ANEXO C. CIRCUITO ELECTRONICO PARA EL CONTROL DE NIVEL DE AGUA EVAPORADA EN LOS INTERCAMBIADORES.



ANEXO D. COMPOSICIÓN DEL COMBUSTIBLE Y GASES DE COMBUSTIÓN

El calor necesario para la realización de los experimentos y sus repeticiones fue generado por la combustión de ACPM, la cual se realiza por la reacción química rápida del oxígeno del aire con los elementos combustibles del ACPM y la ayuda de la chispa producida por un arco eléctrico⁹.

COMBUSTIBLE	%C	%H	%S	%CENIZAS	%HUMEDAD
ACPM	86.6	13	0.4	0.01	0

Composición del combustible ACPM en % peso.

COMPOSICION DE GASES DE COMBUSTION				
%CO	%CO2	%O2	%N2	%H2O
0.03	5.8	13.82	76.55	3.79

Composición de la masa de gases en la combustión expresada en fracción molar.

Estas composiciones se midieron por medio de un analizador portátil de gases marca Testo 350K-L controlador 3508.

⁹ MONTOYA, Luis. ROMERO, Horacio., Estudio Hidrotérmico Para La Determinación De Los Coeficientes De Transferencia De Calor En Tres Tipos De Pailas Para Hornillas Paneleras. Bucaramanga, 1999.

La viscosidad dinámica, la conductividad y la densidad de los gases de combustión en función de la temperatura promedio de los gases, están determinadas por las siguientes ecuaciones respectivamente¹⁰:

$$VD_G = 1,79 * 10^{-5} + 3,35 * 10^{-8} * T_G$$

$$K_G = 0,00229 + 6,47 * 10^{-5} * T_G$$

$$\rho_G = \frac{P * M}{R * (T_G + 273.5)}$$

La capacidad calorífica de los gases de combustión esta determinada por la ecuación:

$$Cp_G = 4,18 * \frac{Cp_i * X_i}{M_i}$$

COMPUESTO	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	UNIDAD
CO	6,600	0,001200	0	0	Kcal/Kmol °K
CO2	10,340	0,002740	0	-195500	Kcal/Kmol °K
H2O	8,220	0,000150	0,00000134	0	Kcal/Kmol °K
O2	8,270	0,000258	0	-187700	Kcal/Kmol °K
N2	6,500	0,000150	0	0	Kcal/Kmol °K

Datos de capacidad calorífica de los gases¹¹, $Cp_i = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3/T^2$

¹⁰ PERILLA C. y SIERRA R. Proceso de transferencia de calor para pailas en la industria panelera, Tesis (ingeniería química), Universidad de América, Facultad de Ingeniería Química, Bogotá, 1991.

¹¹ PERRY R., et al. Chemical Engineers Handbook, New York. 6a. Ed. 1985.

ANEXO E. CORRELACIONES Y CODIGO PROGRAMADO DEL MODELO TEÓRICO.

Correlaciones para el flujo interno que pasa por los tubos del intercambiador de calor.

El fluido interno es el gas de combustión se realiza por convección forzada:

a) Para el flujo laminar con flujo totalmente desarrollado ($Re < 2300$):

$$Nu_L = 3.66 \text{ (en condiciones de una temp. de superficie constante)}$$

b) Si el flujo es turbulento ($Re \geq 10000$)

$$Nu_t = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3}$$

c) Si el flujo es transitorio ($2300 < Re < 10000$)

$$Nu = Nu_L + \frac{(Nu_t - Nu_L)}{(10000 - 2300)} * (Re - 2300)$$

Para el flujo externo que pasa por placas planas por convección forzada.

- Para flujo laminar. Correlaciones de cálculo para flujo laminar ($Re < 5 * 10^5$)

$$Nusselt \text{ local} = Nu_x = 0,332 * (Rex)^{1/2} Pr^{1/3} \text{ obteniendo } h \text{ local}$$

$$Nusselt \text{ prom} = Nu_p = 0,664 * (Rex^{1/2} * Pr^{1/3}) \text{ obteniendo } h_p$$

- Para flujo turbulento. Correlación de cálculo para flujo turbulento ($Re > 5 * 10^5$)

$$Nu = 0,0288 * Re^{0,8} * Pr^{1/3}$$

Correlación para el flujo de gas que se estrella con una placa vertical:

- Para el flujo externo (Geometrías no circulares) por convección forzada

$$Nu = C * Re^m * Pr^{1/3}$$

- Para una placa vertical:

$$C = 0,28, \quad m = 0,731$$

Perdidas de calor por convección:

Perdida de calor entre el jugo de caña y el ambiente se toma como intercambio de calor de una placa horizontal por convección libre o natural¹²:

La correlación de cálculo para este caso es:

$$Ra = (g * B * (T_w - T_a) * l^3) / (V_f * A)$$

$$Nu = 0.27 * (Ra^{1/4})$$

Ebullicion Nucleada:

Según Foster y Zuber¹³ para la ebullición nucleada en piscina de líquido el coeficiente de transferencia de calor: $h = f(\text{naturaleza superficie})$

$$h = 0,00122 * \left[\frac{kl^{0,79} \cdot Cpl^{0,45} \cdot \rho l^{0,49}}{\sigma^{0,5} \cdot l^{0,29} \cdot \lambda^{0,24} \cdot \rho v^{0,24}} \right] (T_w - T_s)^{0,24} (P_w - P_s)^{0,75}$$

¹² INCROPERA.,F WITT D.,Fundamentos de Transferencia de Calor. Editorial Pearson.Cuarta edición. Mexico. 1999.

¹³FRANK KREITH, Principios de transferencia de calor, Editorial Thomson 2001.

CODIGO DE PROGRAMACION MODELO DE CALCULO

Function Qtot(Tent, Tsal, P, PM, CP, FMT, dhT, Atc, At, FMD, Lplaca, AD, ADC, es, Ka, C, m, Lpvert, Apl, hfg, Cpv, Tsup, Tsat, Cj, g, dL, dV, D, Uv, Kv, Aj, fM, Tge, Tje)

Dim T, K, V, Re, Pr, Nut, Nutu, Nul, htAt, Rep, Nup, hpAD, Nupl, hpl, hplApl, hfgp, Nuj, hjAj, UA, mcpmin, Qmaximo, E

'temperatura° C

$$T = (Tent + Tsal) / 2$$

'COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD DE LOS GASES (W/m°C)

$$K = 2.29 * 10^{-2} + 6.47 * (10^{-5}) * T$$

'Viscosidad de los gases (Kg/m.s)

$$V = 1.79 * 10^{-5} + 3.35 * 10^{-8} * T$$

$$Tk = T + 273$$

'Densidad de los gases

$$D = (PM * P) / (8.3144 * Tk)$$

'Viscosidad dinamica

$$U = V * D$$

'Reynolds de flujo de gases adimensional

$$Re = FMT * dhT / (U * At)$$

'No de Prandt flujo de gases

$$Pr = (V * CP) / K$$

'COEFICIENTE LOCAL DE TRANSFERENCIA LOCAL DE LOS TUBOS

If (Re >= 10000) Then

$$Nut = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3}$$

Elseif (Re <= 2300) Then

$$\text{Nut} = 3.66$$

Else

$$\text{Nutu} = 0.023 * 10000 ^{0.8} * \text{Pr} ^{0.3}$$

$$\text{Nul} = 3.66$$

$$\text{Nut} = \text{Nul} + (((\text{Nutu} - \text{Nul}) / (10000 - 2300)) * (\text{Re} - 2300)) \text{ End If}$$

$$h_t = \text{Nut} * K / d_{hT}$$

'Coeficiente local multiplicado por el area transv de los tubos

$$h_{tAt} = h_t * A_{tc}$$

'COEFICIENTE LOCAL DEL DUCTO COMO PLACA PLANA

$$\text{Rep} = \text{FMD} * L_{\text{placa}} / (V * A_D)$$

If Rep >= 500000 Then

$$\text{Nup} = 0.036 * \text{Pr} ^{(1 / 3)} * (\text{Rep} ^{0.8} - 850)$$

Else

$$\text{Nup} = 0.664 * (\text{Rep} ^{0.5}) * \text{Pr} ^{(1 / 3)}$$

End If

$$h_p = \text{Nup} * K / L_{\text{placa}}$$

$$h_{pAp} = h_p * A_{DC}$$

'Coef local de la placa vert con que se estrella el gas

$$\text{Nupl} = C * (\text{Re} ^m) * \text{Pr} ^{(1 / 3)}$$

$$h_{pl} = \text{Nupl} * K / L_{p\text{vert}}$$

$$h_{plApl} = h_{pl} * A_{pl}$$

'Coeficiente local de los jugos

$$h_{fgp} = h_{fg} + 0.8 * C_{pv} * (T_{\text{sup}} - T_{\text{sat}})$$

$$\text{Nuj} = C_j * ((g * (d_L - d_V) * h_{fgp} * D ^3 / U_v * K_v * (T_{\text{sup}} - T_{\text{sat}})) ^{(1 / 4)})$$

$$h_{jAj} = (K_v * N_{uj} / D) * A_j$$

'Coeficiente global de trans de calor

$$UA = 1 / ((h_{tAt}) + (h_{pAp}) + (h_{plApl}))$$

$$UA = UA + (1 / (h_{jAj}) + (e_s / K_a))$$

$$UA = (1 / UA)$$

$$m_{cpmin} = f_M * C_P$$

$$Nut = UA / m_{cpmin}$$

$$Q_{maximo} = f_M * C_P * (T_{ge} - T_{je})$$

$$E = 1 - \text{Exp}(-Nut)$$

$$Q_{tot} = E * Q_{maximo}$$

End Function

Function Qradiante(Tgas As Double, Tp As Double, Absor As Double, Boltz As Double, EmAc As Double, EmGas As Double)

$$Q_{radiante} = Boltz * ((T_{gas} ^ 4) * Em_{Gas} - (T_p ^ 4) * Absor) * Em_{Ac}$$

End Function

Function QPconv(g, B, Tsup, Ta, Vf, A, Kagua, l, Aagua, Tag, Tam)

$$Ra = (g * B * (T_{sup} - T_a) * l ^ 3) / (V_f * A)$$

'Placa horizontal perdida de calor entre el jugo y el ambiente

$$N_{uj2} = 0.27 * (Ra ^ (1 / 4))$$

$$h_2 = ((K_{agua} * N_{uj2}) / l)$$

$$Q_{Pconv} = h_2 * A_{agua} * (T_{ag} - T_{am})$$

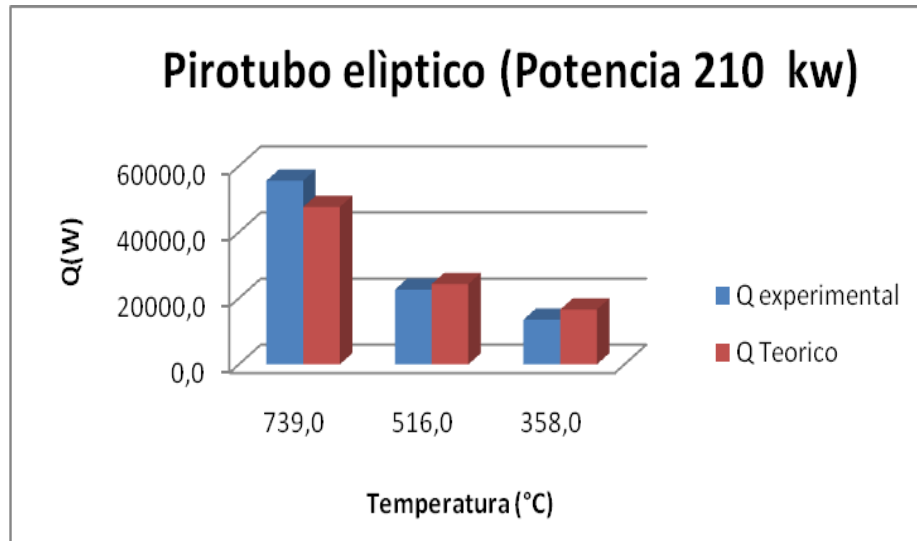
End Function

Function QradP(Tsup, Asup, Talred, Boltz, E)

$$Q_{radP} = Boltz * E * A_{sup} * (T_{sup} ^ 4 - T_{alred} ^ 4) \text{ End Function}$$

ANEXO F. TRANSFERENCIA DE CALOR MODELO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL A DIFERENTES POTENCIAS

Paila Pirotubular elíptica Potencia 1 en tres diferentes posiciones:

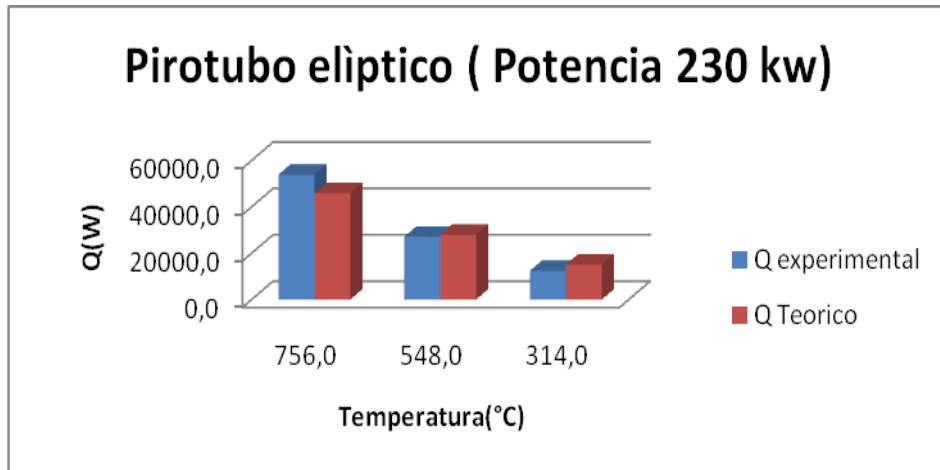


Calor Total Vs temperatura para la paila con geometría elíptica potencia 1 (210kw)

Calor transferido de la paila pirotubular elíptica (potencia 1)

T promedio(C)	Q Experimental(W)	Q Teórico(W)	%Error
739	55589,7	48172,8	-13,3
516	22638,7	24306,0	7,4
358	13532,6	16577,2	22,5
		Promedio	5,53

Paila pirotubular elíptica potencia 2:

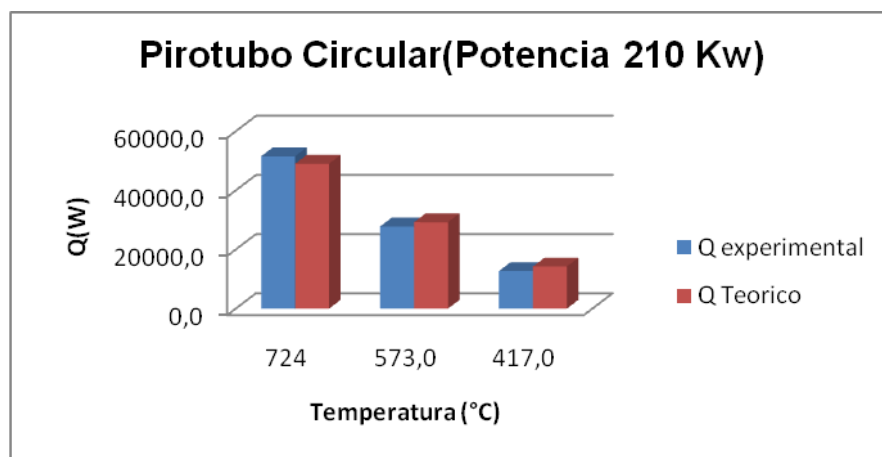


Calor Total en función de la temperatura promedio de entrada y salida para la paila pirotubular elíptica con potencia 2 (230 Kw)

Calor transferido de la paila pirotubular elíptica potencia 2

T promedio(°C)	Q Experimental(W)	Q Teórico(W)	%Error
756	53978,4	45928,5	-14,9
548	27110,1	28001,8	3,3
314	12440,8	15106,6	21,4
Promedio			13,2
Desv Estándar			12,9

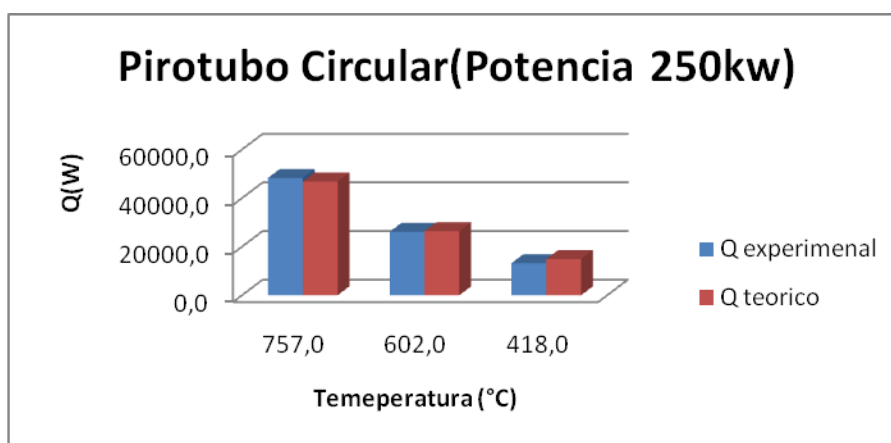
Paila pirotubular Circular con tres diferentes temperaturas y potencias



Calor Total en función de la temperatura promedio de entrada y salida para la paila pirotubular circular potencia 1 (210kw)

Calor transferido de la paila pirotubular circular (potencia 1)

T promedio de los gases(°C)	Q Experimental(W)	Q Teórico (W)	%Error
724	51561	49026	-4,9
573	27794	29233	5,2
417	12720	14229	11,9
Promedio			4,06
Desv Estándar			8,4

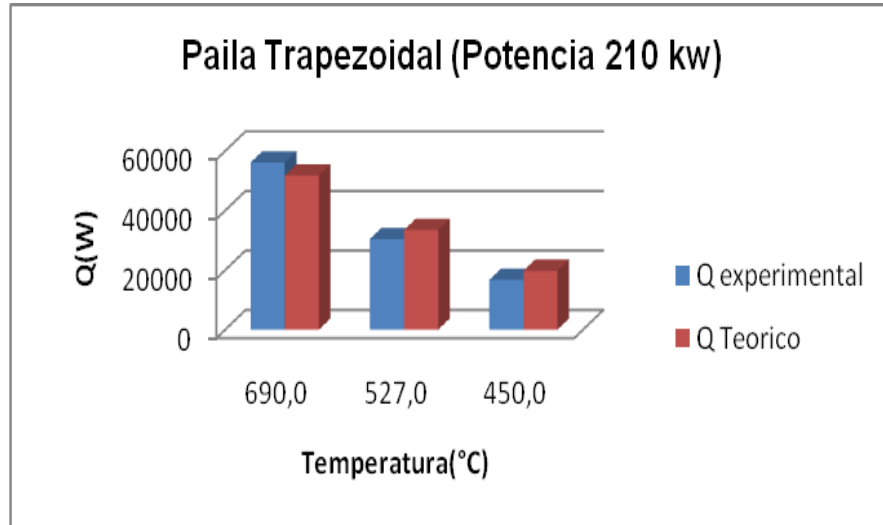


Calor Total en función de la temperatura promedio de entrada y salida para la paila pirotubular circular potencia 3 (250Kw)

Calor transferido de la paila pirotubular circular (potencia 3)

T promedio de los gases (C)	Q Experimental(W)	Q Teórico(W)	%Error
757	48338,9	46801,0	-3,2
602	26183,6	26376,4	0,7
418	13227,9	14876,7	12,5
Promedio			5,46
Desv Estándar			8,1

Paila pirotubular trapezoidal con Tres diferentes temperaturas y a diferentes potencias:

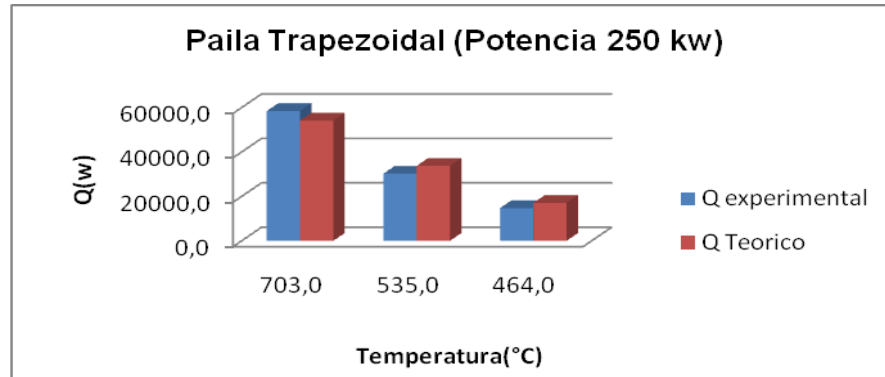


Calor Total en función de la temperatura promedio para la paila pirotubular trapezoidal potencia 1 (210 kw)

Calor transferido de la paila pirotubular trapezoidal (potencia 1)

T promedio de los gases (°C)	Q Experimental(W)	Q Teórico(W)	%Error
690	56193,95833	51803,1	-7,8
527	30493,78241	33483,2	9,8
450	16706,24226	19760,6	18,3
		Promedio	6,76
		Desv Estándar	13,3

Paila pirotubular trapezoidal potencia 3:



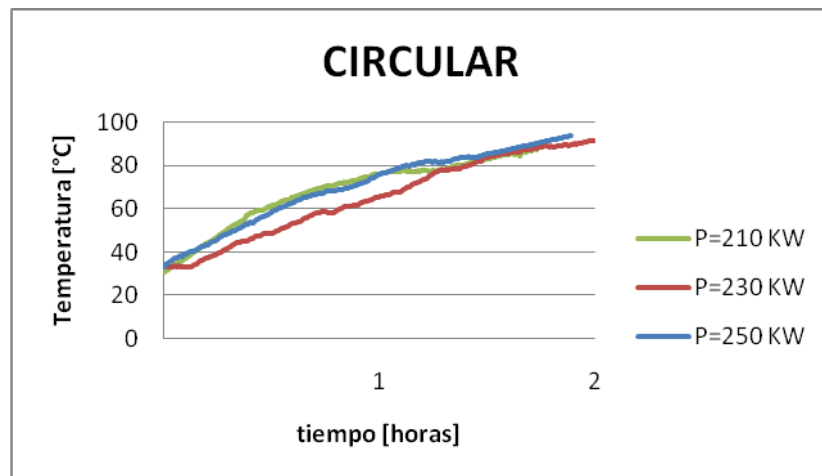
Calor Total en función de la temperatura promedio para la paila pirotubular trapezoidal potencia 3 (250 kw)

Calor transferido de la paila pirotubular trapezoidal (potencia 3, 250 kw)

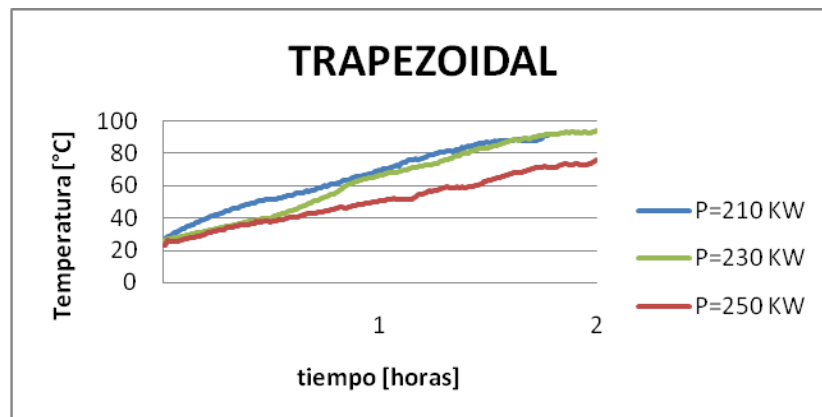
T promedio de los gases (°C)	Q Experimental(W)	Q Teórico(W)	%Error
703	58409,5	54134,4	-7,3
535	30211,8	33749,5	11,7
464	14725,9	17045,0	15,7
	Promedio		6,63

ANEXO G. TENDENCIAS DEL CALOR SENSIBLE EN LAS PAILAS.

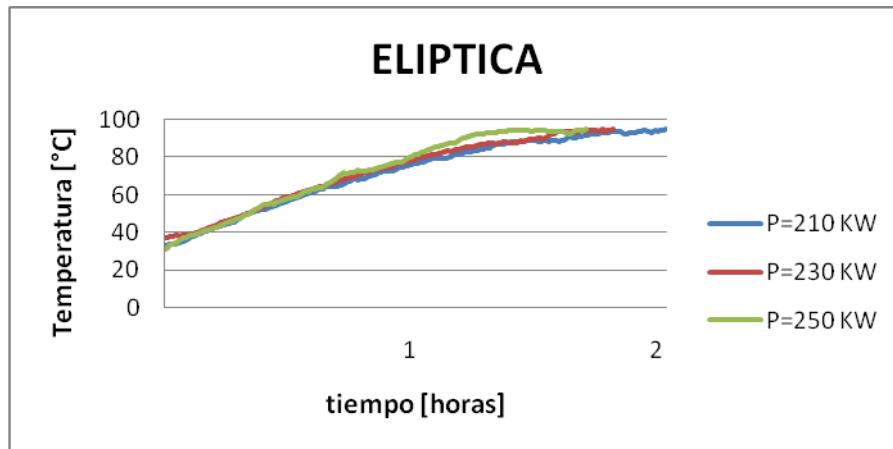
Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular circular con temperatura de entrada de gases entre 370 y 430 °C a diferentes potencias.



Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular trapezoidal con temperatura de entrada de gases entre 370 y 430 °C a diferentes potencias.

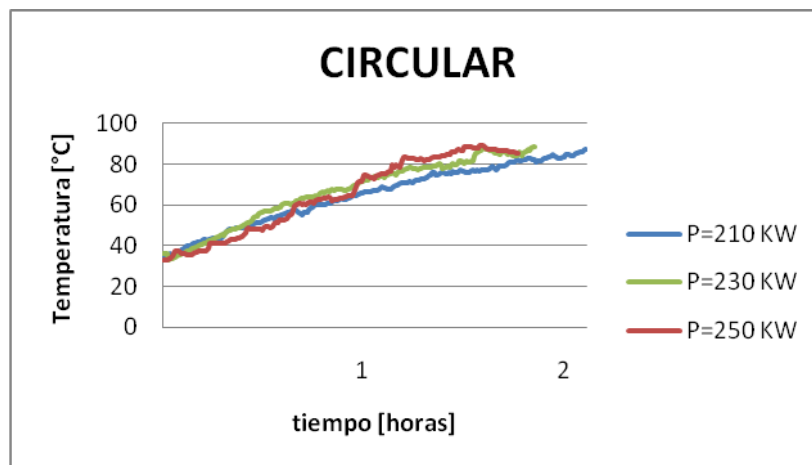


Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular elíptica con temperatura de entrada de gases entre 370 y 430 °C a diferentes potencias.

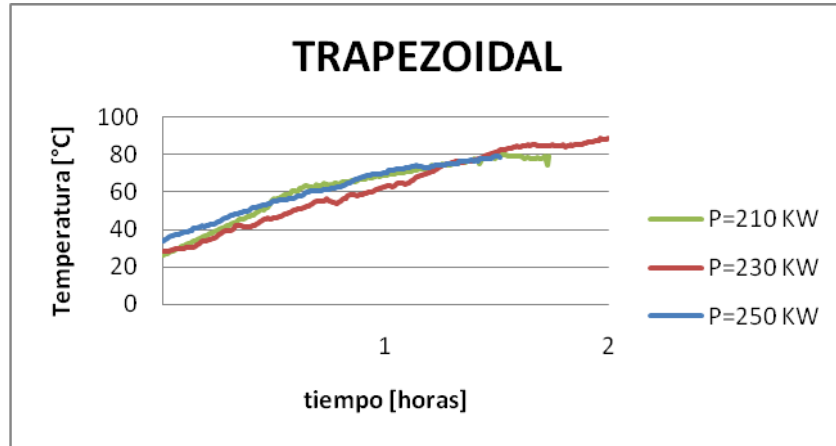


Temperatura de gases a la entrada de los intercambiadores entre 280 y 300°C.

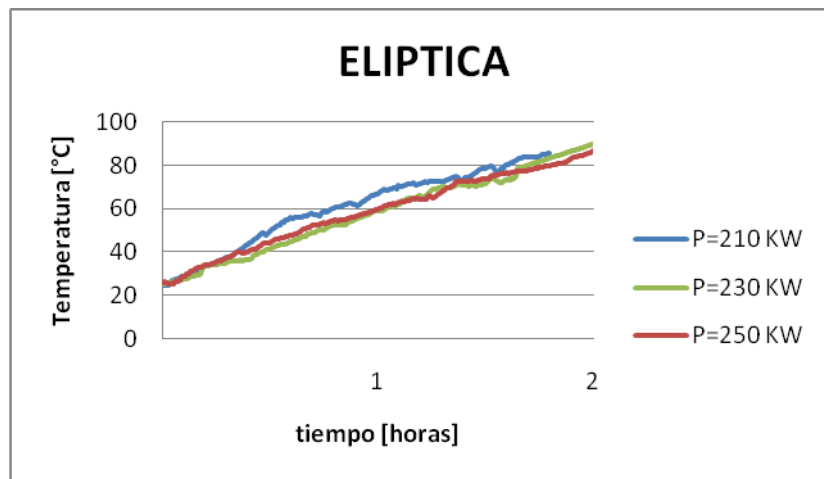
Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular circular con temperatura de entrada de gases entre 280 y 300°C a diferentes potencias.



Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular trapezoidal con temperatura de entrada de gases entre 280 y 300°C a diferentes potencias.

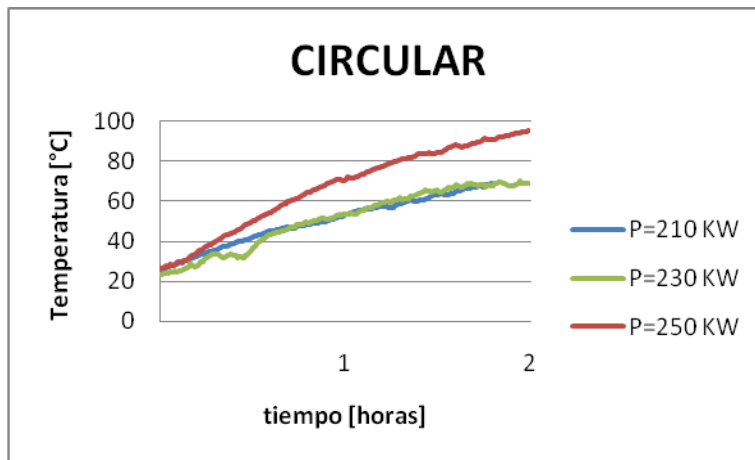


Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular elíptica con temperatura de entrada de gases entre 280 y 300°C a diferentes potencias.

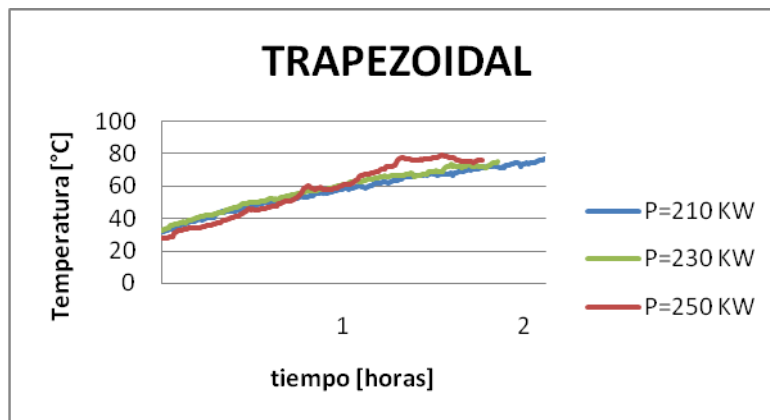


Temperatura de gases a la entrada de los intercambiadores entre 200 y 220°C.

Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular circular con temperatura de entrada de gases entre 200 y 220 °C a diferentes potencias.



Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular trapezoidal con temperatura de entrada de gases entre 200 y 220 °C a diferentes potencias.



Temperatura del agua en función del tiempo para la paila pirotubular elíptica con temperatura de entrada de gases entre 200 y 220 °C a diferentes potencias

