



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
PIRHUA

# ESTUDIO FLUIDODINÁMICO Y ESTRUCTURAL DE PAILAS PANELERAS PIROTUBULARES

Gian Espinoza-Pariona

Piura, febrero de 2017

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Espinoza, G. (2017). *Estudio fluidodinámico y estructural de pailas paneleras pirotubulares* (Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)  
[Creative Commons Atribución-](#)  
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

**UNIVERSIDAD DE PIURA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“Estudio fluidodinámico y estructural de pailas paneleras pirotubulares”**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico-Eléctrico

**Gian Carlo Paul Vicente Espinoza Pariona**

Asesores:

Dr. Ing. Raul La Madrid Olivares

Dr. Ing. Rafael Saavedra García Zabaleta

Piura, febrero de 2017

**A Dios,**

por darme salud y fuerza para cumplir mis  
objetivos y llenarme de bendiciones todos los días.

**A mi familia, en especial a mi abuelo Vicente,**

por su constante apoyo a lo largo de toda  
mi trayectoria académica y por ser mi mayor motivación.

**A mi novia, Paulina,**

por todo su cariño brindado,  
por apoyarme en los momentos más difíciles  
y animarme a siempre seguir adelante.

**y a mis amigos,**

por darme ánimos en todo momento.

## Prólogo

La producción de azúcar orgánica o panela granulada en la región Piura está en constante aumento. Sin embargo, debido al incremento de la demanda, la producción actual no logra satisfacer los requerimientos del mercado externo. Por este motivo, se debe fortalecer las etapas de la cadena agroindustrial: cultivo, extracción y transporte de la caña y el proceso de elaboración de la panela, con el fin de aumentar su producción.

Las mejoras en el proceso de elaboración de la panela comprenden: el aumento de la capacidad de las hornillas y su eficiencia energética. El proceso requiere de energía térmica para la evaporación del agua presente en el jugo de la caña. El residuo de la caña generado durante la molienda se denomina bagazo y se utiliza como combustible para la evaporación del agua en la hornilla panelera. La autosuficiencia del combustible implica que la cantidad de bagazo húmedo obtenido durante la molienda sea mayor o igual que la cantidad de bagazo consumido durante el proceso, por lo que no será necesario adquirir o comprar cualquier otro combustible. Asimismo, la autosuficiencia del combustible contribuye a disminuir la deforestación de la zona y a reducir la cantidad de gases de combustión expulsados a la atmósfera, contribuyendo así con el cuidado del medio ambiente. Por lo tanto, para conseguir la autosuficiencia se debe disponer de cámaras de combustión y pailas que permitan la conversión y transferencia de energía de forma eficiente, como también de técnicas para reducir las pérdidas de calor en las paredes del ducto y la chimenea.

Por lo expuesto, con el objetivo de ayudar a conseguir la autosuficiencia del combustible en el proceso de elaboración de panela mediante el desarrollo de herramientas de cálculo que permitan obtener diseños de pailas de alta eficiencia de transferencia, la presente tesis propone un procedimiento basado en la simulación numérica para predecir la tasa de transferencia de calor desde los gases de combustión al jugo en una paila pirotubular y el valor de los esfuerzos térmicos generados debido a los consecuentes gradientes de temperatura. Adicionalmente, se utilizó un procedimiento para determinar la influencia de ciertos factores de diseño como la forma, cantidad y tamaño de los pirotubos, con el fin de obtener una paila con la mayor eficiencia térmica posible teniendo siempre

presente la facilidad de construcción, los esfuerzos térmicos generados y facilidad de limpieza como principales vínculos.

Es interesante notar, que la metodología propuesta en la tesis se puede replicar a otros tipos de pailas; pudiéndose determinar la potencia térmica transferida al igual que los campos de las principales magnitudes termodinámicas y cinemáticas.

Finalmente, quisiera agradecer a todas las personas que han hecho posible este trabajo. A mi familia, por el soporte y aliento incondicional que siempre me ha brindado. A mis asesores Dr. Ing. Raúl La Madrid Olivares y Dr. Ing. Rafael Saavedra García Zabaleta por su amistad, consejos y apoyo brindado durante la elaboración de esta tesis. Al Dr. Ing. Elder Mendoza Orbegoso por la ayuda brindada durante todo este tiempo. A mis amigos, que me supieron apoyar y dar ánimos para poder culminar esta meta.

La presente tesis ha sido elaborada dentro del marco del proyecto N° 136-PNICP-PIAP-2015: “Optimización Energética del Proceso de Elaboración de Azúcar Orgánica mediante la Implementación de un Intercambiador de Calor de Tipo Pirotubular”, el cual ha sido financiado por el “Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad del Ministerio de Producción”.

## **Resumen**

El presente trabajo de investigación muestra la realización de un modelo y simulación numérica, utilizando técnicas y herramientas de dinámica de fluidos computacional y análisis de volúmenes finitos, del proceso de transferencia de calor desde los gases de combustión al jugo de caña de azúcar, a través de un intercambiador de calor abierto (paila pirotubular).

El trabajo se basa en la tesis doctoral de Modelación numérica del proceso de transferencia de calor en intercambiadores de calor abiertos utilizados en la industria panelera [1] y busca mejorar la eficiencia del proceso de elaboración de panela mediante la utilización de pailas pirotubulares frente a pailas planas aleteadas en la primera etapa de la evaporación.

Asimismo, se determina el tipo de geometría de pirotubos que presente una mayor eficiencia térmica y menores esfuerzos térmicos, buscando de esta manera la optimización de este tipo de intercambiador de calor abierto.

Finalmente, se concluye que los pirotubos tienen un mejor comportamiento térmico y estructural que las aletas, siendo la geometría rectangular redondeada la más eficiente.

## Índice

|                                                               |             |
|---------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Prólogo .....</b>                                          | <b>i</b>    |
| <b>Resumen .....</b>                                          | <b>iii</b>  |
| <b>Lista de figuras .....</b>                                 | <b>x</b>    |
| <b>Lista de tablas .....</b>                                  | <b>xvi</b>  |
| <b>Nomenclatura .....</b>                                     | <b>xvii</b> |
| <b>Introducción .....</b>                                     | <b>1</b>    |
| <b>1 Capítulo 1 Pailas pirotubulares .....</b>                | <b>3</b>    |
| 1.1 Introducción .....                                        | 3           |
| 1.2 La hornilla panelera .....                                | 6           |
| 1.2.1 Cámara de combustión .....                              | 7           |
| 1.2.2 Ducto de humos .....                                    | 8           |
| 1.2.3 Pailas .....                                            | 9           |
| 1.2.4 Chimenea .....                                          | 9           |
| 1.3 Tipos de pailas utilizadas en la industria panelera ..... | 10          |
| 1.3.1 Paila semicilíndrica .....                              | 10          |
| 1.3.2 Pailas semiesféricas .....                              | 12          |
| 1.3.3 Paila plana .....                                       | 14          |
| 1.3.4 Paila aleteada .....                                    | 16          |
| 1.3.5 Paila pirotubular .....                                 | 17          |

|          |                                                                            |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.4      | Criterios de selección de geometría y número de pirotubos.....             | 20        |
| 1.4.1    | Geometrías seleccionadas para el estudio.....                              | 21        |
| <b>2</b> | <b>Capítulo 2 Fundamentos teóricos.....</b>                                | <b>23</b> |
| 2.1      | Fundamentos de mecánica de fluidos .....                                   | 23        |
| 2.1.1    | Ecuaciones de transporte.....                                              | 24        |
| 2.1.1.1  | Ecuación de continuidad .....                                              | 24        |
| 2.1.1.2  | Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento .....                | 24        |
| 2.1.1.3  | Ecuación de conservación de la energía .....                               | 26        |
| 2.1.1.4  | Ecuaciones de estado .....                                                 | 26        |
| 2.1.2    | Turbulencia.....                                                           | 27        |
| 2.1.2.1  | Modelos de turbulencia .....                                               | 27        |
| 2.1.2.2  | Modelos de turbulencia estadísticos y los problemas de encerramiento ..... | 28        |
| 2.1.2.3  | Modelo de turbulencia utilizado .....                                      | 31        |
| 2.2      | Fundamentos de transferencia de calor .....                                | 33        |
| 2.2.1    | Conducción.....                                                            | 33        |
| 2.2.2    | Convección .....                                                           | 34        |
| 2.2.3    | Radiación .....                                                            | 34        |
| 2.2.3.1  | Ecuación de transferencia radiante .....                                   | 35        |
| 2.2.3.2  | Modelo de radiación P-1 .....                                              | 36        |
| 2.2.3.3  | Modelo de propiedades radiantes de los gases productos de combustión ..... | 38        |
| 2.2.3.4  | Modelos de suma ponderada de los gases grises, WSGGM .....                 | 38        |
| 2.3      | Fundamentos de resistencia de materiales .....                             | 40        |
| 2.3.1    | Concepto de esfuerzo .....                                                 | 41        |
| 2.3.2    | Concepto de deformación.....                                               | 41        |
| 2.3.3    | Diagrama esfuerzo-deformación.....                                         | 44        |
| 2.3.4    | Propiedades mecánicas de los materiales .....                              | 45        |
| 2.3.4.1  | Esfuerzo de fluencia .....                                                 | 45        |

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.4.2  | Módulo de Young .....                                              | 45        |
| 2.3.4.3  | Módulo de rigidez .....                                            | 46        |
| 2.3.4.4  | Esfuerzo último .....                                              | 46        |
| 2.3.4.5  | Esfuerzo de fractura .....                                         | 46        |
| 2.3.5    | Deformación térmica .....                                          | 46        |
| 2.3.5.1  | Esfuerzos térmicos .....                                           | 47        |
| 2.3.5.2  | Comportamiento de los aceros a elevadas temperaturas .....         | 48        |
| 2.3.6    | Esfuerzos combinados.....                                          | 50        |
| 2.3.6.1  | Teoría de la energía de distorsión.....                            | 50        |
| <b>3</b> | <b>Capítulo 3 Caso estudio: Paila pirotubular .....</b>            | <b>51</b> |
| 3.1      | Descripción del problema .....                                     | 51        |
| 3.2      | Análisis fluidodinámico .....                                      | 52        |
| 3.2.1    | Visión general de la modelación en CFD .....                       | 52        |
| 3.2.1.1  | Identificación del problema .....                                  | 53        |
| 3.2.1.2  | Pre-proceso .....                                                  | 53        |
| 3.2.1.3  | Solución .....                                                     | 54        |
| 3.2.1.4  | Post-proceso.....                                                  | 54        |
| 3.2.2    | Programa ANSYS-CFX .....                                           | 54        |
| 3.2.3    | Geometría .....                                                    | 55        |
| 3.2.3.1  | Dominio 1: Paila pirotubular circular .....                        | 56        |
| 3.2.3.2  | Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada .....          | 56        |
| 3.2.3.3  | Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal .....                     | 57        |
| 3.2.3.4  | Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal .....            | 57        |
| 3.2.3.5  | Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada ..... | 58        |
| 3.2.4    | Discretización en volúmenes finitos.....                           | 58        |
| 3.2.4.1  | Configuración global de la malla .....                             | 59        |
| 3.2.4.2  | Configuración local de la malla .....                              | 62        |

|          |                                                                   |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.4.3  | Selección de superficies como condiciones de fronteras .....      | 65         |
| 3.2.4.4  | Generación de malla .....                                         | 65         |
| 3.2.4.5  | Verificación la calidad de la malla .....                         | 65         |
| -        | Dominio 1: Paila pirotubular circular.....                        | 66         |
| -        | Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.....          | 68         |
| -        | Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal .....                    | 70         |
| -        | Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal .....           | 72         |
| -        | Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada..... | 74         |
| 3.2.5    | Pre-proceso .....                                                 | 76         |
| 3.2.5.1  | Propiedades de los materiales .....                               | 77         |
| 3.2.5.2  | Condiciones de contorno .....                                     | 81         |
| 3.2.5.3  | Configuración del solucionador.....                               | 86         |
| 3.2.6    | Solución .....                                                    | 87         |
| 3.3      | Análisis estructural .....                                        | 88         |
| 3.3.1    | Geometría .....                                                   | 89         |
| 3.3.2    | Discretización en volúmenes finitos.....                          | 91         |
| 3.3.3    | Pre-proceso .....                                                 | 94         |
| 3.3.3.1  | Simetría .....                                                    | 95         |
| 3.3.3.2  | Contactos.....                                                    | 95         |
| 3.3.3.3  | Gravedad .....                                                    | 95         |
| 3.3.3.4  | Soporte fijo sin fricción .....                                   | 96         |
| 3.3.3.5  | Condiciones térmicas .....                                        | 96         |
| 3.3.3.6  | Presión hidrostática.....                                         | 98         |
| 3.3.3.7  | Cargas importadas.....                                            | 99         |
| <b>4</b> | <b>Capítulo 4 Resultados.....</b>                                 | <b>101</b> |
| 4.1      | Validación del modelo.....                                        | 101        |
| 4.2      | Resultados del análisis fluidodinámico .....                      | 103        |

|                                                                                   |                                                        |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.1                                                                             | Campo de velocidades .....                             | 103        |
| 4.2.2                                                                             | Campo de temperaturas .....                            | 106        |
| 4.2.2.1                                                                           | En el ducto de humos.....                              | 106        |
| 4.2.2.2                                                                           | En la sección longitudinal del ducto.....              | 109        |
| 4.2.2.3                                                                           | Superficie de la paila en contacto con los gases ..... | 112        |
| 4.2.3                                                                             | Flujo de calor en la superficie de la paila .....      | 122        |
| 4.3                                                                               | Resultados del análisis estructural .....              | 126        |
| 4.3.1                                                                             | Esfuerzo equivalente .....                             | 126        |
| 4.4                                                                               | Comparación y selección.....                           | 133        |
| <b>Conclusiones .....</b>                                                         |                                                        | <b>139</b> |
| <b>Bibliografía .....</b>                                                         |                                                        | <b>141</b> |
| <b>Anexo A Planos de diseño de pailas pirotubulares en estudio .....</b>          |                                                        | <b>145</b> |
| <b>Anexo B Propiedades del acero estructural A36 y acero inoxidable A304.....</b> |                                                        | <b>157</b> |

## Lista de figuras

|                                                                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 1. Proceso de elaboración de la panela granulada.</b>                                                        | <b>5</b>  |
| <b>Figura 2. Representación isométrica de las partes de una hornilla.</b>                                              | <b>6</b>  |
| <b>Figura 3. Tipos de flujo en las hornillas paneleras.</b>                                                            | <b>7</b>  |
| <b>Figura 4. Cámara de combustión tipo tradicional y Ward-Cimpa.</b>                                                   | <b>8</b>  |
| <b>Figura 5. Ducto de humos.</b>                                                                                       | <b>8</b>  |
| <b>Figura 6. Chimenea</b>                                                                                              | <b>9</b>  |
| <b>Figura 7. Paila semicilíndrica.</b>                                                                                 | <b>10</b> |
| <b>Figura 8. Esquema de una paila semicilíndrica.</b>                                                                  | <b>11</b> |
| <b>Figura 9. Paila semiesférica.</b>                                                                                   | <b>12</b> |
| <b>Figura 10. Esquema de una paila semiesférica.</b>                                                                   | <b>13</b> |
| <b>Figura 11. Paila plana.</b>                                                                                         | <b>14</b> |
| <b>Figura 12. Esquema de una paila plana.</b>                                                                          | <b>15</b> |
| <b>Figura 13. Paila aleteada.</b>                                                                                      | <b>16</b> |
| <b>Figura 14. Esquema de una paila plana aleteada.</b>                                                                 | <b>17</b> |
| <b>Figura 15. Paila pirotubular circular.</b>                                                                          | <b>18</b> |
| <b>Figura 16. Esquema de una paila pirotubular circular.</b>                                                           | <b>19</b> |
| <b>Figura 17. Formas seleccionadas de pirotubos.</b>                                                                   | <b>21</b> |
| <b>Figura 18. Deformación axial de una barra al aplicar un esfuerzo <math>P</math>.</b>                                | <b>42</b> |
| <b>Figura 19. Deformación lateral de una barra al aplicar un esfuerzo <math>P</math>.</b>                              | <b>43</b> |
| <b>Figura 20. Deformación angular de una barra al aplicar un esfuerzo <math>P_s</math>.</b>                            | <b>43</b> |
| <b>Figura 21. Diagrama esfuerzo-deformación.</b>                                                                       | <b>44</b> |
| <b>Figura 22. Efectos típicos del aumento de temperatura en las propiedades mecánicas de los aceros estructurales.</b> | <b>49</b> |
| <b>Figura 23. Pasos a seguir durante una simulación en CFD.</b>                                                        | <b>52</b> |
| <b>Figura 24. Definición del dominio de cálculo dentro de un sistema global.</b>                                       | <b>53</b> |
| <b>Figura 25. Discretización y volumen de control de la región de fluido de una tubería.</b>                           | <b>55</b> |
| <b>Figura 26. Representación geométrica del dominio computacional 1: Paila pirotubular circular.</b>                   | <b>56</b> |
| <b>Figura 27. Representación geométrica del dominio computacional 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.</b>     | <b>56</b> |
| <b>Figura 28. Representación geométrica del dominio computacional 3: Paila pirotubular trapezoidal.</b>                | <b>57</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 29. Representación geométrica del dominio computacional 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.</b>                                                                                                                                       | <b>57</b> |
| <b>Figura 30. Representación geométrica del dominio computacional 4: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.</b>                                                                                                                            | <b>58</b> |
| <b>Figura 31. Proceso de mallado.</b>                                                                                                                                                                                                                  | <b>59</b> |
| <b>Figura 32. Interfaz de Ansys Meshing.</b>                                                                                                                                                                                                           | <b>60</b> |
| <b>Figura 33. Detalles de la malla.</b>                                                                                                                                                                                                                | <b>60</b> |
| <b>Figura 34. Regiones en el subdominio Ducto de humos correspondientes a Inflation.</b>                                                                                                                                                               | <b>62</b> |
| <b>Figura 35. Detalles de configuración de Inflation.</b>                                                                                                                                                                                              | <b>63</b> |
| <b>Figura 36. Regiones en el subdominio Ducto de humos correspondientes a Inflation 2.</b>                                                                                                                                                             | <b>63</b> |
| <b>Figura 37. Detalles de configuración de Inflation 2.</b>                                                                                                                                                                                            | <b>63</b> |
| <b>Figura 38. Regiones en el subdominio Jugo de caña correspondientes a Inflation 3.</b>                                                                                                                                                               | <b>64</b> |
| <b>Figura 39. Detalles de configuración de Inflation 3.</b>                                                                                                                                                                                            | <b>64</b> |
| <b>Figura 40. Subdominio Aletas correspondientes a Body Sizing.</b>                                                                                                                                                                                    | <b>64</b> |
| <b>Figura 41. Detalles de configuración de Body Sizing.</b>                                                                                                                                                                                            | <b>65</b> |
| <b>Figura 42. Dominio 1: Paila pirotubular circular.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.</b>                                                                                                                             | <b>67</b> |
| <b>Figura 43. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.</b>                                                                                                               | <b>69</b> |
| <b>Figura 44. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.</b>                                                                                                                          | <b>71</b> |
| <b>Figura 45. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.</b>                                                                                                                 | <b>73</b> |
| <b>Figura 46. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.</b>                                                                                                      | <b>75</b> |
| <b>Figura 47. Interfaz de CFX-Pre.</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>77</b> |
| <b>Figura 48. Interfaz de ingreso de propiedades de los productos de combustión en CFX-Pre.</b>                                                                                                                                                        | <b>78</b> |
| <b>Figura 49. Interfaz de ingreso de propiedades del hierro puro en CFX-Pre.</b>                                                                                                                                                                       | <b>79</b> |
| <b>Figura 50. Interfaz de ingreso de propiedades del acero AISI 304 en CFX-Pre.</b>                                                                                                                                                                    | <b>80</b> |
| <b>Figura 51. Interfaz de ingreso de propiedades del jugo de caña en CFX-Pre.</b>                                                                                                                                                                      | <b>81</b> |
| <b>Figura 52. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface Aletas” del subdominio “Aletas” en CFX-Pre.</b>                                                                                                                 | <b>82</b> |
| <b>Figura 53. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Entrada” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.</b>                                                                                                                  | <b>83</b> |
| <b>Figura 54. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Salida” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.</b>                                                                                                                   | <b>83</b> |
| <b>Figura 55. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Pared lateral, inferior y superior” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.</b>                                                                                       | <b>83</b> |
| <b>Figura 56. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface paredes de la paila pirotubular” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.</b>                                                                                | <b>84</b> |
| <b>Figura 57. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface paredes de las aletas” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.</b>                                                                                          | <b>84</b> |
| <b>Figura 58. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la regiones “Interface paredes internas, paredes aletas, pared de la base interior, paredes laterales y paredes de los pirotubos” del subdominio “Paila pirotubular” en CFX-Pre.</b> | <b>85</b> |
| <b>Figura 59. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface paredes externas de la paila” del subdominio “Paila pirotubular” en CFX-Pre.</b>                                                                                | <b>85</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 60. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno iniciales del subdominio “Jugo de caña” en CFX-Pre.</b>                                                                                                                                                        | 86  |
| <b>Figura 61. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface pared de la base interior del jugo de caña, paredes laterales y paredes de los pirotubos” del subdominio “Jugo de caña” en CFX-Pre.</b>                                              | 86  |
| <b>Figura 62. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Espejo de agua” del subdominio “Jugo de caña” en CFX-Pre.</b>                                                                                                                                  | 86  |
| <b>Figura 63. Interfaz configuración de parámetros del solucionador en CFX-Pre.</b>                                                                                                                                                                                         | 87  |
| <b>Figura 64. Interfaz de CFX Solver Manager.</b>                                                                                                                                                                                                                           | 87  |
| <b>Figura 65. Ventana Engineering Data.</b>                                                                                                                                                                                                                                 | 88  |
| <b>Figura 66. Representación geométrica del dominio computacional 1: Paila pirotubular circular.</b>                                                                                                                                                                        | 89  |
| <b>Figura 67. Representación geométrica del dominio computacional 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.</b>                                                                                                                                                          | 90  |
| <b>Figura 68. Representación geométrica del dominio computacional 3: Paila pirotubular trapezoidal.</b>                                                                                                                                                                     | 90  |
| <b>Figura 69. Representación geométrica del dominio computacional 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.</b>                                                                                                                                                            | 91  |
| <b>Figura 70. Representación geométrica del dominio computacional 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.</b>                                                                                                                                                 | 91  |
| <b>Figura 71. Dominio 1: Paila pirotubular circular.- Detalle de la discretización.</b>                                                                                                                                                                                     | 92  |
| <b>Figura 72. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.- Detalle de la discretización.</b>                                                                                                                                                                       | 92  |
| <b>Figura 73. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal.- Detalle de la discretización.</b>                                                                                                                                                                                  | 93  |
| <b>Figura 74. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.- Detalle de la discretización.</b>                                                                                                                                                                         | 93  |
| <b>Figura 75. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.- Detalle de la discretización.</b>                                                                                                                                                              | 94  |
| <b>Figura 76. Outline del programa Mechanical Static Structural.</b>                                                                                                                                                                                                        | 94  |
| <b>Figura 77. Condición Standard Earth Gravity.</b>                                                                                                                                                                                                                         | 95  |
| <b>Figura 78. Detalles de Standard Earth Gravity.</b>                                                                                                                                                                                                                       | 96  |
| <b>Figura 79. Condición Frictionless Support.</b>                                                                                                                                                                                                                           | 96  |
| <b>Figura 80. Condición térmica de los soportes.</b>                                                                                                                                                                                                                        | 97  |
| <b>Figura 81. Detalles de la condición térmica de los soportes para el dominio 4.</b>                                                                                                                                                                                       | 97  |
| <b>Figura 82. Condición térmica de la falca.</b>                                                                                                                                                                                                                            | 98  |
| <b>Figura 83. Detalles de la condición térmica de la falca para el dominio 4.</b>                                                                                                                                                                                           | 98  |
| <b>Figura 84. Condición Hydrostatic Pressure.</b>                                                                                                                                                                                                                           | 99  |
| <b>Figura 85. Detalles de la Presión Hidrostática.</b>                                                                                                                                                                                                                      | 99  |
| <b>Figura 86. Perfil de temperatura de la base de la paila.</b>                                                                                                                                                                                                             | 100 |
| <b>Figura 87. Perfil de temperatura de las aletas de la paila.</b>                                                                                                                                                                                                          | 100 |
| <b>Figura 88. Comparación entre resultados de simulación CFD y mediciones de campo correspondiente a la caída de temperatura de los gases productos de combustión. Como función de las temperaturas de entrada para la paila aleteada evaporadora de la referencia [1].</b> | 102 |
| <b>Figura 89. Resultados de la simulación estructural correspondientes al esfuerzo equivalente para la paila aleteada evaporadora de la referencia [1].</b>                                                                                                                 | 102 |
| <b>Figura 90. Fotografía de las aletas de la paila aleteada evaporadora de la referencia [1].</b>                                                                                                                                                                           | 103 |

|                                                                                                                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Figura 91. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad. ....</b>                                                             | <b>104</b> |
| <b>Figura 92. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad.....</b>                                                | <b>104</b> |
| <b>Figura 93. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad.....</b>                                                           | <b>105</b> |
| <b>Figura 94. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad.....</b>                                                  | <b>105</b> |
| <b>Figura 95. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad. ....</b>                                      | <b>106</b> |
| <b>Figura 96. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura. ....</b>                                                           | <b>107</b> |
| <b>Figura 97. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura. ....</b>                                             | <b>107</b> |
| <b>Figura 98. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura. ....</b>                                                        | <b>108</b> |
| <b>Figura 99. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura. ....</b>                                               | <b>108</b> |
| <b>Figura 100. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura.....</b>                                    | <b>109</b> |
| <b>Figura 101. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. (<math>z=7.5</math> cm). ....</b>                        | <b>110</b> |
| <b>Figura 102. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. (<math>x=7.5</math> cm).....</b>            | <b>110</b> |
| <b>Figura 103. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal. Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. (<math>z=7.5</math> cm). ....</b>                     | <b>111</b> |
| <b>Figura 104. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. (<math>z=7.5</math> cm). ....</b>            | <b>111</b> |
| <b>Figura 105. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. (<math>z=7.5</math> cm). ....</b> | <b>112</b> |
| <b>Figura 106. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión. ....</b>                 | <b>113</b> |
| <b>Figura 107. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Ubicación de isolínea de temperatura a lo largo de la paila. ....</b>                                                         | <b>113</b> |
| <b>Figura 108. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Temperatura a lo largo de la paila. ....</b>                                                                                  | <b>114</b> |
| <b>Figura 109. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Ubicación de isolínea de temperatura a lo ancho de la paila. ....</b>                                                         | <b>114</b> |
| <b>Figura 110. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Temperatura a lo ancho de la paila.....</b>                                                                                   | <b>115</b> |
| <b>Figura 111. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.....</b>    | <b>115</b> |
| <b>Figura 112. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.....</b>                | <b>116</b> |
| <b>Figura 113. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.....</b>      | <b>117</b> |
| <b>Figura 114. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Campo de temperaturas de la superficie de las aletas en contacto con los gases producto de combustión.....</b>    | <b>117</b> |

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 115. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.</b>   | 118 |
| <b>Figura 116. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Ubicación de isolínea de temperatura a lo largo de la base la paila.</b>                                   | 118 |
| <b>Figura 117. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Temperatura a lo largo de la base de la paila.</b>                                                         | 119 |
| <b>Figura 118. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Ubicación de isolínea de temperatura a lo ancho de la base de la paila.</b>                                | 119 |
| <b>Figura 119. . Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Temperatura a lo ancho de la base de la paila.</b>                                                       | 120 |
| <b>Figura 120. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Campo de temperaturas de la superficie de las aletas en contacto con los gases producto de combustión.</b> | 120 |
| <b>Figura 121. . Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Ubicación de isolínea de temperatura a lo largo de las aletas.</b>                                       | 121 |
| <b>Figura 122. . Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Temperatura a lo largo de las aletas.</b>                                                                | 121 |
| <b>Figura 123. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Flujo de calor en la superficie de la paila.</b>                                                                                  | 122 |
| <b>Figura 124. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Flujo de calor en la superficie de la paila.</b>                                                                    | 123 |
| <b>Figura 125. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal. Flujo de calor en la superficie de la paila.</b>                                                                               | 123 |
| <b>Figura 126. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Flujo de calor en la superficie de la paila.</b>                                                                      | 124 |
| <b>Figura 127. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Flujo de calor en la superficie de las aletas.</b>                                                                    | 124 |
| <b>Figura 128. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Flujo de calor en la superficie de la paila.</b>                                                           | 125 |
| <b>Figura 129. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Flujo de calor en la superficie de las aletas.</b>                                                         | 125 |
| <b>Figura 130. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.</b>                                                                        | 127 |
| <b>Figura 131. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.</b>                                                          | 128 |
| <b>Figura 132. Dominio 3: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.</b>                                                            | 129 |
| <b>Figura 133. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.</b>                                                            | 130 |
| <b>Figura 134. Dominio4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal Distribución de esfuerzos térmicos en las aletas.</b>                                                                   | 131 |
| <b>Figura 135. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.</b>                                                 | 132 |
| <b>Figura 136. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Distribución de esfuerzos térmicos en las aletas.</b>                                                      | 133 |
| <b>Figura 137. Porcentaje de flujo másico en los pirotubos.</b>                                                                                                                         | 134 |

|                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Figura 138. Temperatura media de los gases productos de combustión a la salida.....</b> | <b>134</b> |
| <b>Figura 139.Potencia térmica cedida a las pailas pirotubulares.....</b>                  | <b>135</b> |
| <b>Figura 140. Relación potencia térmica respecto al área de transferencia.....</b>        | <b>136</b> |
| <b>Figura 141. Aumento de eficiencia respecto a la paila aleteada base. ....</b>           | <b>136</b> |
| <b>Figura 142. Factor de seguridad mínimo de cada dominio. ....</b>                        | <b>137</b> |

## Lista de tablas

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1. Área transversal de los pirotubos.</b>                                                                                                                                                            | 19 |
| <b>Tabla 2. Tabla de comparación de formas geométricas según los criterios considerados.</b>                                                                                                                  | 21 |
| <b>Tabla 3. Coeficientes polinomiales de Jovani et al. utilizados en el modelo WSGGM.</b>                                                                                                                     | 40 |
| <b>Tabla 4. Esfuerzo de fluencia y esfuerzo último a diferentes temperaturas para varios aceros austeníticos inoxidables.</b>                                                                                 | 50 |
| <b>Tabla 5. Espectro de valores para la asimetría de la malla.</b>                                                                                                                                            | 66 |
| <b>Tabla 6. Espectro de valores para la calidad ortogonal de la malla.</b>                                                                                                                                    | 66 |
| <b>Tabla 7. Espectro de valores para la relación de aspecto de la malla.</b>                                                                                                                                  | 66 |
| <b>Tabla 8. Dominio 1: Paila pirotubular circular.- Métrica que determina la calidad de la malla en los tres subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.</b>                           | 68 |
| <b>Tabla 9. Dominio 2: Paila pirotubular redondeada.- Métrica que determina la calidad de la malla en los tres subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.</b>                         | 70 |
| <b>Tabla 10. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal.- Métrica que determina la calidad de la malla en los tres subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.</b>                       | 72 |
| <b>Tabla 11. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.- Métrica que determina la calidad de la malla en los cuatro subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.</b>            | 74 |
| <b>Tabla 12. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.- Métrica que determina la calidad de la malla en los cuatro subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.</b> | 76 |
| <b>Tabla 13. Principales propiedades termodinámicas y de transporte de los productos de combustión en CFX-Pre.</b>                                                                                            | 78 |
| <b>Tabla 14. Propiedades del hierro puro.</b>                                                                                                                                                                 | 79 |
| <b>Tabla 15. Propiedades del acero inoxidable.</b>                                                                                                                                                            | 79 |
| <b>Tabla 16. Principales propiedades termodinámicas y de transporte del jugo de la caña.</b>                                                                                                                  | 80 |
| <b>Tabla 17. Condiciones de contorno para el subdominio “Aletas”.</b>                                                                                                                                         | 81 |
| <b>Tabla 18. Condiciones de contorno para el subdominio “Ducto de Humos”.</b>                                                                                                                                 | 82 |
| <b>Tabla 19. Condiciones de contorno para el subdominio “Paila pirotubular”.</b>                                                                                                                              | 84 |
| <b>Tabla 20. Condiciones inicial y de contorno para el subdominio “Jugo de caña”.</b>                                                                                                                         | 85 |

## Nomenclatura

### Caracteres latinos

|                       |                                                                                          |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_{prod}(p, T, Y_i)$ | Coeficiente de absorción de los productos de combustión [1/m]                            |
| $a_g$                 | Coeficiente de absorción del gas ceniza como medio participante [1/m]                    |
| $a_{soot}$            | Coeficiente de absorción de hollín gris como medio participante [1/m]                    |
| $a_{\epsilon,i}(T)$   | Factor peso de la emisividad del i-ésimo gas gris (ficticio)                             |
| $b_{\epsilon,ij}$     | j-ésimo coeficiente polinomial del i-ésimo gas ceniza                                    |
| $A$                   | Área [m <sup>2</sup> ]                                                                   |
| $A$                   | Coeficiente de anisotropía                                                               |
| $A_T$                 | Área libre transversal del ducto de humos [m <sup>2</sup> ]                              |
| $A_{T\_SC}$           | Área libre transversal del ducto de humos para la paila semicilíndrica [m <sup>2</sup> ] |
| $A_{T\_SE}$           | Área libre transversal del ducto de humos para la paila semiesférica [m <sup>2</sup> ]   |
| $A_{T\_PL}$           | Área libre transversal del ducto de humos para la paila plana [m <sup>2</sup> ]          |
| $A_{T\_AL}$           | Área libre transversal del ducto de humos para la paila plana aleteada [m <sup>2</sup> ] |
| $A_{T\_PT}$           | Área libre transversal del ducto de humos para la paila pirotubular [m <sup>2</sup> ]    |
| $A_{TR}$              | Área de transferencia de calor [m <sup>2</sup> ]                                         |
| $A_{TR\_SC}$          | Área de transferencia de calor de la paila semicilíndrica [m <sup>2</sup> ]              |
| $A_{TR\_SE}$          | Área de transferencia de calor de la paila semiesférica [m <sup>2</sup> ]                |
| $A_{TR\_PL}$          | Área de transferencia de calor de la paila plana [m <sup>2</sup> ]                       |
| $A_{TR\_AL}$          | Área de transferencia de calor de la paila plana aleteada [m <sup>2</sup> ]              |
| $A_{TR\_PT}$          | Área de transferencia de calor de la paila pirotubular [m <sup>2</sup> ]                 |

|                      |                                                                                                             |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_0$                | Área inicial [m <sup>2</sup> ]                                                                              |
| $B$                  | Fuerzas de cuerpo específica [N/kg]                                                                         |
| $b_{\varepsilon,ij}$ | Coeficiente polinomial j-ésimo del i-ésimo gas gris                                                         |
| $c_{p,Fe}(T)$        | Calor específico del acero estructural A36 [J/kg•K]                                                         |
| $c_{p,Fe}(T)$        | Calor específico del acero inoxidable A304 [J/kg•K]                                                         |
| $c_{p,i}$            | Calor específico del componente i-ésimo [J/kg•K]                                                            |
| $c_{p,l}$            | Calor específico del jugo de caña de azúcar en estado líquido [J/kg•K]                                      |
| $c_{p,v}$            | Calor específico del vapor de jugo de caña de azúcar [J/kg•K]                                               |
| $c_{p,prod}$         | Calor específico a presión constante de especies químicas que componen los productos de combustión [J/kg•K] |
| $C_\mu$              | Constante empírica de la relación Prandtl-Kolmogorov                                                        |
| $\tilde{c}_{p,i}$    | Capacidad calórica del componente i-ésimo [J/kmol•K]                                                        |
| $D_h$                | Diámetro hidráulico [m]                                                                                     |
| $D_{h\_SC}$          | Diámetro hidráulico para la semicilíndrica [m]                                                              |
| $D_{h\_SE}$          | Diámetro hidráulico para la paila semiesférica [m]                                                          |
| $D_{h\_PL}$          | Diámetro hidráulico para la paila plana [m]                                                                 |
| $D_{h\_AL}$          | Diámetro hidráulico para la paila plana aleteada [m]                                                        |
| $D_{h\_PT}$          | Diámetro hidráulico para la paila pirotubular [m]                                                           |
| $E$                  | Módulo de Young [MPa]                                                                                       |
| $G$                  | Módulo de rigidez [MPa]                                                                                     |
| $G$                  | Radiación incidente total [W/m <sup>2</sup> ]                                                               |
| $h_{tot}$            | Entalpía total [W/m <sup>2</sup> •°C]                                                                       |
| $\tilde{h}_t$        | Media de Fabre de la entalpía total [kJ/kg]                                                                 |
| $h''_t$              | Fluctuación en torno a la media de Fabre de la entalpía total [kJ/kg]                                       |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_t$                     | Intensidad turbulenta [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$ ]                                                                                                                                                                                               |
| $I_b(\nu, T)$             | Intensidad de radiación espectral emitida por un cuerpo negro a una frecuencia $\nu$ y temperatura absoluta $T$ [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$ ]                                                                                                     |
| $I_\nu(\vec{r}, \vec{s})$ | Intensidad de energía radiante espectral a una localización indicada por el vector posición $\vec{r}$ en la dirección $\vec{s}$ dentro de un pequeño conjunto de rayos que viajan a través de un medio participante [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$ ] |
| $k_{Fe}(T)$               | Conductividad térmica del hierro puro [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]                                                                                                                                                                                                    |
| $k_{Fe}(T)$               | Conductividad térmica del acero inoxidable [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]                                                                                                                                                                                               |
| $k$                       | Conductividad térmica [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]                                                                                                                                                                                                                    |
| $k_l$                     | Conductividad térmica del jugo de caña de azúcar en estado líquido [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]                                                                                                                                                                       |
| $k_v$                     | Conductividad térmica del vapor de jugo de caña de azúcar [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]                                                                                                                                                                                |
| $k_{prod}(T, Y_i)$        | Conductividad térmica de los productos de combustión [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]                                                                                                                                                                                     |
| $\tilde{k}$               | Energía cinética turbulenta [J]                                                                                                                                                                                                                                          |
| $K_a$                     | Coeficiente de absorción espectral del medio participante                                                                                                                                                                                                                |
| $K_b$                     | Coeficiente de dispersión espectral del medio participante                                                                                                                                                                                                               |
| $M$                       | Largo de la paila [m]                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $L_m$                     | Camino medio del haz [m]                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $L_{carac}$               | Longitud característica [m]                                                                                                                                                                                                                                              |
| $L_0$                     | Longitud inicial [m]                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $m$                       | Masa [kg]                                                                                                                                                                                                                                                                |
| $\dot{m}$                 | Flujo másico [kg/s]                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $Ma$                      | Número de Mach                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $n$                       | Número de pirotubos                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $n$                       | Índice de refracción                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $p$                       | Presión parcial [kPa]                                                                                                                                                                                                                                                    |

|                            |                                                                                       |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_{atm}$                  | Presión atmosférica [kPa]                                                             |
| $p_{rel}$                  | Presión relativa [kPa]                                                                |
| $P_i$                      | Presión parcial del componente i-ésimo                                                |
| $Pr$                       | Número de Prandtl                                                                     |
| $\mathcal{P}$              | Producción de energía cinética turbulenta                                             |
| $\dot{q}_r$                | Flujo total de calor por radiación normal a una superficie [W/m <sup>2</sup> ]        |
| $\dot{q}_T$                | Flujo de calor total [W]                                                              |
| $Q(\vec{x}, t)$            | Propiedad de flujo instantáneo                                                        |
| $Q'(\vec{x}, t)$           | Fluctuación temporal en torno a la media de Reynolds de una propiedad $Q(\vec{x}, t)$ |
| $\overline{Q(\vec{x}, t)}$ | Media temporal de Reynolds de una propiedad $Q(\vec{x}, t)$                           |
| $\tilde{Q}$                | Media temporal de Fabre de una propiedad $Q(\vec{x}, t)$                              |
| $Q''$                      | Fluctuación temporal entorno a la media de Fabre de una propiedad $Q(\vec{x}, t)$     |
| $R$                        | Constante de gas [kJ/kg•K]                                                            |
| $Re$                       | Número de Reynolds                                                                    |
| $Re_t$                     | Número de Reynolds turbulento                                                         |
| $\bar{S}_r$                | Término fuente de radiación                                                           |
| $t$                        | Tiempo [s]                                                                            |
| $t_0$                      | Tiempo inicial [s]                                                                    |
| $T$                        | Temperatura [K]                                                                       |
| $T_0$                      | Temperatura absoluta [K]                                                              |
| $T_{amb}$                  | Temperatura ambiente [K]                                                              |
| $T_{amb}$                  | Temperatura de los alrededores [K]                                                    |
| $T_{ebu}$                  | Temperatura de ebullición del jugo de caña de azúcar [K]                              |
| $T_{ent}$                  | Temperatura de entrada [K]                                                            |

|                  |                                                                        |
|------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $T_p$            | Temperatura de espejo de agua [K]                                      |
| $T_s$            | Temperatura del cuerpo [K]                                             |
| $T_{sal}$        | Temperatura de salida [K]                                              |
| $u$              | Velocidad característica [m/s]                                         |
| $u_i$            | Componente i-ésima del vector de velocidad $\vec{u}$ [m/s]             |
| $\tilde{u}_i$    | Media de Fabre del campo de velocidades [m/s]                          |
| $u''_i$          | Fluctuación entorno a la media de Fabre del campo de velocidades [m/s] |
| $\vec{u}$        | Vector velocidad [m/s]                                                 |
| $V$              | Fuerza cortante [N]                                                    |
| $V_j$            | Volumen mínimo de jugos [m <sup>3</sup> ]                              |
| $V_{j\_SC}$      | Volumen mínimo de jugos para la paila semicilíndrica [m <sup>3</sup> ] |
| $V_{j\_SE}$      | Volumen mínimo de jugos para la paila semiesférica [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_{j\_PL}$      | Volumen mínimo de jugos para la paila plana [m <sup>3</sup> ]          |
| $V_{j\_AL}$      | Volumen mínimo de jugos para la paila plana aleteada [m <sup>3</sup> ] |
| $V_{j\_PT}$      | Volumen mínimo de jugos para la paila pirotubular [m <sup>3</sup> ]    |
| $V_0$            | Volumen inicial [m <sup>3</sup> ]                                      |
| $\bar{W}_{prod}$ | Peso molar de los productos de combustión [kg / kmol]                  |
| $\vec{x}$        | Vector posición [m]                                                    |
| $y_i$            | Fracción másica del i-ésimo componente                                 |
| $y_i$            | Fracción másica del i-ésimo componente                                 |
| $y_{CO2}$        | Fracción másica del dióxido de carbono                                 |
| $y_{H2O}$        | Fracción másica del vapor de agua                                      |
| $y_{N2}$         | Fracción másica del nitrógeno                                          |
| $y_{O2}$         | Fracción másica del oxígeno                                            |

### Caracteres griegos

|                    |                                                                             |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$           | Constante del modelo k- $\omega$                                            |
| $\alpha$           | Coeficiente de dilatación lineal [mm/m·°C]                                  |
| $\beta$            | Coeficiente de dilatación superficial [mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ·°C] |
| $\beta$            | Constante del modelo k- $\omega$                                            |
| $\beta'$           | Constante del modelo k- $\omega$                                            |
| $\gamma$           | Ángulo de distorsión [rad]                                                  |
| $\gamma$           | Coeficiente de dilatación volumétrico [mm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ·°C] |
| $\delta_S$         | Distorsión [m]                                                              |
| $\Delta t$         | Intervalo de tiempo [s]                                                     |
| $\Delta T$         | Variación de temperatura [K]                                                |
| $\nabla$           | Operador nabra                                                              |
| $\varepsilon$      | Tasa de disipación viscosa [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]                |
| $\varepsilon$      | Emisividad                                                                  |
| $\varepsilon_T$    | Emisividad total                                                            |
| $\epsilon$         | Deformación unitaria total                                                  |
| $\epsilon_{el}$    | Deformación unitaria elástica                                               |
| $\epsilon_t$       | Deformación unitaria térmica                                                |
| $\epsilon_x$       | Deformación unitaria en el eje x                                            |
| $\epsilon_y$       | Deformación unitaria en el eje y                                            |
| $\epsilon_z$       | Deformación unitaria en el eje z                                            |
| $\tilde{\epsilon}$ | Tasa de disipación turbulenta de energía                                    |
| $\lambda$          | Coeficiente de transferencia de calor por conducción [W/m·K]                |
| $\lambda$          | Longitud de onda [W/m·K]                                                    |
| $\mu$              | Viscosidad dinámica [kg/m·s]                                                |

|                          |                                                                           |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $\mu_i$                  | Viscosidad dinámica del componente i-ésimo [kg/ms]                        |
| $\mu_j$                  | Viscosidad dinámica del componente j-ésimo [kg/m•s]                       |
| $\mu_l$                  | Viscosidad dinámica del jugo de caña de azúcar en estado líquido [kg/m•s] |
| $\mu_v$                  | Viscosidad dinámica del vapor de jugo de caña de azúcar [kg/m*s]          |
| $\mu_{prod}(T, Y_i)$     | Viscosidad dinámica de los productos de combustión [kg/m•s]               |
| $\mu_t$                  | Viscosidad turbulenta [kg/m•s]                                            |
| $\nu$                    | Relación de Poisson                                                       |
| $\nu$                    | Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]                                 |
| $\nu$                    | Frecuencia [Hz]                                                           |
| $\nu_T$                  | Viscosidad cinemática turbulenta [m <sup>2</sup> /s]                      |
| $\rho$                   | Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]                                             |
| $\rho_{Fe}$              | Densidad del acero inoxidable [kg/m <sup>3</sup> ]                        |
| $\rho_l$                 | Densidad del líquido[kg/m <sup>3</sup> ]                                  |
| $\rho_v$                 | Densidad del vapor [kg/m <sup>3</sup> ]                                   |
| $\rho_{prod}(p, T, Y_i)$ | Densidad de los productos de combustión [kg/m <sup>3</sup> ]              |
| $\bar{\rho}$             | Media de la densidad [kg/m <sup>3</sup> ]                                 |
| $\tau$                   | Esfuerzos cortantes viscosos [Pa]                                         |
| $\tau_{xy}$              | Esfuerzo cortante en el plano x con dirección y [Pa]                      |
| $\tau_{yz}$              | Esfuerzo cortante en el plano y con dirección x [Pa]                      |
| $\tau_{zx}$              | Esfuerzo cortante en el plano z con dirección x [Pa]                      |
| $\sigma$                 | Constante de Stefan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> •K <sup>4</sup> ]         |
| $\sigma$                 | Esfuerzo normal [Pa]                                                      |
| $\sigma_T$               | Esfuerzo térmico [Pa]                                                     |
| $\sigma_u$               | Esfuerzo último [MPa]                                                     |

|               |                                        |
|---------------|----------------------------------------|
| $\sigma_{VM}$ | Esfuerzo equivalente o Von Misses [Pa] |
| $\sigma_x$    | Esfuerzo normal en la dirección x [Pa] |
| $\sigma_y$    | Esfuerzo normal en la dirección y [Pa] |
| $\sigma_z$    | Esfuerzo normal en la dirección z [Pa] |
| $\sigma_Y$    | Esfuerzo de fluencia [MPa]             |
| $\phi_{i,j}$  | Función de fase en dispersión          |
| $\omega$      | Frecuencia turbulenta [Hz]             |
| $\Omega$      | Ángulo sólido [sr]                     |

### Constantes

|          |                                                                   |
|----------|-------------------------------------------------------------------|
| $C_\mu$  | Constante empírico de la relación Prandtl-Kolmogorov              |
| $R_u$    | Constante universal de los gases [J/kmol·K]                       |
| $M_i$    | Masa molar del componente i [kg/kmol]                             |
| $\sigma$ | Constante de Stefan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> ] |
| $g$      | Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]                                      |

### Simbología de operadores y funciones

|                   |                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------|
| $\exp$            | Función exponencial                                    |
| $\int_a^b f(x)dx$ | Integral definida de f(x) de límites $a \leq x \leq b$ |
| $\lim f(x)$       | Límite de una función f(x)                             |
| $u(t)$            | Función dependiente del tiempo                         |
| $\bar{u}$         | Media temporal de la función $u(t)$                    |
| $u'(t)$           | Valor fluctuante de la función $u(t)$                  |
| $\ln$             | Función logaritmo natural                              |

|                           |                                                                           |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $\max$                    | Función máximo                                                            |
| $\frac{\delta}{\delta x}$ | Operador derivada parcial en x                                            |
| $\bar{Q}$                 | Media temporal de Reynolds de una propiedad $Q$                           |
| $Q'$                      | Fluctuación temporal en torno a la media de Reynolds de una propiedad $Q$ |
| $\tilde{Q}$               | Media temporal de Fabre de una propiedad $Q$                              |
| $Q''$                     | Fluctuación temporal entorno a la media de Fabre de una propiedad $Q$     |
| $\delta$                  | Función delta de Dirac                                                    |
| $\nabla$                  | Operador divergente                                                       |
| $\nabla^2$                | Operador Laplaciano                                                       |
| $\sum$                    | Operador Sumatoria                                                        |

### Abreviaturas

|        |                                                       |
|--------|-------------------------------------------------------|
| CFD    | Dinámica de fluidos computacional                     |
| DES    | Detached Eddy Simulation                              |
| DNS    | Simulación numérica directa                           |
| LES    | Large Eddy Simulation                                 |
| RANS   | Media de Reynolds de la ecuación de Navier Stokes     |
| RTE    | Ecuación de transferencia radiante                    |
| s- RTE | Ecuación de transferencia radiante en forma espectral |
| TS     | Esfuerzo último                                       |
| WSGGM  | Suma ponderada de los gases ceniza                    |
| YS     | Esfuerzo de fluencia                                  |



## **Introducción**

En la industria panelera se utilizan intercambiadores de calor abiertos, denominados pailas, con el fin de reducir el agua presente en el jugo de caña de azúcar hasta su concentración como miel, la cual posteriormente se bate y enfría para obtener panela granulada. Existen varios tipos de pailas como: pailas semicilíndricas, semiesféricas, planas, aleteadas y pirotubulares.

La forma y dimensiones de las pailas utilizadas actualmente en la industria panelera en nuestro país hacen que la relación área de transferencia de calor -volumen de jugo sea baja, lo que genera diseños de pailas y hornillas de gran tamaño, costos elevados y altas pérdidas de calor. Las pailas pirotubulares presentan una mejor relación área de transferencia de calor-volumen de jugo para una misma capacidad térmica en comparación con los otros tipos de pailas mencionados. Esto indica que mediante la utilización de este tipo de pailas se puede disminuir el tiempo de residencia de los jugos, lo que se traduce como una disminución de la cantidad de bagazo utilizado contribuyendo así a la autosuficiencia del combustible.

El primer capítulo, muestra un resumen del proceso productivo de la panela, en que se detallan las etapas principales. Además, se mencionan los componentes de una hornilla panelera y por último los tipos de pailas paneleras utilizadas en la industria, centrándose principalmente en las de tipo pirotubular.

En el segundo capítulo, se definen algunos conceptos útiles de Mecánica de Fluidos, Transferencia de Calor y Resistencia de Materiales. Además, se describen los modelos matemáticos empleados en la modelación del caso de estudio.

En el tercer capítulo, se muestran los datos de acondicionamiento del problema, que comprenden el enunciado del problema de estudio, los dominios computacionales, la discretización o mallado de los dominios y las condiciones de frontera del problema. Para la simulación fluidodinámica, se ha utilizado el programa ANSYS CFX versión 16

(licencia académica) el cual es un software comercial de mecánica de fluidos computacional. Por otra parte, se decidió realizar un análisis estructural para analizar la resistencia de las pailas, para esto se ha utilizado el programa ANSYS Static Structural versión 16.

Finalmente, en el cuarto capítulo, se analizan los resultados de las simulaciones fluido dinámico y estructural con el fin de seleccionar la paila más eficiente. Además se presenta conclusiones del análisis efectuado, así como los posibles usos del modelo realizado.

## **Capítulo 1**

### **Pailas pirotubulares**

#### **1.1 Introducción<sup>1</sup>**

El azúcar orgánico, no centrifugado o panela es un edulcorante tradicional, mínimamente procesado, obtenido de la concentración del jugo de la caña de azúcar con muchas ventajas a la salud y medioambiente. En comparación con otros edulcorantes, la panela contiene vitaminas, minerales, grasas y proteínas, los cuales ayudan a fortalecer el sistema nervioso, relajar los músculos, prevenir la anemia, entre otros [2].

La panela en Piura se elabora en pequeños módulos de producción denominados trapiches, ubicados en zonas rurales. En general, el proceso de elaboración de panela se lleva a cabo en ocho etapas comprendidas desde el apronte de la caña hasta el empaque de la panela (ver figura 1), las cuales se describen brevemente a continuación:

- Apronte: es el conjunto de operaciones de extracción, alza, transporte y almacenamiento de la caña en el trapiche.
- Extracción de jugos: denominada también molienda. Esta operación consiste en pasar la caña por un molino para la obtención del jugo de azúcar dejando el bagazo húmedo como remanente.
- Prelimpieza: el jugo crudo se lleva a los denominados prelimpiadores donde se retiran las impurezas de los jugos debido a la diferencia de densidades de la sustancia.
- Clarificación: esta etapa sucede gracias a la acción combinada del calor generado en la hornilla, para lograr un precalentamiento sin evaporación, y la acción de un aglutinante orgánico. La clarificación se lleva a cabo por medio de flotación y

---

<sup>1</sup> Este apartado ha sido elaborado a partir de las referencias [2] a la [6].

consiste en retirar la cachaza<sup>2</sup> en forma de espuma que se forma sobre la superficie del jugo, garantizando un producto más puro y más claro.

- Evaporación: consiste básicamente en concentrar el jugo de la caña de azúcar desde 18 hasta aproximadamente 70° Brix mediante la evaporación del agua contenida en el jugo. A esta concentración los jugos adquieren el nombre de mieles.
- Punteo: esta fase persigue la obtención del “punto” mediante la evaporación casi total del agua. El punto de la panela se alcanza cuando las mieles alcanzan una concentración de 95 a 96° Brix para panela granulada.
- Batido: una vez obtenido el punto de panela, las mieles se depositan en una batea y por acción del batido intensivo e intermitente mediante palas de acero inoxidable, la panela se enfría perdiendo su capacidad de adherencia y adquiriendo la textura y estructura de grano adecuada.
- Empaque: la panela granulada producida se empaca en sacos para su comercialización.

Las operaciones que tienen por objetivo reducir la cantidad de agua contenida en el jugo de caña se realizan por medio de suministro de calor, transferido por los gases de combustión producto de la quema de bagazo. Este conjunto de operaciones se lleva a cabo en una hornilla panelera.

---

<sup>2</sup> Sólidos insolubles en suspensión que se agregan entre sí y forman una masa homogénea, la cual se retira durante el proceso de clarificación.



**Figura 1. Proceso de elaboración de la panela granulada.**  
Fuente: Elaboración propia.

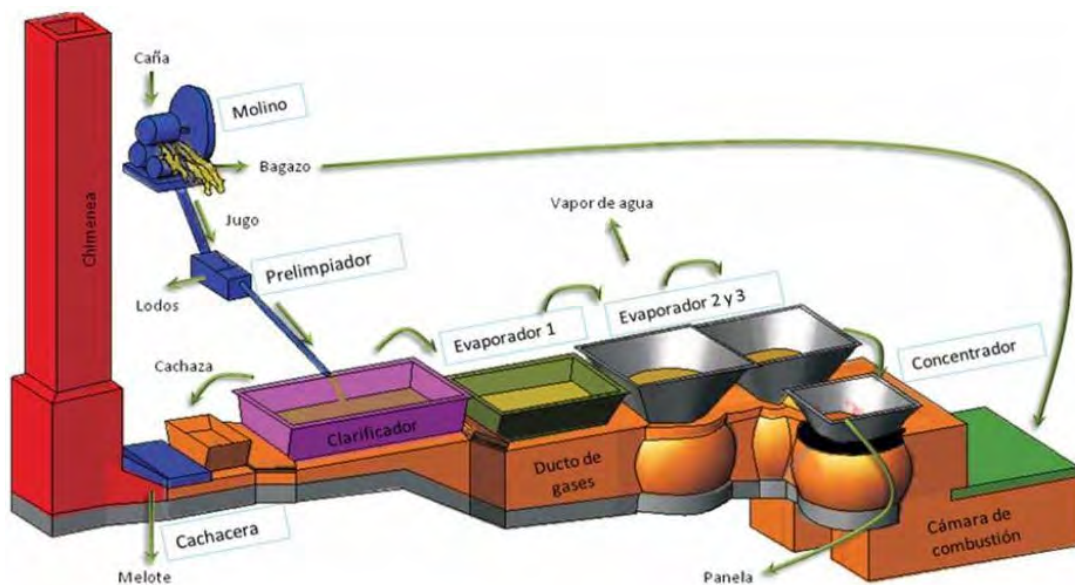
## 1.2 La hornilla panelera<sup>3</sup>

La hornilla es la parte esencial de la planta de procesamiento de panela en donde se transforma la energía química, obtenida de la combustión directa del bagazo, en energía térmica y mediante las etapas de clarificación, evaporación, concentración y punteo se evapora más del 90% del agua contenida en el jugo, extraídos de la caña de azúcar, obteniendo finalmente la panela.

La hornilla panelera está formada por la cámara combustión, ducto de humos, pailas y chimenea. En la figura 2 se muestra la vista isométrica de las partes de una hornilla y el proceso de elaboración de panela.

De acuerdo al manejo de jugos en una hornilla, existen tres formas de flujo de los jugos a través de la hornilla: paralelo, contracorriente y mixto (ver figura 3).

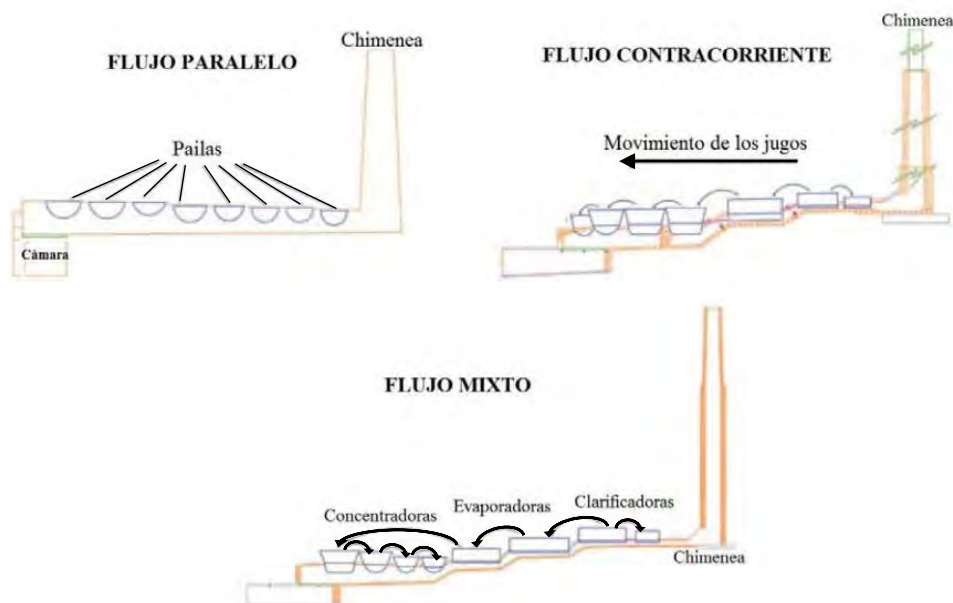
- Flujo paralelo: los jugos y los gases circulan en la misma dirección.
- Flujo contracorriente: los jugos y los gases circulan en dirección opuesta. Es el flujo ideal, aunque posee la desventaja de que se queme la panela por la ubicación de la paila punteadora.
- Flujo mixto: la dirección de los jugos primero es contracorriente y luego paralela a la dirección de los gases de combustión. Con este tipo de flujo se resuelve la desventaja que posee el flujo contracorriente.



**Figura 2. Representación isométrica de las partes de una hornilla.**

Fuente: Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera [3].

<sup>3</sup> Este apartado ha sido elaborado a partir de las referencias [3], [7], [8] y [9].



**Figura 3. Tipos de flujo en las hornillas paneleras.**

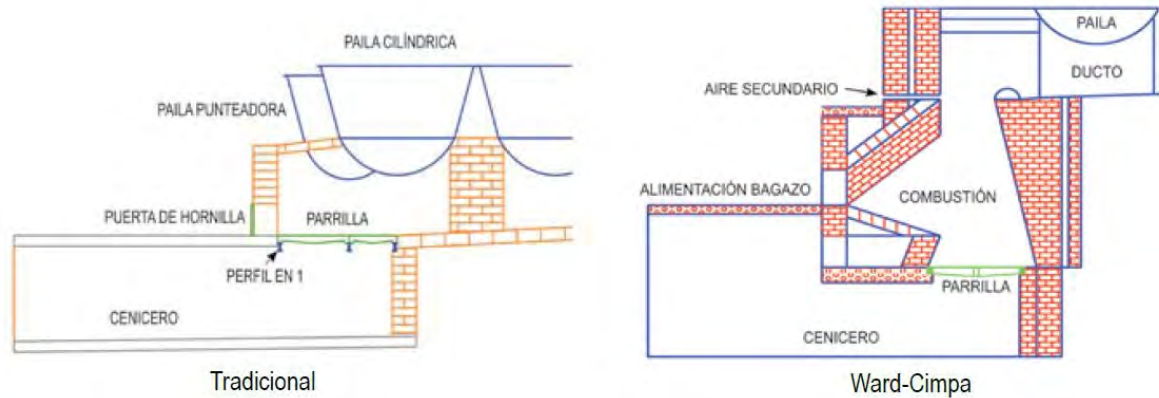
Fuente: Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera [3].

### 1.2.1 Cámara de combustión

El hogar de la cámara de combustión se construye con ladrillos refractarios y es el lugar donde se llevan a cabo las reacciones de combustión, la cual se produce al entrar en contacto el combustible (bagazo o cualquier otro tipo de combustible auxiliar como leña) y el comburente u oxidante (oxígeno del aire). Las cámaras de combustión están compuestas por:

- **Puerta de alimentación o de hornilla:** es una pequeña puerta o abertura por donde el operario ingresa el combustible, ya sea bagazo u otro tipo de biomasa sólida, a la cámara de combustión. Por lo general está provista de una tapa para evitar el ingreso de aire frío a la cámara o la pérdida de calor mientras no se está alimentando. Comercialmente se construyen en hierro de fundición gris, material que soporta temperaturas medianamente altas sin deformarse.
- **Parrilla:** es un enrejado que sirve como lecho para el bagazo permitiendo la entrada de aire necesaria para la combustión y paso de cenizas. Comercialmente se construyen en hierro fundido con un periodo de vida superior a dos años y según el tipo de enrejado la parrilla puede tener entre un 40 y un 60% de área libre dependiendo del diseño de la hornilla.
- **Cenicero:** es una cavidad ubicada directamente debajo de la parrilla donde se depositan por gravedad las cenizas y el material no quemado del combustible. Además canaliza y precalienta el aire para la combustión. Se pueden construir con ladrillos refractarios o por excavación directa en la tierra.

Los tipos de cámaras de combustión más utilizados en la actualidad son: tradicional, tradicional mejorada, tipo Ward y tipo Ward-Cimpa. En la figura 4 se observan las cámaras de combustión tipo tradicional y tipo Ward-Cimpa.



**Figura 4. Cámara de combustión tipo tradicional y Ward-Cimpa.**

Fuente: Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera [3].

### 1.2.2 Ducto de humos

Es un conducto ubicado a continuación de la cámara de combustión que tiene como función guiar los gases de combustión y ponerlos en contacto con las pailas para transferir parte de su energía térmica a los jugos. La forma del ducto de humos depende de la geometría y dimensiones de las pailas, así como de los materiales utilizados que a su vez dependen del desarrollo técnico y económico de cada región. El ducto de humos está formado por: las paredes, muros de soporte, piso y arcos.

Los ductos han evolucionado desde los más tradicionales que son una excavación realizada directamente en el sitio de construcción de la hornilla y donde las pailas se colocan soportadas por muros y arcos de adobe, hasta aquellos donde las partes que lo constituyen se construyen de material refractario. En la figura 5 se muestra un ducto de humos.



**Figura 5. Ducto de humos.**

Fuente: Uso eficiente de la energía producida por la combustión de biomasa [7].

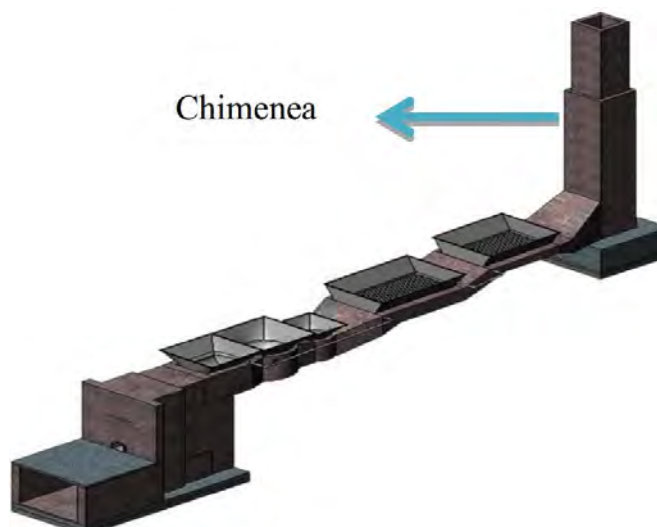
### 1.2.3 Pailas

Las pailas, también llamados tachos o fondos, son un conjunto de intercambiadores de tipo abierto de calor dispuestos sobre y a lo largo del ducto de humos que ponen en contacto térmico los gases de combustión (fluido caliente) con el jugo o miel de la caña de azúcar para concentrarlo y así obtener la panela. El calor se transfiere por convección y radiación hacia las pailas y luego hacia los jugos. Por otra parte, debido a que tienen contacto directo con el jugo de caña, es necesario cumplir con reglamentos alimenticios y es por ello que la gran mayoría de las pailas son fabricadas de acero inoxidable, hierro galvanizado o aluminio.

Debido a la ebullición de los jugos se forma espuma, y con el fin de prevenir su derrame se aumenta el volumen en la parte superior de las pailas, mediante paredes de cemento, madera o láminas metálicas denominadas falcas. Cuando las falcas son de láminas metálicas se unen, se unen al casco de la paila por medio de remaches o soldadura. Cabe resaltar que las pailas de acero inoxidable, con falca soldada, son las únicas recomendadas para la producción de panela, dadas sus características para el consumo humano [2].

### 1.2.4 Chimenea

Es el ducto que conduce a los gases de combustión hacia la atmósfera. Su función es crear el tiro<sup>4</sup> necesario para la combustión del bagazo y la circulación de manera natural los gases a través de la hornilla, desde la cámara de combustión hacia el exterior. Su forma puede ser cilíndrica, trapezoidal o cónica construido en ladrillo común o lámina de hierro, empalmado con la hornilla al final del ducto de humos. Además, sus dimensiones dependen del diseño de la hornilla (ver figura 6).



**Figura 6. Chimenea**

Fuente: Uso eficiente de la energía producida por la combustión de biomasa [7].

<sup>4</sup> Diferencia de presión necesaria para que los productos de combustión fluyan desde la cámara de combustión hasta la salida de la chimenea. Es causado por la diferencia de densidad del aire y de los gases de combustión.

### 1.3 Tipos de pailas utilizadas en la industria panelera

Las pailas se seleccionan de acuerdo a las necesidades de producción de la azúcar orgánica, la función que van a desempeñar: evaporación, clarificación, concentración o punteo, y del desarrollo tecnológico de cada región, siendo siempre el objetivo incrementar el área de contacto de los gases de combustión para elevar la energía transferida a cada paila sin aumentar su volumen. Existen varios tipos de pailas: semiesférica, semicilíndrica, plana o recibidora, plana aletada y pirotubular.

#### 1.3.1 Paila semicilíndrica

Este tipo de pailas están compuestas por medio de troncos de cilindro circulares con bases aproximadamente esféricas (ver figura 7).

Las pailas semicilíndricas, por lo general, se ubican en la zona de mayor temperatura de la hornilla y se utilizan en la etapa de concentración, cuando los jugos tienen concentraciones mayores a 70° Brix y un volumen relativamente considerable.

La alta concentración de las mieles dificulta el uso de tuberías para realizar el paso de mieles de una paila a otra, por ello se realiza mediante la utilización de cucharones. El uso de una paila semicilíndrica hace que este proceso sea más sencillo ya que no presenta esquinas o ángulos que dificulten el traslado.

Por otra parte, las pailas semicilíndricas a igualdad de volumen presentan una mayor área de transferencia de calor que las pailas planas pero menor que las pailas semiesféricas. Sin embargo, debido a su geometría, las pailas semicilíndricas para una gran cantidad de volumen reducen el ancho de la hornilla, lo que las hace más convenientes en esta etapa.

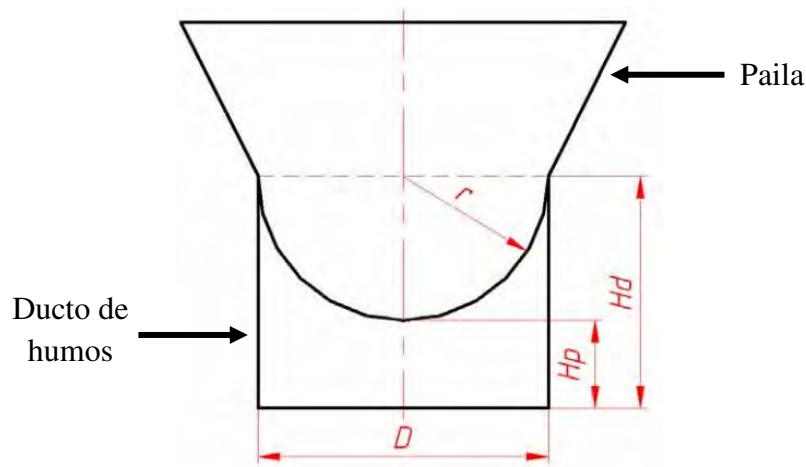


**Figura 7. Paila semicilíndrica.**

Fuente: Uso eficiente de la energía producida por la combustión de biomasa [7].

En la figura 8 se muestra el esquema de una paila semicilíndrica donde se aprecian sus dimensiones principales, las cuales permiten obtener los parámetros más

importantes para su diseño como: el área de transferencia de calor, el área transversal de los ductos, el volumen del jugo y el diámetro hidráulico.



**Figura 8. Esquema de una paila semicilíndrica.**

Fuente: Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-Cimpa y Plana-Cimpa en hornillas paneleras [8].

Para una paila semicilíndrica con bases planas de largo  $M$ , el área de transferencia de calor viene determinada por la siguiente expresión:

$$A_{TR\_SC} = \pi r^2 + \pi r M \quad [m^2] \quad (1.1)$$

En la figura 8, se observa que no toda la paila se encuentra dentro del ducto de humos, por lo que también se hace necesario conocer el área transversal del ducto de humos o área libre de flujo cuyo valor se evalúa a través de la expresión:

$$A_{t\_DH\_SC} = H_d D - \frac{\pi r^2}{2} \quad [m^2] \quad (1.2)$$

Con el fin de evitar elevados esfuerzos térmicos y que se solidifiquen los jugos en el fondo de la paila, en toda paila, la superficie interior correspondiente a la superficie exterior en contacto con los gases calientes debe estar cubierta por jugo. Este volumen se denomina volumen mínimo de jugos. Para una paila semicilíndrica, este volumen viene determinado por la expresión:

$$V_{J\_SC} = \frac{\pi r^2 M}{2} \quad [m^3] \quad (1.3)$$

Otro parámetro importante en el estudio es el diámetro hidráulico, el cual es un término muy utilizado cuando se trabaja con canales y tubos no circulares, y permite estudiar el comportamiento de flujo de la misma forma como si fuera una tubería de sección circular. Para un caso general, el diámetro hidráulico viene dado por la expresión:

$$D_h = \frac{4(\text{Área Transversal})}{\text{Perímetro mojado}} = 4R_h \quad [m] \quad (1.4)$$

Para el caso de una paila semicilíndrica esta expresión se convierte en:

$$D_{h_{sc}} = \frac{4\left(H_d D - \frac{\pi r^2}{2}\right)}{D + 2H_d + \pi r} \quad [m] \quad (1.5)$$

### 1.3.2 Pailas semiesféricas

Este tipo de pailas consisten en un casquete esférico cuya profundidad normalmente es cercana al 50% del valor del radio de la esfera que lo genera (ver figura 9).

Las pailas semiesféricas se utilizan, por lo general, en etapas de punteo, cuando los jugos tienen concentraciones mayores a 70° Brix y un volumen bajo.

En la etapa de punteo, por la misma razón que en la etapa de concentración, el paso de mieles de una paila a otra se realiza mediante el uso de cucharones. Por lo tanto, el uso de una paila semiesférica hace que este proceso sea más sencillo ya que no presenta esquinas o ángulos que dificulten el traslado.

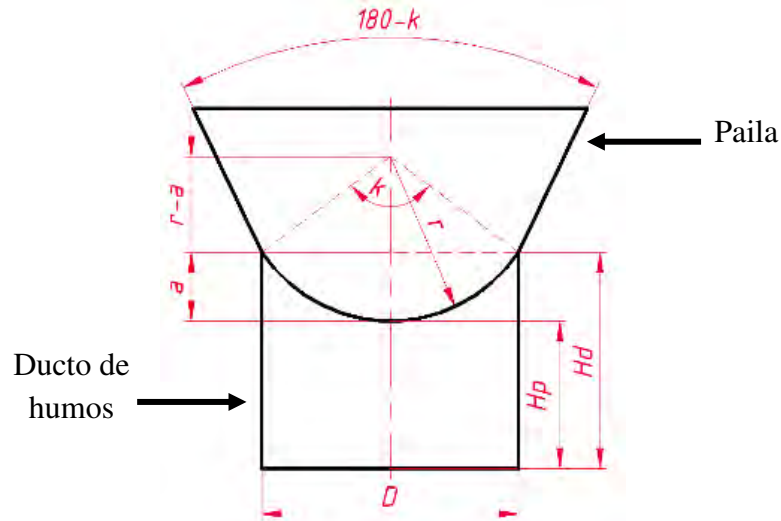
Además como en esta etapa el volumen de mieles es bajo, conviene utilizar pailas semiesféricas debido a su mayor relación área de transferencia-volumen de jugo.



**Figura 9. Paila semiesférica.**

Fuente: Uso eficiente de la energía producida por la combustión de biomasa [7].

En la figura 10 se muestra el esquema de una paila semiesférica donde se aprecian sus dimensiones principales, las cuales permiten obtener los parámetros más importantes para su diseño como: el área de transferencia de calor, el área transversal de los ductos, el volumen del jugo y el diámetro hidráulico.



**Figura 10. Esquema de una paila semiesférica.**

Fuente: Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-Cimba y Plana-Cimba en hornillas paneleras [8].

Para una paila semiesférica de largo  $M$ , el área de transferencia de calor viene determinada por la siguiente expresión:

$$A_{TR\_SE} = 2\pi r^2 \left[ 1 - \cos\left(\frac{k}{2}\right) \right] \quad [m^2] \quad (1.6)$$

El valor del área libre de flujo se evalúa a través de la expresión:

$$A_{t\_DH\_SE} = H_d D - \left[ \frac{r^2 k}{2} - \frac{D(r-a)}{2} \right] \quad [m^2] \quad (1.7)$$

Donde:

$$D = 2r \sin\left(\frac{k}{2}\right) \quad [m] \quad (1.8)$$

$$a = r \left[ 1 - \cos\left(\frac{k}{2}\right) \right] \quad [m] \quad (1.9)$$

Para una paila semiesférica, el volumen mínimo de jugos viene determinado por la expresión:

$$V_{J\_SE} = \frac{\pi r^3}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{k}{2}\right) \right] \quad [m^3] \quad (1.10)$$

Por último, el diámetro hidráulico es:

$$D_{h\_PL} = \frac{4 \left\{ H_d D - \left[ \frac{r^2 k}{2} - r^2 \sin\left(\frac{k}{2}\right) \cos\left(\frac{k}{2}\right) \right] \right\}}{D + 2H_d + rk} \quad [m] \quad (1.11)$$

### 1.3.3 Paila plana

Esta paila es un tronco de pirámide, el cual se encuentra abierto en su base mayor y expuesto a los gases de combustión en su base menor (ver figura 11). Es una paila de uso tradicional, sin ninguna mejora aplicada.

Se ubican, por lo general, en la zona de menor temperatura de la hornilla y se utilizan en las etapas de clarificación y evaporación, cuando los jugos tienen concentraciones menores a 70° Brix y un volumen relativamente considerable.

La baja concentración de los jugos (menor a 70° Brix) hace posible el uso de tuberías de trasvase para el paso del jugo de una paila a otra, por ello no es necesario una paila con cavidades curvas. Al igual que en la paila semicilíndrica su geometría permite trabajar con grandes volúmenes sin aumentar excesivamente el ancho de la hornilla.

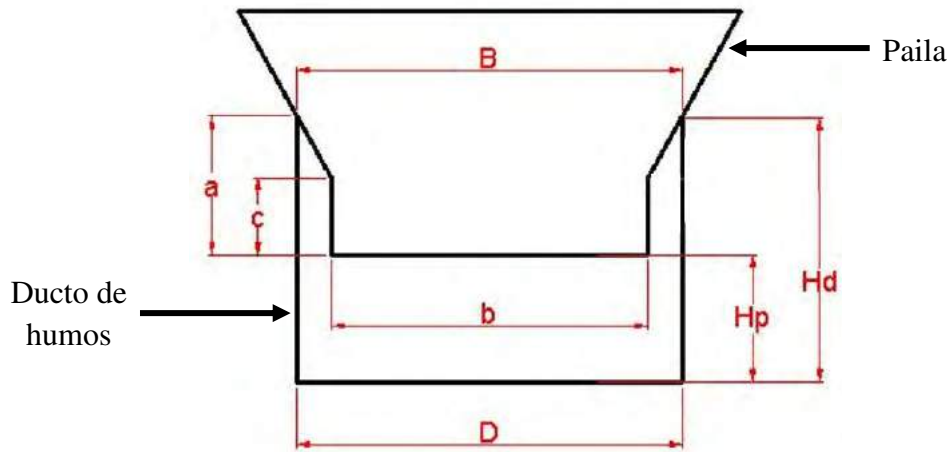
Debido a su baja relación área de transferencia-volumen de jugo, este tipo de pailas están siendo reemplazadas por pailas aleteadas o pirotubulares.



**Figura 11. Paila plana.**

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12 se muestra el esquema de una paila plana donde se aprecian sus dimensiones principales, las cuales permiten obtener los parámetros más importantes para su diseño como: el área de transferencia de calor, el área transversal de los ductos, el volumen del jugo y el diámetro hidráulico.



**Figura 12. Esquema de una paila plana.**  
Fuente: Elaboración propia.

Para una paila plana de largo  $M$ , el área de transferencia de calor viene determinada por la siguiente expresión:

$$A_{TR\_PL} = bM + (B + b)(a - c) + 2bc + 2M \left[ c + \sqrt{\left(\frac{B - b}{2}\right)^2 + (a - c)^2} \right] \quad [m^2] \quad (1.12)$$

Si la paila se coloca de modo que la base de la paila esté en el mismo nivel que la parte superior de las paredes del ducto de humos de manera que  $a=0$  y  $B=b$ , esta expresión se reduce a:

$$A_{TR\_PL} = bM \quad [m^2] \quad (1.13)$$

El valor del área libre de flujo se evalúa a través de la expresión:

$$A_{t\_DH\_PL} = H_d D - \frac{(B + b)(a - c)}{2} - bc \quad [m^2] \quad (1.14)$$

Considerando  $a=0$  y  $B=b$ , esta expresión se reduce a:

$$A_{t\_DH\_PL} = H_d D \quad [m^2] \quad (1.15)$$

Para una paila plana, el volumen mínimo de jugos viene determinado por la expresión:

$$V_{J\_PL} = \frac{(a - c)M(B + b)}{2} + cbM \quad [m^3] \quad (1.16)$$

Por último, el diámetro hidráulico es:

$$D_{h\_PL} = \frac{4 \left[ H_d D - \frac{(B+b)(a-c)}{2} - bc \right]}{D + 2H_d + b + 2c + 2\sqrt{\left(\frac{B-b}{2}\right)^2 + (a-c)^2}} \quad [m] \quad (1.17)$$

Considerando  $a=0$  y  $B=b$ , esta expresión se reduce a:

$$D_{h\_PL} = \frac{2H_d D}{D + H_d} \quad [m] \quad (1.18)$$

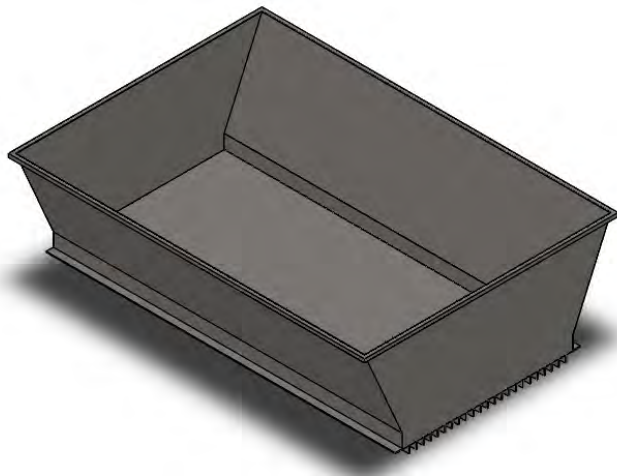
### 1.3.4 Paila aleteada

Las pailas aleteadas (ver figura 13) se obtienen al agregar superficies extendidas (aletas) a las pailas planas, lo que aumenta el área de transferencia de calor y como consecuencia genera una mejora en la transferencia de calor con respecto a las pailas planas. Permiten obtener hornillas relativamente más pequeñas. Hay que tener en cuenta que se tiene que hacer un cálculo para determinar las dimensiones y el número de aletas para obtener rendimientos óptimos.

Se suelen ubicar en las zonas de calor de baja temperatura de la hornilla donde se requiere mayor área de transferencia para asegurar la potencia térmica requerida. Se utilizan, por lo general, para las etapas de clarificación y evaporación.

A pesar de tener una muy buena relación área de transferencia de calor-volumen de jugo, no es recomendable ubicarlas en zonas cercanas a la cámara de combustión. Las aletas cuando son expuestas a elevadas temperaturas (mayores a 400 °C) generan grandes esfuerzos térmicos que pueden originar una falla.

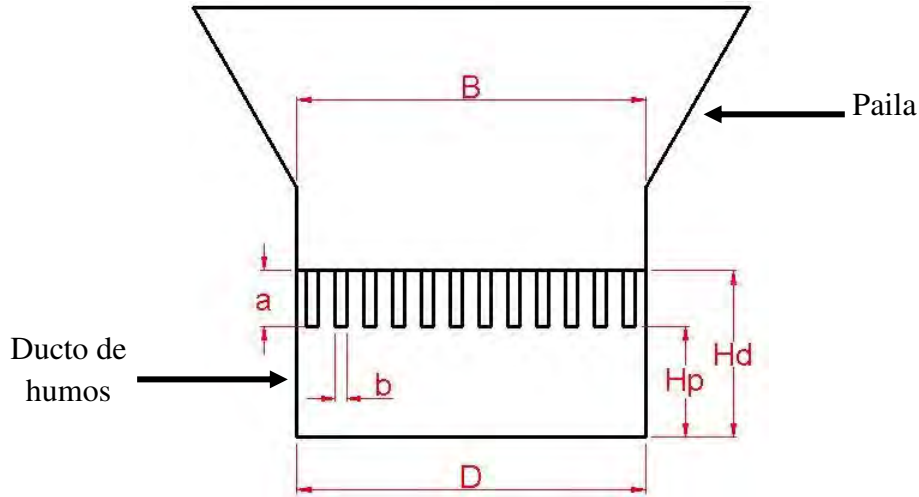
En la etapa de clarificación, el uso de pailas planas aleteadas permite que las impurezas floten y puedan ser retiradas manualmente al contrario que en las pailas pirotubulares (descritas en el apartado 1.3.5).



**Figura 13. Paila aleteada.**

Fuente: Elaboración propia.

En el esquema de una paila plana aleteada (ver figura 14), se aprecian las dimensiones principales que permiten obtener los parámetros más importantes para su diseño como: el área de transferencia de calor, el área transversal de los ductos, el volumen del jugo y el diámetro hidráulico.



**Figura 14. Esquema de una paila plana aleteada.**  
Fuente: Elaboración propia.

Para una paila plana aletada de largo  $M$  y con una cantidad  $n$  de aletas, el área de transferencia de calor viene determinada por la expresión:

$$A_{TR\_AL} = BM + 2na(M + b) \quad [m^2] \quad (1.19)$$

El valor del área libre de flujo se evalúa a través de la expresión:

$$A_{t\_AL} = H_d D - nab \quad [m^2] \quad (1.20)$$

Para este caso, la superficie de contacto con los gases calientes es sólo la base inferior de la paila, por lo tanto  $V_J=0$ .

Por último, el diámetro hidráulico es:

$$D_h = \frac{4[H_d D - nab]}{D + 2H_d + B + 2na} \quad [m] \quad (1.21)$$

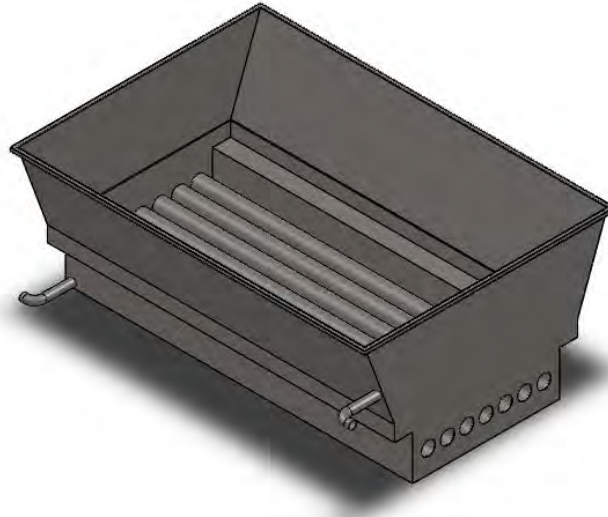
### 1.3.5 Paila pirotubular

Las pailas pirotubulares suponen un paso más en la búsqueda de mejorar la transferencia de calor en la hornilla. Tiene la forma de un paralelepípedo que se ubica dentro del ducto, el cual es atravesado longitudinalmente por tubos, y una falca en forma de tronco de cono, la cual se encuentra abierta en su base mayor y unido al paralelepípedo en su base inferior. En la figura 15 se muestra una paila pirotubular circular.

De igual forma que las pailas aleteadas, se suelen ubicar en las zonas de baja temperatura de la hornilla y se utilizan en la etapa de evaporación. Permiten obtener una paila de menor longitud debido a su mayor relación área de transferencia-volumen.

A pesar de tener la mejor relación área de transferencia de calor-volumen de jugo, no es recomendable ubicarlas en zonas cercanas a la cámara de combustión. Los pirotubos cuando son expuestas a elevadas temperaturas generan grandes esfuerzos térmicos que pueden originar una falla.

Cabe resaltar que para la etapa de clarificación, no se recomienda el uso de pailas pirotubulares. La extracción de cachaza se hace difícil y hasta imposible debido a la formación de cachaza debajo o en zonas cercanas a los pirotubos. Se puede modificar la forma de los pirotubos de manera que este problema disminuya. Sin embargo, el hacer tales modificaciones obliga a dejar siempre una gran cantidad de jugo remanente en la paila para evitar la formación de una capa de miel quemada sobre los pirotubos, lo que hace que estas modificaciones tengan sólo un valor científico [9].



**Figura 15. Paila pirotubular circular.**

Fuente: Elaboración propia.

El esquema de una paila pirotubular circular de la figura 16, muestra las dimensiones principales que permiten obtener los parámetros más importantes para su diseño como: el área de transferencia de calor, el área transversal de los ductos, el volumen del jugo y el diámetro hidráulico.

Para el caso de la paila pirotubular de largo  $M$  y una cantidad  $n$  de pirotubos, el área de transferencia de calor viene determinada por la expresión:

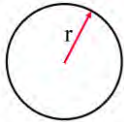
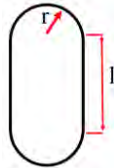
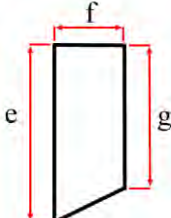
$$A_{TR\_PR} = M(2a + 2c + b + nL_P) + 2(ab - nA_{TP}) \quad [m^2] \quad (1.22)$$

El valor del área libre de flujo se evalúa a través de la expresión:

$$A_{t\_PR} = H_d D - ab + nA_{TP} \quad [m^2] \quad (1.23)$$

Donde las expresiones del área transversal,  $A_{TP}$ , y la longitud,  $L_P$ , de cada pirotubo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Área transversal de los pirotubos.

| Geometría del pirotubo                                                             | Área transversal del pirotubo                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|   | $L_P = 2\pi r$ $A_{TP} = \pi r^2$                                                     |
|   | $L_P = 2\pi r + 2l$ $A_{TP} = \pi r^2 + 2lr$                                          |
|  | $L_P = e + f + g + \sqrt{(e - g)^2 + f^2}$ $A_{TP} = \left(\frac{e + g}{2}\right)(f)$ |

Fuente: Elaboración propia.

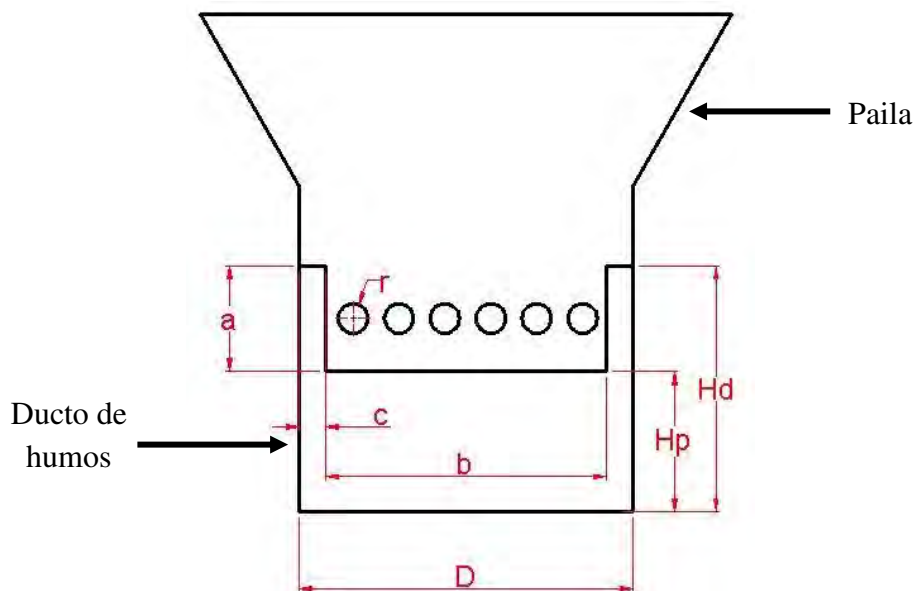


Figura 16. Esquema de una paila pirotubular circular.

Fuente: Elaboración propia

Para este tipo de pailas es muy importante determinar el valor mínimo de volumen de los jugos de manera que la paila pueda ser expuesta sin tener que preocuparse por elevados esfuerzos térmicos y que se quemen los jugos. Si el volumen de jugo es menor que el volumen mínimo, debido a la presencia de los pirotubos, el jugo que se encuentre en las cercanías de estos se quema y forma capas de miel carbonizada, las cuales son difíciles de eliminar por la geometría de los pirotubos, disminuyendo los coeficientes de

transferencia de calor y por lo tanto, la eficiencia de la hornilla panelera. El volumen mínimo de jugos viene determinado por la expresión:

$$V_{J\_PR} = (ab - nA_{TP})M \quad [m^3] \quad (1.24)$$

Por último, el diámetro hidráulico es:

$$D_{h\_PR} = \frac{4[H_d D - ab + nA_{TP}]}{D + 2(H_d + c + a) + b + nL_p} \quad [m] \quad (1.25)$$

#### 1.4 Criterios de selección de geometría y número de pirotubos

Las características principales que diferencian una paila pirotubular de otra son el número, tamaño y geometría de los pirotubos. La cantidad y tamaño de pirotubos en las pailas se determinó, principalmente, por parámetros como: el área plana disponible en la hornilla panelera y la facilidad de circulación de los gases de combustión. Sin embargo, estos parámetros sólo permiten una selección de pailas después de realizar las simulaciones.

La selección de geometría de los pirotubos se basó en parámetros como: la facilidad de limpieza, facilidad de construcción, área total de transferencia de calor y generación de esfuerzos térmicos elevados. A excepción de los dos últimos, estos parámetros permiten realizar una selección de pailas pirotubulares antes de realizar las simulaciones, lo que genera una disminución del tiempo utilizado. Estos parámetros de selección se describen a continuación:

- **Facilidad de limpieza:** es el parámetro más importante al seleccionar la geometría. La capa de miel quemada que se forma en el exterior de los tubos y la capa de cenizas en su interior dificultan la transferencia de calor, disminuyendo la eficiencia de la paila. Es por ello que debe evaluarse la disposición de los pirotubos para permitir eliminar estas capas durante la limpieza y el mantenimiento de la paila.
- **Facilidad de construcción:** es el segundo parámetro más importante. Por más eficiente que sea la paila, debe evaluarse la dificultad de construcción. Geometrías muy complicadas demandan mucho esfuerzo y pueden tener un costo muy elevado, lo que podría hacer que el uso de la paila no sea factible.
- **Área total de transferencia de calor:** La cantidad de área de transferencia de calor se encuentra ligada con la facilidad de distribución de la geometría en un área transversal determinada. Dependiendo de qué forma geométrica se utilice, puede entrar una mayor cantidad de tubos o tubos de mayor tamaño en una determinada área transversal.
- **Resistencia de esfuerzos térmicos elevados:** la forma geométrica de los pirotubos debe evitar presentar ángulos o cambios bruscos de sección que generen una concentración de esfuerzos y puedan provocar que la paila se deforme permanentemente o se rompa.

En la tabla 2 se presenta una comparación de siete geometrías teniendo en cuenta los criterios mencionados (siendo 1 malo y 3 bueno), los cuales tienen en cuenta sólo una columna de tubos para que el criterio de facilidad de limpieza sólo dependa de la forma de los tubos. Esta tabla ha sido elaborada en base a las experiencias del departamento de Energía de la Universidad de Piura en proyectos similares.

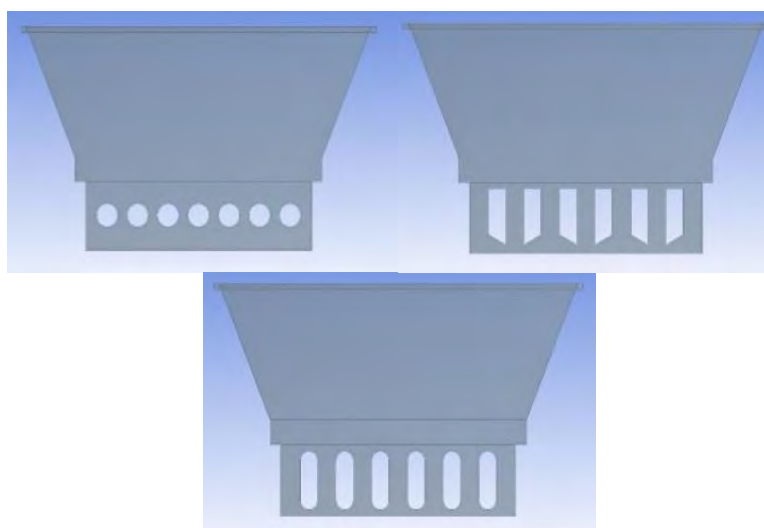
**Tabla 2. Tabla de comparación de formas geométricas según los criterios considerados.**

| Criterios de selección geométrica          |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Facilidad de limpieza                      | 3                                                                                 | 1                                                                                 | 3                                                                                 | 3                                                                                 | 3                                                                                  | 3                                                                                   | 3                                                                                   |
| Facilidad de construcción                  | 3                                                                                 | 3                                                                                 | 3                                                                                 | 2                                                                                 | 2                                                                                  | 3                                                                                   | 3                                                                                   |
| Área total de transferencia de calor       | 2                                                                                 | 2                                                                                 | 2                                                                                 | 3                                                                                 | 2                                                                                  | 3                                                                                   | 1                                                                                   |
| Resistencia de esfuerzos térmicos elevados | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 3                                                                                 | 2                                                                                 | 1                                                                                  | 2                                                                                   | 2                                                                                   |
| Total                                      | 9                                                                                 | 7                                                                                 | 11                                                                                | 10                                                                                | 8                                                                                  | 11                                                                                  | 9                                                                                   |

Fuente: Elaboración propia.

#### 1.4.1 Geometrías seleccionadas para el estudio

Bajo los criterios de selección definidos previamente, las que obtuvieron un mayor resultado, y por tanto mejor comportamiento operacional, serán las tres geometrías de pirotubos a evaluar: circular, rectangular redondeada y trapezoidal (ver figura 17). Los planos de cada paila se encuentran en el Anexo A.



**Figura 17. Formas seleccionadas de pirotubos.**

Fuente: Elaboración propia.



## Capítulo 2

### Fundamentos teóricos

Hoy en día, el uso de computadoras es una parte muy importante de la vida cotidiana y en consecuencia no cuestionamos ni esforzamos en comprender cómo funcionan los programas y cuáles son los principios que los gobiernan. Si bien esto puede ser normal desde un punto de vista general, para un ingeniero, puede significar un error decisivo. Debe ser de interés para todos los profesionales que utilicen estos programas, el reconocer las características fundamentales y limitaciones de sus herramientas computacionales. Los modelos, ya sean programados como parte de un código computacional o no, no brindan datos reales sino una descripción y/o simplificación del proceso real o fenómeno de estudio. Sin embargo, una vez que se entienden y aceptan las diferencias entre el modelo y la realidad, el usuario puede sentirse libre de utilizar sus herramientas computacionales según considere conveniente.

El objetivo del presente capítulo es proporcionar al lector los fundamentos en el modelado de dinámica de fluidos y transferencia de calor utilizados en la dinámica de fluidos computacional (CFD), y fundamentos de resistencia de los materiales utilizados en el análisis estructural por medio de elementos finitos, los cuales son empleados en los programas ANSYS CFX y ANSYS Static Structural. Se introducen y explican algunos conceptos básicos con el fin de comprender mejor los modelos utilizados. Cabe resaltar que el presente capítulo no presenta un estudio exhaustivo sobre el tema, sin embargo, proporciona al lector una idea de las leyes físicas, principales principios y suposiciones hechas en el modelado.

#### 2.1 Fundamentos de mecánica de fluidos<sup>5</sup>

La mecánica o dinámica de fluidos es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos<sup>6</sup> en reposo o en movimiento, y la interacción de éstos con sólidos o con otros fluidos en las fronteras. El comportamiento de los fluidos se modela mediante una serie

---

<sup>5</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [10] a la [14].

<sup>6</sup> Sustancias en fase líquida o gaseosa.

de ecuaciones que describen el flujo de fluidos, la transferencia de calor y otros procesos relacionados con una situación normal de flujo. Una vez que estas ecuaciones han sido expresadas matemáticamente, puede parecer un proceso sencillo el obtener las soluciones numéricas para un problema específico. Sin embargo, debido a una serie de razones como por ejemplo: la naturaleza matemática de las ecuaciones de transporte, la presencia de turbulencia, el comportamiento del fluido, etc.; este no es el caso. Es por esta razón que se deben utilizar métodos de cálculo numérico para obtener las soluciones aproximadas.

Las ecuaciones de conservación son expresiones matemáticas de tres principios fundamentales de la Física sobre los cuales se basa la dinámica de fluidos: la ecuación de la conservación de la masa, cantidad de movimiento y de energía.

## **2.1.1 Ecuaciones de transporte**

### **2.1.1.1 Ecuación de continuidad**

La ecuación de continuidad o de conservación de la masa implica que la materia no puede ser creada ni destruida y la cantidad total de masa en un sistema aislado se mantiene constante sin importar los cambios físicos o químicos que ocurran en dicho sistema. Este principio puede ser cuestionado aludiendo a la equivalencia entre masa y energía dada por la teoría de la relatividad de Einstein. Sin embargo, en este caso la diferencia de masa es tan pequeña que puede ser despreciada. La ecuación de continuidad en forma diferencial se expresa como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.1)$$

Donde

$\rho$ : es la densidad del fluido [ $\text{kg/m}^3$ ].

$t$ : es el tiempo [s].

$\nabla$ : es el gradiente u operador nabla  $\left(\frac{\delta}{\delta x}, \frac{\delta}{\delta y}, \frac{\delta}{\delta z}\right)$ .

$\vec{u}$ : es el vector velocidad  $(u, v, w)$  [m/s].

### **2.1.1.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento**

El momento lineal o cantidad de movimiento es una cantidad vectorial que resulta de la multiplicación de la masa de un objeto, como por ejemplo un volumen de control de un fluido, por su velocidad. La segunda ley de Newton del movimiento la suma de todas las fuerzas que actúan sobre un objeto es igual a la velocidad de cambio en el tiempo de la cantidad de movimiento:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{u}) \quad [N] \quad (2.2)$$

Donde  $\Sigma F$  es la suma de todas las fuerzas que actúan en un objeto,  $m$  es la masa y  $\vec{u}$  es el vector velocidad. Esta es la ecuación de la cual parten todas las formas equivalentes de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.

La fuerza total sobre un volumen de fluido es una combinación de fuerzas debido a esfuerzos normales y tangenciales que actúan en cada lado del volumen de control. Estas fuerzas pueden ser diferenciadas en dos tipos:

Fuerzas de superficie: como los campos de presión y viscosidad.

Fuerzas de cuerpo: como la fuerza gravitacional y campos electromagnéticos.

La ley de la conservación de la cantidad de movimiento implica que en un sistema aislado<sup>7</sup>, el movimiento nunca cambia de tal forma que la cantidad de movimiento total permanece constante en el tiempo. En su forma diferencial esta ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{u}) + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho B \quad [N/m] \quad (2.3)$$

Donde

$\frac{\delta}{\delta t}(\rho\vec{u})$ : es la razón de cambio local de la cantidad de movimiento en el tiempo para un volumen de control.

$\nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u})$ : es la razón de cambio de la cantidad de movimiento debido al movimiento a través de un campo de flujo inestable.

$-\nabla p$ : representa las fuerzas de presión que actúan en el fluido.

$\nabla \tau$ : son los esfuerzos de corte viscosos.

$\rho B$ : representa las fuerzas de cuerpo, tales como la fuerza gravitacional.

El tensor de esfuerzos  $\tau$ , en forma matricial, se expresa como:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{bmatrix} \quad [N/m^2] \quad (2.4)$$

Está dado por la expresión:

$$\tau = \mu \left( \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \vec{u} \right) \quad [N/m^2] \quad (2.5)$$

---

<sup>7</sup> Sistema que no intercambia materia ni energía con su entorno.

En donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido y  $\delta$  es la función delta de Kronecker o matriz identidad.

### 2.1.1.3 Ecuación de conservación de la energía

La ecuación de la conservación de la energía se deriva del principio de conservación de la energía que afirma que la energía no se crea ni se destruye. Sin embargo, esta puede transformarse de una forma a otra.

En un sistema existen varios mecanismos que contribuyen con el flujo de calor total, los más comunes son la conducción, convección y radiación. Adicionalmente, se encuentra el trabajo mecánico realizado en un sistema por la flotación y al llamado efecto Dufor<sup>8</sup>.

La ecuación de la energía puede ser escrita de diversas formas dependiendo de qué propiedad se utilice como variable dependiente. Utilizando la entalpía total como variable dependiente, la ecuación de conservación de la energía se expresa:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot \tau) + \vec{u} \cdot S_M + S_E \quad \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h_{tot}) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p} \nabla \cdot h_{tot} - \dot{q}_r \right) \quad \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (2.7)$$

Donde  $h_{tot}$  es la entalpía total, relacionada con la entalpía estática  $h(T,p)$  por:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \vec{V}^2 \quad [J/kg] \quad (2.8)$$

### 2.1.1.4 Ecuaciones de estado

Las ecuaciones de transporte descritas anteriormente se deben complementar con ecuaciones constitutivas de estado para la densidad y entalpía con el fin de formar un sistema cerrado, es decir tener tantas ecuaciones como variables desconocidas. Para el caso de un gas ideal se tiene las siguientes relaciones:

$$\rho = \frac{p_{abs}}{RT} \quad [kg/m^3] \quad (2.9)$$

$$dh = c_p dT \quad [W/kg] \quad (2.10)$$

$$c_p = c_p(T) \quad \left[ \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right] \quad (2.11)$$

donde  $R$  es la constante del gas y  $p_{abs}$  es la presión absoluta del gas.

---

<sup>8</sup> Flujo de calor generado como consecuencia de un gradiente de concentración.

### 2.1.2 Turbulencia

Las ecuaciones de conservación presentadas anteriormente son sólo aplicables en el caso de flujo laminar<sup>9</sup>. Sin embargo, este no es el caso para la mayoría de flujos que se encuentran en la práctica. En cambio, la mayoría de flujos encontrados parecen ser irregulares y aleatorios en el tiempo y espacio, dicho de otra forma en la mayoría de casos el movimiento del fluido es turbulento.

La turbulencia consiste en fluctuaciones en el campo de flujo en el tiempo y espacio. Es un proceso complejo principalmente porque es tridimensional, no estacionario y está compuesto por muchas escalas. Este fenómeno puede tener efectos significativos en las características del flujo y ocurre cuando las fuerzas inerciales del fluido son significantes en comparación con las fuerzas viscosas.

El flujo turbulento puede ser caracterizado mediante el uso del número de Reynolds  $Re$ , el cual es un número adimensional que da una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia (asociado con efectos convectivos) y las fuerzas viscosas:

$$Re = \frac{L_{carac} u_{carac}}{\nu} \quad (2.12)$$

Donde  $u_{carac}$  es la velocidad característica del fluido, usualmente tomada como la velocidad media del flujo,  $L_{carac}$  es la longitud característica y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

Para valores por debajo del denominado número de Reynolds crítico  $Re_{crit}$ , el flujo es laminar. Al incrementar el número de Reynolds por encima de  $Re_{crit}$  se lleva a cabo una complicada serie de eventos, lo que finalmente conduce a un cambio radical del carácter de flujo. Este estado final se denomina flujo turbulento, aquí las fuerzas de inercia predominan sobre las fuerzas viscosas y el movimiento se convierte en intrínsecamente inestable, conteniendo estructuras de flujo rotacional, llamados eddies o remolinos turbulentos presentes en una amplia gama de escalas de longitud. La velocidad y todas las demás propiedades de flujo varían de forma aleatoria y caótica.

Los remolinos de escala grande son creados por cualquier proceso que conduce el flujo. La interacción entre los remolinos de gran escala hace que ellos se descompongan formando remolinos más pequeños, y así se inicia un proceso que continúa hasta alcanzar tamaños de remolinos donde la viscosidad domina el flujo. La energía en estos remolinos más pequeños será disipada en calor y dando fin a la llamada " cascada turbulenta".

#### 2.1.2.1 Modelos de turbulencia

A pesar de que la turbulencia se caracteriza por irregularidad y aleatoriedad en el tiempo y espacio, el movimiento turbulento debe seguir las leyes de conservación.

En principio, las ecuaciones de Navier-Stokes describen tanto el flujo laminar como turbulento sin necesidad de información adicional, este enfoque se denomina

---

<sup>9</sup> Flujo que se caracteriza por un movimiento ordenado y suave.

Simulación Numérica Directa (DNS). Sin embargo, los flujos turbulentos para números de Reynolds reales abarcan un amplio rango de longitud y tiempo. Además, la implementación de este enfoque necesita tamaños de volúmenes finitos de control consistentes con el tamaño de los torbellinos más pequeños, lo que involucraría escalas de longitud mucho más pequeñas que el volumen finito más pequeño de una malla que pueda ser usada de manera práctica en un análisis numérico. Por lo tanto, la utilización de DNS en estos flujos requeriría una potencia de cálculo mayor en muchos órdenes de magnitud que la disponible en un futuro cercano.

Para que los efectos de turbulencia puedan ser predichos, se ha hecho una gran cantidad de investigaciones en CFD enfocada en métodos que hacen uso de modelos de turbulencia. Los modelos de turbulencia han sido específicamente desarrollados para considerar los efectos de turbulencia sin tener que recurrir a una malla excesivamente fina y DNS. La mayoría de los modelos de turbulencia son estadísticos con excepción de los modelos LES y DES<sup>10</sup>.

#### 2.1.2.2 Modelos de turbulencia estadísticos y los problemas de encerramiento

Como se mencionó anteriormente, el flujo turbulento presenta un comportamiento irregular y aleatorio en el tiempo y el espacio. Sin embargo, al observar escalas de tiempo mucho mayores que las escalas de las fluctuaciones turbulentas, se puede observar que las propiedades se componen de un valor medio y uno fluctuante que varía con el tiempo.

Es por ello que en vez de gastar tiempo y esfuerzo en soluciones exactas (o casi exactas) de las ecuaciones de conservación, los modelos de turbulencia estadísticos buscan modificar las ecuaciones de conservación mediante la introducción de valores promedio y fluctuantes. Para ello se utilizan procedimientos de descomposición de las ecuaciones de conservación como son las medias de Reynolds y de Favre.

La media de Reynolds, es el procedimiento clásico de descomposición de las ecuaciones de transporte, que utiliza la definición de operador valor medio de una propiedad de flujo,  $Q(\vec{x}, t)$ ,

$$\overline{Q(\vec{x}, t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} Q(\vec{x}, t) dt \quad (2.13)$$

la fluctuación en torno de la media es dada por:

$$Q'(\vec{x}, t) = Q(\vec{x}, t) - \overline{Q(\vec{x}, t)} \quad (2.14)$$

---

<sup>10</sup> Large Eddy Simulation y Detached Eddy Simulation respectivamente, son considerados una excepción ya que a pesar de ser modelos, demandan una gran potencia de cálculo.

El procedimiento de descomposición de Reynolds es fácil y sencillo, sin embargo, presenta algunas desventajas importantes. En flujos turbulentos, la aplicación directa de la media Reynolds a las ecuaciones de transporte resulta en términos de fluctuación de la densidad,  $\overline{\rho' u'_i}$ . Por lo general, se hace el supuesto de que todos los términos que involucren el término fluctuación de densidad son despreciables, con el fin de hacer que las ecuaciones sean más sencillas y para evitar la introducción de demasiadas incógnitas. Mientras que esto puede ser aceptable en algunos de los casos más simples (por ejemplo flujo incompresible), en un campo de flujo turbulento de combustión las variaciones de densidad son significativas. Esto indica que otro tipo de procedimiento debe ser utilizado en estos y otros casos similares.

Para evitar el tratamiento de tales correlaciones, se utiliza la media de Favre o método de media ponderada de masas. Este procedimiento implica que las variables de flujo, excepto para la presión y la densidad, se promedian como la suma de una media y un término fluctuante de manera que para una propiedad de flujo  $Q$ ,

$$Q(\vec{x}, t) = \tilde{Q}(t) + Q''(\vec{x}, t) = \frac{\overline{\rho Q}}{\bar{\rho}} + Q'' \quad (2.15)$$

Donde la fluctuación en torno de una propiedad media de Favre es  $Q'' = Q - \tilde{Q}$ .

Así el tratamiento estadístico de la media de Favre, cuando es aplicado a las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía (en términos de entalpía total), lleva a un conjunto de ecuaciones de transporte que, definido en el referencial Euleriano, en estado estacionario y en notación de índices, es dado por las siguientes expresiones,

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] - \frac{\partial \overline{\rho u''_j u''_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i$$

(2.17)

$$i = 1, 2, 3$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_{tot}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \tilde{h}_{tot}}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial \overline{\rho u''_j h''_{tot}}}{\partial x_j} + \bar{S}_r \quad (2.18)$$

Donde  $Pr$  es el número de Prandtl, el cual representa la razón entre el transporte molecular de cantidad de movimiento.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (2.19)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\mu$  es la viscosidad dinámica,  $c_p$  es el calor específico a presión constante y  $\lambda$  es el coeficiente de transferencia de calor por conducción.

En el conjunto de ecuaciones (2.16) - (2.18), las magnitudes  $\tilde{u}_i$  y  $\tilde{h}_t$ , representan a la media (Favre) del campo de velocidades y la entalpía total. En la ecuación 2.18), la energía debido a las fuerzas viscosas no se toma en cuenta, ya que representa un valor insignificante en comparación de los demás procesos de difusión y generación. Además de eso, las ecuaciones (2.16) - (2.18) son válidas sólo para el flujo subsónico con bajo número de Mach,  $Ma = u/c \ll 1$ , Por lo tanto, la energía asociada variación temporal de presión también fue omitida.

Los términos derechos de las expresiones (2.17) y (2.18) representan:

- $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right]$  y  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \tilde{h}_t}{\partial x_j} \right]$  representan los divergentes de (i) tensor de fuerzas viscosas de flujo medio y (ii) flujo difusivo de la entalpía total media, los cuales representan el transporte difusivo molecular de la cantidad de movimiento y energía.
- $\frac{\partial \overline{\rho u''_j u''_i}}{\partial x_j}$  y  $\frac{\partial \overline{\rho u''_j h''_t}}{\partial x_j}$  corresponden al transporte turbulento de (i) la cantidad de movimiento, (ii) de fracciones másicas de especies químicas y (iii) de energía. Estos términos son mayores en comparación a los escritos anteriormente.
- $\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}$  representa el gradiente de presión.
- $\bar{\rho} g_i$  representa las fuerzas de cuerpo
- $\bar{S}_r$  corresponde al término fuente de radiación.

El uso de la media de Reynolds y la media de Favre reduce, significativamente, el costo computacional en comparación con la DNS. Sin embargo, el uso de estos métodos introduce términos desconocidos adicionales, lo que origina un conjunto de ecuaciones no cerradas, es decir origina un problema de encerramiento.

El objetivo del modelado en flujos turbulentos es proponer aproximaciones para estos términos desconocidos (o abiertos) mediante la introducción de ecuaciones adicionales con variables conocidas, con el fin de obtener un sistema cerrado de ecuaciones. Las ecuaciones adicionales utilizadas son las que definen el tipo de modelo de turbulencia empleado. Estos términos son:

Las tensiones de Reynolds,  $-\overline{\rho u''_i u''_j}$  y de la entalpía total,  $-\overline{\rho u''_i h''_t}$ . La mayoría de trabajos de combustión emplean modelos de turbulencia simple y desenvueltos para flujos turbulentos no reactivos, tales como el modelo  $k - \epsilon$  o  $k - \omega$ , para describir los tensores de Reynolds. Los flujos turbulentos son, frecuentemente, cerrados mediante la utilización de la hipótesis de Boussinesq.

El divergente del flujo de calor de la energía térmica por radiación,  $\overline{S_r} = -d\overline{q_r}/dx_i$ , se obtiene a partir de la Ecuación de Transferencia Radiante [Radiative Transfer Equation, RTE] o mediante la aplicación de modelos que la simplifican, tal y como es el caso del Modelo de Rosseland.

### 2.1.2.3 Modelo de turbulencia utilizado

El modelo adoptado en este estudio son los descritos a continuación:

#### Modelo k- $\omega$

Una de las ventajas de la formulación k- $\omega$  es el tratamiento de capa límite para los cálculos de números de Reynolds bajos. El modelo no involucra las complejas funciones no lineales de amortiguación requeridas para el modelo k- $\epsilon$  y, por tanto es más exacto y más robusto.

Los modelos k- $\omega$  asumen que la viscosidad turbulenta se relaciona con la energía cinética turbulenta y la frecuencia turbulenta mediante la relación:

$$\omega = \frac{k}{v_T} \quad (2.20)$$

Donde  $v_T$  es la viscosidad cinemática turbulenta.

El punto de origen de la presente formulación es el modelo k- $\omega$  padrón desarrollado por Wilcox (1988). Esta formulación resuelve dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta,  $\tilde{k}$ , y otra para la frecuencia turbulenta,  $\omega$ .

El modelo original ha cambiado con el pasar de los años con la adición de términos en la ecuaciones de  $\tilde{k}$  y  $\omega$ , lo que resultó un modelo con mejor precisión para predecir el flujo turbulento.

De esta manera, la ecuación de la energía cinética turbulenta es:

$$\frac{\partial \tilde{k}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{k} u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right] + \mathcal{P} - \beta' \rho k \omega \quad (2.21)$$

Donde:

–  $\frac{\partial \tilde{k}}{\partial t}$ : es el transporte transitorio de la energía cinética turbulenta

- $\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{k}}{\partial x_j}$ : es el transporte convectivo de la energía cinética turbulenta debido a la velocidad media del flujo.
- $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right]$ : es el transporte difusivo (laminar y turbulento) de la energía cinética turbulenta.
- $\beta' \rho k \omega$ : término de destrucción de la energía cinética turbulenta.
- $\mathcal{P}$ : término de producción de energía cinética turbulenta debido a las fuerzas viscosas.

Y la ecuación de la frecuencia turbulenta es:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \omega}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} \mathcal{P} - \beta \rho \omega^2 \quad (2.22)$$

Donde

- $\alpha \frac{\omega}{k} \mathcal{P}$ : término de producción de la frecuencia turbulenta
- $\beta \rho \omega^2$ : término de destrucción de la frecuencia turbulenta

Donde las constantes del modelo k-  $\omega$  son:

- $\beta'$ : 0.09
- $\alpha$ : 5/9
- $\beta$ : 0.075
- $\sigma_k$ : 2
- $\sigma_\omega$ : 2

El término desconocido de las tensiones de Reynolds,  $-\overline{\rho u''_i u''_j}$ , se calcula mediante la hipótesis de Boussinesq, que relaciona las tensiones de Reynolds y la tasa de deformación media del flujo a través de la siguiente expresión,

$$-\overline{\rho u''_i u''_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \left( \bar{\rho} \tilde{k} + \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.23)$$

Donde la viscosidad turbulenta,  $\mu_t$ , es dada por la relación de Prandtl-Kolmogorov,

$$\mu_t = C_\mu \frac{\bar{\rho} \tilde{k}^2}{\tilde{\epsilon}} \quad (2.24)$$

siendo que,

$$\tilde{k} = \frac{1}{2} \overline{u''_i u''_i} = \frac{1}{2} (\overline{u''^2} + \overline{v''^2} + \overline{w''^2}) \quad (2.25)$$

es la energía cinética turbulenta,  $C_\mu$ , el factor empírico,  $\tilde{\epsilon}$  es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta. Nótese que la Ecuación (2.24) involucra una nueva

incógnita,  $\tilde{\epsilon}$ , denominada tasa de disipación turbulenta, cuyo valor se encuentra a través de la ecuación de tasa de disipación turbulenta del modelo k- $\epsilon$ :

Los flujos turbulentos de la entalpía total  $-\overline{\rho u''_i h''_t}$  son determinados mediante el empleo de hipótesis similar a la de Boussinesq,

$$\overline{-\rho u''_i h''_t} = \frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial \widetilde{h''_t}}{\partial x_j} \quad (2.26)$$

Donde  $\sigma_h$  es el número Prandtl turbulento.

## 2.2 Fundamentos de transferencia de calor <sup>11</sup>

El calor es la forma de energía que se trasfiere de un sistema a otro como consecuencia de una diferencia de temperatura. La ciencia que trata la tasa, velocidad o razón de transmisión de aquella cantidad de energía térmica es la Transferencia de calor.

La transferencia de calor se desarrolla siempre desde un medio a una determinada temperatura hacia otro con una temperatura menor y se detiene cuando ambos alcanzan una misma temperatura. Además, el calor se puede transferir por medio de tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

### 2.2.1 Conducción

Es la transferencia de energía de las partículas con mayor energía en una sustancia hacia las adyacentes, con menor energía, como resultado de la interacción entre ellas. Las interacciones pueden ser por colisiones o difusión en fluidos o por vibraciones en sólidos.

La tasa de transferencia de calor depende de la configuración geométrica del medio, es proporcional a la diferencia de temperatura a través de éste y a su área de transferencia de calor<sup>12</sup> A, pero es inversamente proporcional a su espesor. A esta relación se le conoce como ley de Fourier de la conducción de calor:

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda A \frac{dT}{dx} [W] \quad (2.27)$$

Donde la constante de proporcionalidad  $\lambda$  es conocida como conductividad térmica y es un parámetro característico del material que mide su capacidad para conducir calor y se define como la tasa de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. Es una medida de la capacidad del material para conducir calor, y varía según la temperatura del cuerpo, dependiendo si es sólido, líquido o un gas.

<sup>11</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [14] a la [23].

<sup>12</sup> Área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor.

### 2.2.2 Convección

En este mecanismo se combinan los efectos de la conducción con los efectos de un movimiento masivo de fluido. Es decir, la energía se transfiere desde una superficie sólida a la capa adyacente de fluido por conducción, y es transferida con mayor velocidad entre las partículas fluidas debido al movimiento aleatorio de ellas.

La convección puede desarrollarse de manera natural cuando el movimiento del fluido se debe a la diferencia de densidades causada por la diferencia de temperaturas a través de él. Por otro lado, la convección puede ser forzada si el flujo de fluido es provocado por la acción de una bomba o un ventilador.

La tasa de transferencia de calor a través de un área  $A$ , se determina por el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , el cual no es una propiedad del fluido, sino que es un parámetro establecido experimentalmente y depende de la configuración geométrica de la superficie, de la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste, y de su velocidad.

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_{\infty}) \quad [W] \quad (2.28)$$

Donde  $T_s$  es la temperatura de la superficie sólida, y  $T_{\infty}$  es la temperatura del fluido a una distancia lejana de la interfase de contacto.

### 2.2.3 Radiación

Es la energía emitida en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) debido a la temperatura de un cuerpo. Este mecanismo no requiere la presencia de un medio de transferencia.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los cuerpos emiten radiación en diversos grados. La tasa de transferencia de calor por radiación depende de la emisividad  $\epsilon$  del cuerpo, del área  $A$  y de las temperaturas absolutas de dicho cuerpo y de los alrededores:

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon\sigma A(T_s^4 - T_{alred}^4) \quad [W] \quad (2.29)$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ), que es la máxima razón de radiación que puede emitir un cuerpo idealizado, llamado cuerpo negro; por lo tanto, la emisividad es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual dicha emisividad tiene un valor de 1.

El mecanismo de radiación también depende de la absorptividad  $\alpha$  que es la fracción de la radiación que puede absorber una superficie. Un cuerpo negro, además de ser emisor perfecto, es un absorbente perfecto ( $\alpha=1$ ).

Ambas propiedades, emisividad y absorptividad, dependen de la temperatura y la longitud de onda de la radiación.

A continuación se define la Ecuación de Transferencia Radiante, la cual necesita del conocimiento de las propiedades radiantes de los gases producto de la combustión.

### 2.2.3.1 Ecuación de transferencia radiante

La meta del modelado en radiación es resolver la Ecuación de Transferencia Radiante, obtener el término fuente de radiación,  $S_r$ , para la ecuación de la energía, y el flujo de calor radiante en las paredes, entre otras cantidades de interés. En la mayoría de casos se debe restringir la ecuación para procesos de radiación independientes del tiempo. Esto es normalmente una muy buena aproximación en aplicaciones industriales.

La Ecuación de Transferencia Radiante en forma espectral (Spectral Radiative Transfer Equation, s-RTE), puede ser escrita como<sup>13</sup>:

$$\frac{dI_v(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -(K_a + K_s)I_v(\vec{r}, \vec{s}) + K_a I_b(\nu, T) + \frac{K_s}{4\pi} \int_{4\pi} dI_v(r, s') \phi(s \cdot s') d\Omega' + S_r \quad (2.30)$$

Donde:

- $I_v(\vec{r}, \vec{s})$ : es la intensidad de energía radiante espectral a una localización dada que es indicada por el vector posición  $\vec{r}$  en la dirección  $\vec{s}$ .
- $I_b(\nu, T)$ : es la intensidad de radiación espectral emitida por un cuerpo negro a una frecuencia  $\nu$  y temperatura absoluta  $T$  específicas.
- $K_a$ : es el coeficiente de absorción espectral del medio participante.
- $K_s$ : es el coeficiente de dispersión espectral del medio participante.
- $\phi$ : es la función de fase en dispersión.
- $\Omega$ : es el ángulo sólido.
- $S_r$ : es el término fuente de intensidad de radiación.

En el caso de ausencia de dispersión radiante, la Ecuación de Transferencia Radiante se transforma en:

$$\frac{dI_v(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -(K_a)I_v(\vec{r}, \vec{s}) + K_a I_b(\nu, T) \quad (2.31)$$

Teniendo en cuenta el modelo espectral gris y la ley de Stefan-Boltzmann que establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total proporcional a la cuarta potencia de su temperatura que establece que un cuerpo negro y que el espectro de radiación emitida por un cuerpo negro es igual a  $\pi$  por su intensidad de radiación espectral, la ecuación (2.31) puede ser simplificada para,

$$\frac{dI_v(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -K_a[I_v(\vec{r}, \vec{s}) - I_b(\nu, T)] = -K_a I_v(\vec{r}, \vec{s}) + K_a \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} \quad (2.32)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción y  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann.

Esta es la ecuación de transporte radiante que la mayoría de los códigos comerciales (por ejemplo, ANSYS Fluent<sup>TM</sup> y ANSYS CFX<sup>TM</sup>) resuelve.

---

<sup>13</sup> Referencia [12].

La s-RTE es una ecuación de primer orden integro diferencial para  $I_v$  en una dirección fija,  $s$ . Por lo tanto, para resolver esta ecuación en un dominio, se necesita una condición de contorno para  $I_v$ . La siguiente es una condición de contorno actualmente implementada en ANSYS CFX:

$$I(\vec{r}_w, \vec{s}) = \epsilon_v(\vec{r}_w) \frac{n^2 \sigma T_P^4}{\pi} + \frac{\rho_w(\vec{r}_w)}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \vec{s}' < 0} I(\vec{r}_w, \vec{s}') |\vec{n} \cdot \vec{s}'| d\Omega' \quad (2.33)$$

La ecuación (2.33) solo es válida para paredes opacas que emiten y reflejan radiación de forma difusa.

Donde  $I(\vec{r}_w, \vec{s})$  es la intensidad de radiación en la pared,  $\epsilon_v$  es la emisividad (relación entre la radiación emitida por un cuerpo a una dada temperatura y la radiación emitida por un cuerpo negro de la misma forma y temperatura) de la pared y  $\rho_w$  es la reflectividad de la pared, que en el caso de superficie con transividad nula, es igual a  $(1 - \epsilon_w)$ .

Al resolverse la ecuación (2.32), es posible obtener el flujo de calor por radiación normal a una superficie,  $q_r$ , pues éste se relaciona con la intensidad de radiación total mediante  $dq_r = d(\vec{q}_r \cdot \vec{n}) = I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega' = I(\vec{r}, \vec{s}) \cos \theta d\Omega'$  (donde  $\theta$  es el ángulo polar del hemisferio). La integración, sobre la esfera unitaria, proporciona el flujo total del calor por radiación normal a una superficie de vector unitario  $\vec{n}$ , de tal forma que:

$$q_r = \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega' \quad [J/kg] \quad (2.34)$$

El término fuente por radiación,  $\bar{S}_r$  presente en la ecuación (2.18) es expresa como función de la radiación incidente total,  $G$ , a través de la siguiente expresión,

$$\bar{S}_r = -\nabla \cdot \vec{q}_r \equiv \bar{K}_a \bar{G} - 4\bar{K}_a \sigma \bar{T}^4 \quad (2.35)$$

Esta relación es válida solamente en las situaciones en que pueden ser omitidas las correlaciones entre fluctuaciones de temperatura, índice de refracción y coeficiente de absorción entre intensidad de radiación.

La RTE, en su forma espectral [ecuación (2.30)], es una ecuación difícil de resolver. De hecho para calcular la radiación térmica, son necesarios algoritmos que resuelvan la ecuación de transferencia radiante como función de las coordenadas cartesianas y angulares y además se debe considerar la complejidad de las propiedades radiantes del medio participante, que son funciones de la frecuencia. En otras palabras, el modelo de radiación envuelve la disponibilidad de métodos analíticos/numéricos para resolver la ecuación de transferencia radiante y, la determinación de las propiedades radiantes del medio participante.

### 2.2.3.2 Modelo de radiación P-1

A lo largo del tiempo, diversos métodos fueron desenvueltos para resolver la Ecuación de Transporte Radiante. Estos incluyen diversas aproximaciones analíticas, así como métodos numéricos. A seguir, serán descritas las formulaciones del modelo de radiación P-1, el cual será utilizado en las simulaciones.

El modelo P-N es una aproximación analítica basada en el método de esféricos armónicos que transforma la ecuación de transporte de la intensidad de la radiación en un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales acopladas y de esta manera permite determinar una solución aproximada de alto orden de precisión. El modelo fue propuesto por primera vez por Jeans [19] en su trabajo sobre transferencia de radiación en las estrellas. Una descripción más detallada del método puede encontrarse en los libros por Kourganoff [20], Davison [21], y Murray [22]. Actualmente, este modelo de radiación es frecuentemente aplicado para describir la radiación térmica en equipamientos de combustión de porte industrial, pues el medio participante (gases productos de la combustión y hollín) usualmente presenta grandes espesuras ópticas, esto es,  $aL_m \gg 1$ .

La aproximación diferencial o P1 es el más simple de la familia P-N y es una simplificación de la ecuación de transporte de radiación, que asume que la intensidad de radiación es isotrópica o independiente de la dirección en una ubicación dada en el espacio. La forma completa del modelo P1 puede ser encontrada en Modest [16].

La solución del modelo de radiación P-1 se basa en la expansión de la intensidad de radiación,  $I(\vec{r}, \vec{s})$ , sobre los cuatro primeros términos de la serie ortogonal de esféricos armónicos. Esto resulta en una ecuación en la cual el flujo de calor radiante es proporcional al gradiente de radiación incidente, de manera que:

$$\vec{q}_r = -\Gamma \nabla G \quad (2.36)$$

$$\vec{q}_r = -\frac{1}{3(K_a - K_s) - AK_s} \nabla G \quad (2.37)$$

Asumiendo que no hay dispersión, la ecuación (2.37) se transforma en:

$$\vec{q}_r = -\frac{1}{3K_a} \nabla G \quad (2.38)$$

Donde:

$K_a$ : Coeficiente de absorción.

$K_s$ : Coeficiente de dispersión.

A: Coeficiente de anisotropía.

En este caso,  $\Gamma$  depende de las propiedades radiantes del medio, esto es, de los coeficientes de absorción y dispersión de la anisotropía.

El modelo P-1 tiene baja exactitud, en particular, cuando la espesura óptica es pequeña. Además de eso, este modelo prescribe una reflexión de la radiación incidente acontece en todas las direcciones del ángulo sólido. Sin embargo, por su fácil implementación y capacidad de llevar en cuenta la radiación espectral así como la propagación global anisótropa, se ha decidido utilizar este modelo en las simulaciones.

### 2.2.3.3 Modelo de propiedades radiantes de los gases productos de combustión

La precisión en el modelo y simulación de los procesos de transferencia de energía por radiación en sistemas de combustión depende de dos características principales: el orden de precisión del método de solución de las ecuaciones de transferencia de calor por radiación y la exactitud de las propiedades radiantes del medio participante.

La absorción y emisión radiante de un gas puede ser caracterizada por la emisividad como función de la temperatura y  $pL$ , que es el producto de la presión parcial del gas y la extensión de trayectoria. En el contexto de sistemas de combustión típicos, los emisores y absorbedores dominantes de radiación son el dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , y el vapor de agua,  $\text{H}_2\text{O}$ , (pese a que los hidrocarburos,  $\text{CO}$  y  $\text{SO}_2$  también tienen una menor contribución) los cuales al mismo tiempo no dispersan radiación de manera significativa.

Existen varios modelos espectrales para las propiedades radiantes de estos gases como, por ejemplo, el modelo gris, el cual asume que todas las propiedades radiantes son uniformes a través de todo el espectro y en consecuencia la intensidad de radiación es la misma para todas las frecuencias. Sin embargo, el hacer esto puede llevar a errores considerables en el cálculo de la radiación térmica, sobre todo, en situaciones donde la espesura óptica es muy fina. Por este motivo, es importante considerar la dependencia espectral de las propiedades radiantes en la ecuación de transporte de intensidad de radiación para la correcta predicción de los procesos de intercambio de energía térmica por radiación.

Entre los modelos que consideran una variación de las propiedades radiantes de los gases a lo largo del espectro de frecuencias se puede mencionar el Modelo Multibanda y el Modelo de Suma Ponderada de los Gases Grises [Weighted Sum of Gray Gases Model, WSGGM].

Desafortunadamente, la consideración de la variación espectral de las propiedades de radiación tiende a incrementar considerablemente la dificultad de un problema ya de por sí difícil, o al menos hacer que su solución numérica demande más recursos computacionales.

### 2.2.3.4 Modelos de suma ponderada de los gases grises, WSGGM<sup>14</sup>

El concepto de la aproximación de suma ponderada de gases de grises se presentó por primera vez por Hottel y Sarofim (1967) [18] en el marco del método zonal. El método se puede aplicar a geometrías arbitrarias con diferentes coeficientes de absorción, pero se limita a medios sin dispersión y confinados dentro de un recinto de paredes negras. Este enfoque se puede aplicar a la ecuación direccional de la transferencia de calor, por lo tanto, a cualquier método de solución para la ecuación de transferencia (exacta, la aproximación P-N, el método de ordenadas discretas, etc.) como se demuestra en [16]. En este método el gas no gris se sustituye por una serie de gases grises, para los que las tasas de transferencia de calor se calculan de forma independiente. El flujo total se encuentra a continuación mediante la adición de los flujos de los gases de grises después de ser multiplicados con ciertos factores de peso.

---

<sup>14</sup> Este apartado se ha elaborado en base a la referencia [1] y [17].

El WSGGM postula que la emisividad total,  $\epsilon_T$  a lo largo del camino óptico del conjunto es dada por,

$$\epsilon_T = \sum_{i=0}^I a_{\epsilon,i}(T) [1 - e^{-k_i p L}] \quad (2.39)$$

Donde  $a_{\epsilon,i}(T)$  es el factor peso de la emisividad (relación entre la radiación emitida por un cuerpo a una dada temperatura y la radiación emitida por un cuerpo negro de la misma forma y temperatura) del  $i$ -ésimo gas gris (ficticio),  $k_i$  es el coeficiente de absorción correspondiente,  $p$  es la presión parcial de todos los gases participantes y  $L$  es la extensión de la trayectoria también llamada de longitud media del conjunto.

Como la emisividad debe ser proporcional a la absorptividad por la Ley de Kirchoff,  $\epsilon_T$ , debe aproximarse a la unidad a medida que  $pL$  tiende a infinito. Esto impone una restricción en el peso o amplitudes de los gases grises:

$$\sum_{i=0}^{N_g} a_{\epsilon,i}(T) = 1 \quad (2.40)$$

Además, el requisito de que  $\epsilon_T$  es una función monótona creciente de  $pL$  se satisface si todos los  $a_{\epsilon,i}$  son positivos.

Donde el coeficiente de absorción para  $i = 0$ ,  $k_0$ , es asumido nulo. Esto, para llevar en cuenta las ventanas de espectro que existen entre las regiones de longitud de onda de elevada absorción  $\left(\sum_{i=1}^{N_g} a_{\epsilon,i}(T) < 1\right)$  Así, el factor peso para  $i = 0$  es:

$$a_{\epsilon,0}(T) = 1 - \sum_{i=1}^{N_g} a_{\epsilon,i}(T) \quad (2.41)$$

La dependencia del factor peso para el  $i$ -ésimo gas gris,  $a_{\epsilon,i}(T)$ , con la temperatura es representada por una función polinomial,

$$a_{\epsilon,i}(T) = \sum_{j=0}^I b_{\epsilon,ij} T^{j-1} \quad (2.42)$$

Donde  $b_{\epsilon,ij}$  corresponde a los  $j$ -ésimo coeficiente polinomial del  $i$ -ésimo gas gris. Tanto  $b_{\epsilon,ij}$  como  $k_i$  son estimados a partir de datos experimentales.

Una vez que la dependencia de  $k_i$  es  $a_{\epsilon,i}(T)$ , como la composición es débil, sus valores pueden ser asumidos como constantes. Jovani et al. [23] emplearon funciones polinomiales de tercer orden en la temperatura, para calcular los factores peso,  $a_{\epsilon,i}(T)$ . La Tabla 3 presenta los valores propuestos por Jovani et al. [23], de los coeficientes  $b_{\epsilon,ij}$  y  $k_i$ , los que serán utilizados en las simulaciones de la presente tesis.

Estos valores fueron previamente validados para  $0.01 < pL_m < 10 \text{ atm.m}$  y  $600 < T < 2400\text{K}$

Tabla 3. Coeficientes polinomiales de Jovani et al. utilizados en el modelo WSGGM.

$$p_{H_2O}/p_{CO_2} = 2.0$$

| i | ki[m <sup>-1</sup> atm <sup>-1</sup> ] | $b_{\epsilon,i,1}$   | $b_{\epsilon,i,2}[K^{-1}]$ | $b_{\epsilon,i,3}[K^{-2}]$ | $b_{\epsilon,i,4}[K^{-3}]$ | $b_{\epsilon,i,4}[K^{-4}]$ |
|---|----------------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0.187                                  | 7.20x10              | 8.72x10 <sup>-1</sup>      | -9.69x10 <sup>-4</sup>     | 4.65x10 <sup>-7</sup>      | -7.92x10 <sup>-11</sup>    |
| 2 | 1.723                                  | 1.11x10 <sup>2</sup> | 3.40 x10 <sup>-1</sup>     | -2.47x10 <sup>-4</sup>     | 4.65x10 <sup>-8</sup>      | -1.04x10 <sup>-12</sup>    |
| 3 | 12.484                                 | 2.09x10 <sup>2</sup> | -6.42x10 <sup>-2</sup>     | -3.20x10 <sup>-5</sup>     | 1.72 x10 <sup>-8</sup>     | -2.11 x10 <sup>-12</sup>   |
| 4 | 144.938                                | 7.09 x10             | 6.59 x10 <sup>-2</sup>     | -1.28x10 <sup>-4</sup>     | 5.58 x10 <sup>-8</sup>     | -7.71 x10 <sup>-12</sup>   |

$$p_{H_2O}/p_{CO_2} = 1.0$$

| i | ki[m <sup>-1</sup> atm <sup>-1</sup> ] | $b_{\epsilon,i,1}$    | $b_{\epsilon,i,2}[K^{-1}]$ | $b_{\epsilon,i,3}[K^{-2}]$ | $b_{\epsilon,i,4}[K^{-3}]$ | $b_{\epsilon,i,4}[K^{-4}]$ |
|---|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0.192                                  | 5.62x10               | 7.84 x10 <sup>-1</sup>     | -8.56x10 <sup>-4</sup>     | 4.25 x10 <sup>-7</sup>     | -7.44 x10 <sup>-11</sup>   |
| 2 | 1.719                                  | 1.43 x10 <sup>2</sup> | 1.80 x10 <sup>-1</sup>     | -1.08x10 <sup>-5</sup>     | -6.97x10 <sup>-8</sup>     | 1.77 x10 <sup>-11</sup>    |
| 3 | 11.370                                 | 1.36 x10 <sup>2</sup> | 2.57 x10 <sup>-1</sup>     | -3.71x10 <sup>-4</sup>     | 1.58 x10 <sup>-7</sup>     | -2.27 x10 <sup>-11</sup>   |
| 4 | 111.016                                | 1.22 x10 <sup>2</sup> | -2.33x10 <sup>-2</sup>     | -7.49x10 <sup>-5</sup>     | 4.28 x10 <sup>-8</sup>     | -6.61 x10 <sup>-12</sup>   |

Fuente: New coefficients of the weighted-sum-of-gray-gases model using hitemp 2010 database [23].

Una vez que la emisividad total es determinada por la ecuación (2.39), el coeficiente de absorción global,  $a_g$ , de la mezcla CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, gases productos de la combustión, es

$$a_g = -\frac{1}{L_m} \ln(1 - \epsilon_T) \quad (2.43)$$

Cuyo valor,  $a = a_g$  (para  $a_{soot} = 0$ ) se usa en la ecuación de transporte radiante [ecuación (2.31)].

### 2.3 Fundamentos de resistencia de materiales<sup>15</sup>

La resistencia de materiales estudia y establece relaciones entre las cargas exteriores aplicadas y sus efectos en el interior de los sólidos. Al contrario de la mecánica, no supone que los sólidos son idealmente indeformables, sino que las deformaciones por más pequeñas que sean, tienen gran interés. Las propiedades del material de que se construye una máquina o estructura afectan tanto su elección como diseño, ya que deben satisfacer ciertas condiciones de resistencia y rigidez.

La falla de un componente de una estructura puede ocurrir de diversas formas:

1. El material del componente puede fracturarse totalmente.
2. El material puede deformarse en exceso bajo la carga, de tal manera que el componente ya no sea conveniente para su propósito.
3. La estructura puede hacerse inestable y pandearse, y, por lo tanto, volverse incapaz de soportar las cargas para las que se diseñó.

Es por ello que, el objetivo de cualquier análisis de resistencia es establecer la seguridad. Lograr esto requiere que el esfuerzo y/o deformaciones que se produzca en el material del miembro que se analiza este por debajo de un cierto nivel de seguridad.

<sup>15</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [24] a la [29].

### 2.3.1 Concepto de esfuerzo

Entender el significado de esfuerzo en un miembro que soporta carga es de mayor importancia en el estudio de resistencia de materiales. Esfuerzo es la resistencia interna que ofrece un área unitaria del material del que está hecho un miembro para una carga externa aplicada. Es de gran interés comprender lo que sucede dentro de un miembro que soporta una carga. Se debe determinar la magnitud de la fuerza que se ejerce sobre cada área unitaria del material.

Si la carga aplicada tiene dirección normal al plano que la resiste, se produce un esfuerzo normal, que puede ser de tracción o de compresión. El concepto de esfuerzo normal puede expresarse matemáticamente como:

$$\sigma = F/A \quad [\text{N}/\text{m}^2] \quad (2.44)$$

En algunos casos se trata del esfuerzo normal directo, la fuerza aplicada se reparte uniformemente en la totalidad de la sección transversal del miembro. En estos casos, el esfuerzo puede calcularse con la simple división de la fuerza total por el área de la parte que resiste la fuerza. Entonces, el nivel de esfuerzo será el mismo en un punto cualquiera de una sección transversal cualquiera. En otros casos, tal como el esfuerzo debido a flexión<sup>16</sup>, el esfuerzo varía en los distintos lugares de la misma sección transversal. Por lo que es esencial considerar el nivel de esfuerzo en un punto. Por lo general, el objetivo es determinar en qué punto ocurre el esfuerzo máximo, y cuál es su magnitud.

Si la carga aplicada es paralela al plano que la resiste, entonces se produce un esfuerzo cortante o esfuerzo tangencial. El esfuerzo de corte medio viene dado por:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad [\text{N}/\text{m}^2] \quad (2.45)$$

Donde V es la fuerza cortante promedio y A es el área sobre la que se ejerce esa fuerza. Cabe mencionar que el esfuerzo cortante que se ha definido corresponde a un esfuerzo de corte directo. También puede existir un esfuerzo de corte indirecto que aparece en secciones inclinadas con respecto a la resultante de las cargas. Sin embargo, esta fórmula sirve en ambos casos.

### 2.3.2 Concepto de deformación

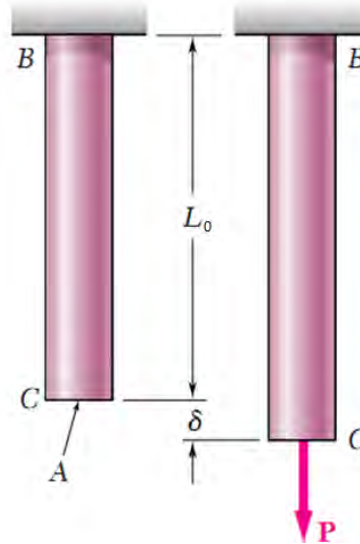
La resistencia de un material no es el único criterio que debe tomarse en cuenta al diseñar una estructura. Por lo general, la rigidez<sup>17</sup> suele tener igual o mayor importancia. En menor grado otras propiedades como la dureza, tenacidad y ductilidad también influyen en la elección del material.

---

<sup>16</sup> Combinación de esfuerzos de compresión y de tensión que actúan en la sección transversal de un elemento que ofrece resistencia a una carga transversal.

<sup>17</sup> Capacidad de un material de resistir la deformación al aplicarle una carga externa.

Cuando se aplica una carga a un cuerpo esta tiende a cambiar la forma y el tamaño del cuerpo. Estos cambios se conocen como deformación, la cual puede ser visible como imperceptible.



**Figura 18. Deformación axial de una barra al aplicar un esfuerzo P.**  
Fuente: Mecánica de Materiales [24].

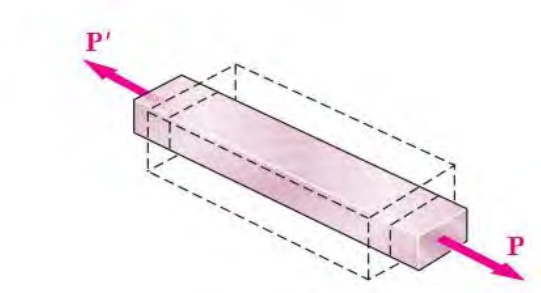
Para una barra de material cargada axialmente, la deformación generada, lo que se conoce como deformación unitaria, se obtiene dividiendo el alargamiento o deformación total entre la longitud original de la barra. La deformación se denota con la letra griega minúscula épsilon (ver figura 18):

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.46)$$

Sin embargo, esta deformación corresponde sólo a un valor medio. Para obtener un valor de deformación unitaria real se deben utilizar todos los valores sucesivos de  $L$  que se registran durante la deformación. Dividiendo cada incremento de distancia  $\Delta L$  de la nueva distancia total  $L$ , se obtiene la deformación unitaria elemental  $\Delta\epsilon = \Delta L/L$ . Sumando los valores sucesivos de  $\Delta\epsilon$  y reemplazando la sumatoria por una integral, se define la deformación unitaria real  $\epsilon_T$ ,

$$\epsilon_T = \sum \Delta\epsilon = \sum \frac{\Delta L}{L} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (2.47)$$

Ahora si bien la barra se deforma axialmente, también sufre una deformación en cualquier dirección transversal (ver figura 19). Para un material homogéneo e isotrópico, esta deformación tiene el mismo valor en cualquier dirección transversal.



**Figura 19. Deformación lateral de una barra al aplicar un esfuerzo P.**  
Fuente: Mecánica de Materiales [24].

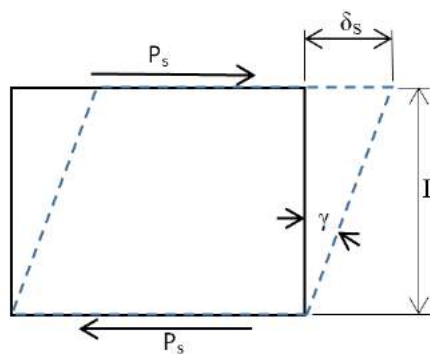
Suponiendo el eje x como el eje en que se aplica la carga axial, se tiene:

$$\epsilon_y = \epsilon_z \quad (2.48)$$

Este valor se conoce como deformación lateral y puede ser determinado utilizando una propiedad importante del material llamada relación de Poisson, que se denota con la letra griega  $\nu$ :

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \quad (2.49)$$

Existe otro tipo de deformación generada por fuerzas cortantes denominada deformación angular o distorsión. A diferencia de los otros tipos de deformaciones, el elemento sometido a una fuerza cortante,  $P_s$ , no varía la longitud de sus lados, manifestándose por el contrario un cambio de forma de la superficie sobre la que se aplica la carga (ver figura 20).



**Figura 20. Deformación angular de una barra al aplicar un esfuerzo  $P_s$ .**  
Fuente: Elaboración propia.

La deformación angular media se obtiene dividiendo  $\delta_s$  entre  $L$ . Sin embargo, como el valor de esta deformación, por lo general, es muy pequeño, se puede aproximar al valor de  $\gamma$ :

$$\epsilon_s = \frac{\delta_s}{L} = \tan \gamma \approx \gamma \quad (2.50)$$

### 2.3.3 Diagrama esfuerzo-deformación

La relación entre el esfuerzo y la deformación en un material dado es una característica importante del material. Para obtener el diagrama de esfuerzo-deformación de un material, comúnmente se lleva a cabo un ensayo o prueba de tensión sobre una probeta estandarizada del material. Los resultados del ensayo deben reportarse de manera que puedan aplicarse a un elemento de cualquier tamaño. Para lograr este objetivo, los datos de la carga y la deformación correspondiente se utilizan para calcular distintos valores de esfuerzo y las correspondientes deformaciones en la probeta. La representación gráfica de los resultados produce una curva llamada diagrama de esfuerzo-deformación.

A continuación se puede observar la gráfica de esfuerzo-deformación para el acero (ver figura 21).

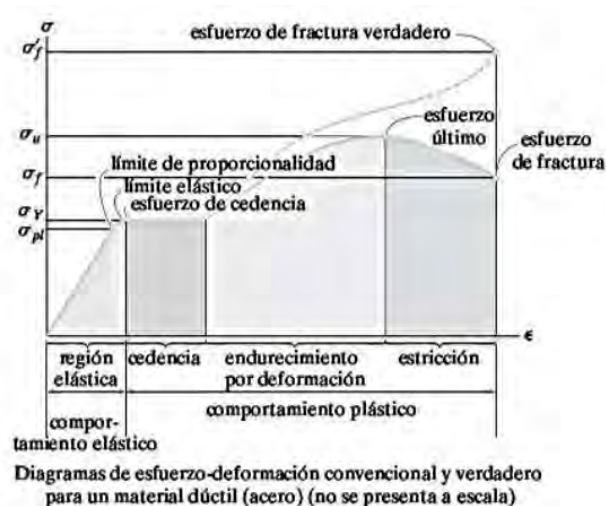


Figura 21. Diagrama esfuerzo-deformación.

Fuente: Mecánica de Materiales [25].

Utilizando esta curva se puede distinguir cuatro formas diferentes del comportamiento del material, en función de la deformación inducida en este:

- **Comportamiento elástico:** En esta área el esfuerzo es proporcional a la deformación del material, es decir el material es elástico lineal. El límite superior del esfuerzo para esta relación lineal se llama límite de proporcionalidad,  $\sigma_{pl}$ . Si el esfuerzo aumenta ligeramente, la recta tiende a curvarse hasta alcanzar el límite elástico. Hasta este punto si la carga se retira, la probeta recupera su longitud inicial. Sin embargo, para algunos materiales, como por ejemplo el acero, este punto no se determina debido a que está muy cerca del límite de proporcionalidad.

- **Fluencia:** un pequeño aumento del esfuerzo por encima del límite elástico ocasionará un rompimiento del material deformándolo permanentemente, esto es denominado fluencia. El esfuerzo que causante recibe el nombre esfuerzo de fluencia,  $\sigma_Y$ , y la deformación que se produce se denomina deformación plástica. Un material que ha alcanzado el punto de fluencia, continuará deformándose sin ningún incremento de carga como se observa en la figura 21.
- **Endurecimiento por deformación:** Al terminar la fluencia, la probeta es capaz de soportar un aumento de carga, lo que origina una curva ascendente hasta llegar a un esfuerzo máximo conocido como esfuerzo último,  $\sigma_U$ .
- **Estricción:** durante el endurecimiento por deformación, el área transversal de la probeta se reduce de forma uniforme. Después de alcanzar el esfuerzo último, el área transversal comienza a disminuir en un área localizada de la probeta. Este comportamiento continúa hasta que la probeta se rompe en el esfuerzo de fractura.

### 2.3.4 Propiedades mecánicas de los materiales

La selección de materiales requiere considerar muchos factores. Por lo general, deben evaluarse la resistencia, rigidez, coeficiente de expansión térmica, densidad, resistencia a la corrosión, facilidad de maquinado, soldabilidad, aspecto, costo y disponibilidad. A continuación se definen algunas propiedades claves en relación a la resistencia de materiales:

#### 2.3.4.1 Esfuerzo de fluencia

El esfuerzo de fluencia,  $\sigma_Y$ , es el valor del esfuerzo en la curva de esfuerzo-deformación, en el que existe un incremento significativo de la deformación, con poco o ningún incremento en el esfuerzo. A partir de este punto, la deformación generada en el material es plástica, es decir el material no regresa a su forma original.

Esta propiedad mecánica es un parámetro muy importante a considerar en el diseño de estructuras y, por lo general, se considera como el máximo esfuerzo permisible ya que se desea que el material se mantenga en la región elástica.

#### 2.3.4.2 Módulo de Young

El módulo de elasticidad o módulo de Young,  $E$ , es una medida de la rigidez de un material, determinado por la pendiente de la recta de la curva de esfuerzo-deformación en la región elástica:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_{el}} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.51)$$

O también

$$\sigma = E \epsilon_{el} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.52)$$

Que no expresa otra cosa que la conocida Ley de Hooke, la cual es válida sólo cuando la carga a la que es sometido el material es menor que el límite de proporcionalidad. La deformación elástica,  $\epsilon_{el}$ , es la diferencia de la deformación total,  $\epsilon$ , y la deformación térmica,  $\epsilon_t$ .

#### 2.3.4.3 Módulo de rigidez

El módulo de elasticidad por cortante o módulo de rigidez es la relación entre el esfuerzo cortante y la deformación por cortante, y está denotado por:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad [N/m^2] \quad (2.53)$$

G es una propiedad del material y se relaciona con el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de la siguiente forma:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad [N/m^2] \quad (2.54)$$

Cabe recalcar que al igual que el módulo de elasticidad, el concepto de módulo de rigidez sólo es válido en la región elástica del comportamiento del material.

#### 2.3.4.4 Esfuerzo último

El esfuerzo último,  $\sigma_u$ , es el máximo valor de esfuerzo en la curva de esfuerzo-deformación después del cual se produce una reducción localizada del área transversal del material. Es una propiedad muy importante en el diseño mecánico ya que se considera que al alcanzar este esfuerzo el material falla.

#### 2.3.4.5 Esfuerzo de fractura

La reducción localizada del material continúa hasta que el elemento se rompe. El valor de este esfuerzo es superior al esfuerzo último si se divide la carga aplicada entre el área transversal real (reducida). Sin embargo, no se utiliza como un parámetro de diseño ya que si bien el esfuerzo que resiste el material es mayor, la carga es mucho menor que la carga en el esfuerzo último.

#### 2.3.5 Deformación térmica

Al someter un cuerpo sólido a una variación de temperatura se presenta también una variación de su volumen como respuesta, este fenómeno es conocido como expansión térmica. Al calentar un cuerpo, se eleva la energía cinética de sus partículas, ocasionando que la separación entre ellas aumente y en consecuencia el cuerpo se expande. Lo contrario ocurre al enfriarlo, disminuye la energía cinética de sus partículas, disminuyendo su separación y originando una contracción del cuerpo.

La deformación lineal de una barra homogénea de longitud L, provocada como consecuencia de un cambio de temperatura viene dada por la expresión:

$$\delta_T = \alpha L_0 (\Delta T) \quad [mm] \quad (2.55)$$

O bien

$$\epsilon_t = \alpha(\Delta T) \quad (2.56)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación lineal que se expresa en  $[\text{mm/m} \cdot ^\circ\text{C}]$  o simplemente  $[\text{ }^\circ\text{C}^{-1}]$ . Este coeficiente depende del material y varía según la temperatura en la que se encuentre el cuerpo.

Cuando un material se dilata, lo hace en todas las direcciones. Sin embargo, si la expansión en un sentido es despreciable se puede establecer que solo hay dilatación en un área o en una dirección lineal, según sea el caso. La dilatación superficial y volumétrica es:

$$\Delta A = \beta A_0(\Delta T) = 2 \alpha A_0(\Delta T) \quad [\text{m}^2] \quad (2.57)$$

$$\Delta V = \gamma V_0(\Delta T) = 3\alpha V_0(\Delta T) \quad [\text{m}^3] \quad (2.58)$$

Donde  $\beta$  y  $\gamma$  son el coeficiente dilatación superficial y volumétrica, respectivamente. Para un material isotrópico, la deformación lineal como consecuencia de la temperatura es la misma en cualquier dirección del sólido, de manera que puede demostrarse que:

$$\beta = 2 \alpha \quad [1/^\circ\text{C}] \quad (2.59)$$

$$\gamma = 3\alpha \quad [1/^\circ\text{C}] \quad (2.60)$$

### 2.3.5.1 Esfuerzos térmicos

Si un cuerpo sometido a un cambio de temperatura presenta restricciones que no le permiten expandirse libremente, entonces la restricción de movimiento origina los llamados esfuerzos térmicos. Para determinar el valor de tales esfuerzos se puede recurrir a la teoría de desplazamientos como en el siguiente ejemplo:

Si se supone que la misma barra se coloca entre dos soportes fijos a una distancia  $L$  uno del otro y se eleva la temperatura en  $\Delta T$ , la barra no podrá alargarse por la restricción de los extremos, por lo tanto, la deformación total de la barra,  $\epsilon$ , es cero. De esta forma, la deformación térmica de la barra generada como consecuencia del cambio de temperatura en el cuerpo,  $\epsilon_t$ , es igual a la deformación como consecuencia de aplicar una fuerza en sentido opuesto a la dilatación (ejercida por los soportes),  $\epsilon_{el}$ , de manera que la deformación final es nula:

$$\epsilon_t = \epsilon_{el} \quad (2.61)$$

$$\alpha L(\Delta T) = \frac{FL}{AE} \quad [\text{m}] \quad (2.62)$$

$$\frac{F}{A} = \sigma_T = \alpha(\Delta T)E \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.63)$$

Debe recordarse que el resultado obtenido aquí y la anterior observación con respecto a la ausencia de deformación alguna en la barra sólo se aplican al caso de una barra homogénea con sección transversal uniforme. Cualquier otro problema que implique una estructura restringida sometida a un cambio de temperatura debe analizarse en las condiciones aplicables. Sin embargo, el mismo enfoque general puede utilizarse, es decir, es posible considerar, en forma separada, la deformación debida al cambio de temperatura y la debida a la reacción redundante y superponer las soluciones obtenidas.

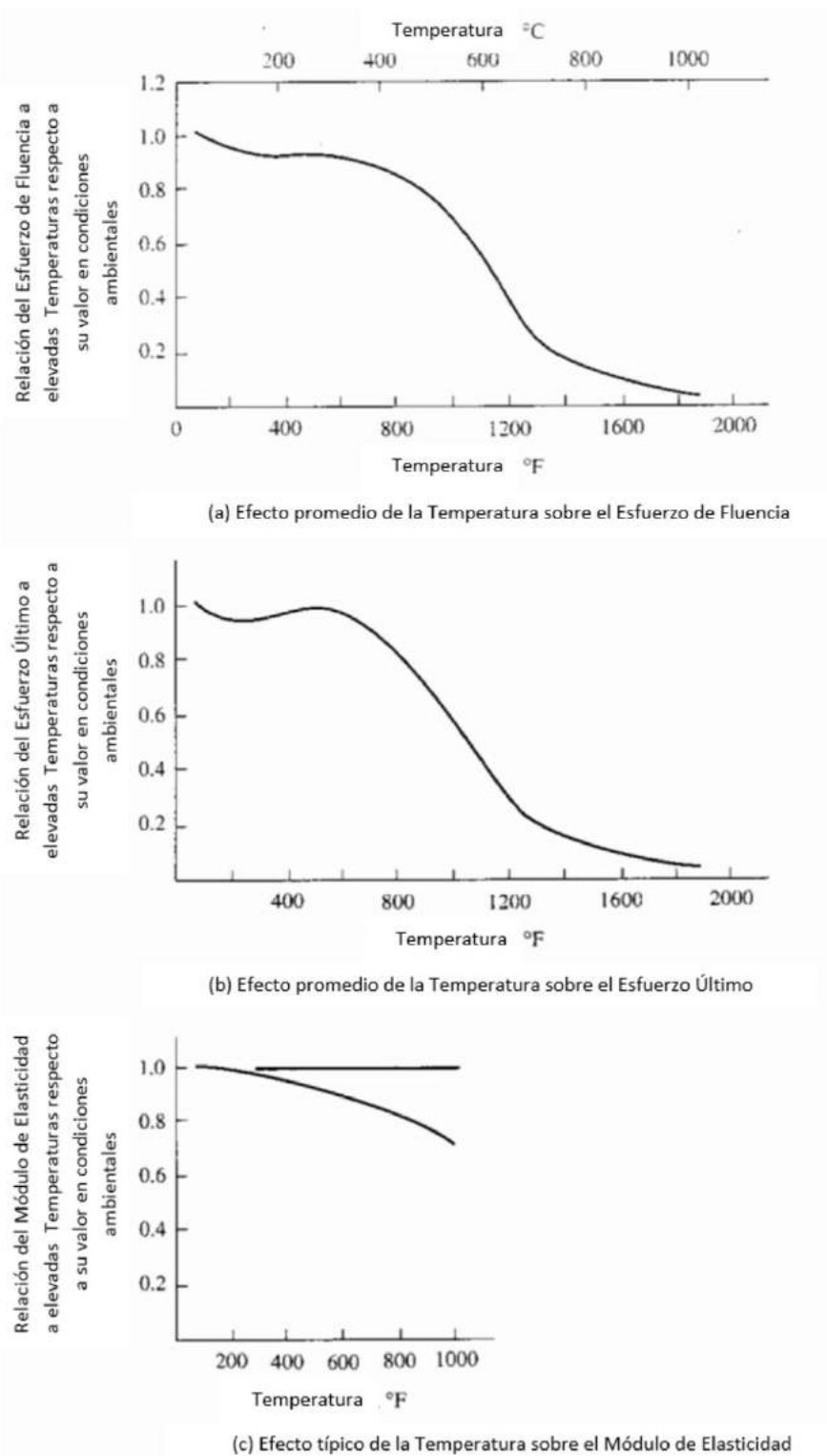
### **2.3.5.2 Comportamiento de los aceros a elevadas temperaturas**

El comportamiento a altas temperaturas, por lo general, no es de importancia al diseñar estructuras que operan a temperatura ambiente. Sin embargo, el conocimiento de dicho comportamiento es deseable cuando se especifican procedimientos de soldadura, y es indispensable para estructuras que operan a temperaturas elevadas.

Cuando la temperatura excede cerca de los 93 °C, la curva esfuerzo-deformación empieza a transformarse en no lineal, gradualmente eliminando el bien definido punto de fluencia. El módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último disminuyen a medida que aumenta la temperatura. El rango de 430 °C a 540 °C es donde la disminución alcanza la máxima velocidad. A pesar de que cada tipo de acero, debido a su diferente composición química y microestructura, se comporta diferente al aumentar la temperatura, las relaciones generales se muestran en la figura 22.

Para el caso del acero estructural A36, utilizado en la construcción de las aletas, perfiles y soportes estructurales de las pailas, se utilizará la figura 22 para determinar sus propiedades a diferentes temperaturas, considerando como esfuerzo de fluencia y esfuerzo último a temperatura ambiente 250 MPa y 450 MPa, respectivamente. En general, este material exhibe un endurecimiento por deformación en el rango de 150 °C a 370 °C. Esto se evidencia por el relativo incremento del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último en dicho rango. El esfuerzo último puede incrementarse 10% con respecto a su valor en condiciones ambientales y el esfuerzo de fluencia puede recuperar su valor en condiciones ambientales cuando alcanza temperaturas en el rango de 230 °C a 320 °C. El endurecimiento resulta en una disminución de la ductilidad.

En cuanto al acero inoxidable A304, utilizado en la construcción del fondo y falca de la paila, se han utilizado valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último a diferentes temperaturas hallados por la Asociación de Desarrollo de Acero Inoxidable de Sudáfrica (ver tabla 4). Si bien es cierto, que se puede utilizar el mismo procedimiento que en el caso del acero A36, los valores de la tabla son más exactos.



**Figura 22. Efectos típicos del aumento de temperatura en las propiedades mecánicas de los aceros estructurales.**

Fuente: Steel Structures Design and Behavior [28].

**Tabla 4. Esfuerzo de fluencia y esfuerzo último a diferentes temperaturas para varios aceros austeníticos inoxidables<sup>18</sup>.**

| Temp°C | 304 |     | 304L |     | 316 |     | 316L |     | 321 |     | 347 |     |
|--------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | YS  | TS  | YS   | TS  | YS  | TS  | YS   | TS  | YS  | TS  | YS  | TS  |
| 150    | 191 | 465 | 180  | 431 | 205 | 510 | 176  | 450 | 156 | 475 | 224 | 480 |
| 260    | 166 | 445 | 152  | 409 | 173 | 500 | 149  | 435 | 131 | 468 | 198 | 437 |
| 370    | 150 | 445 | 140  | 400 | 157 | 500 | 134  | 435 | 121 | 468 | 182 | 426 |
| 480    | 137 | 428 | 130  | 382 | 152 | 475 | 123  | 415 | 116 | 468 | 176 | 426 |
| 595    | 125 | 365 | 116  | 327 | 144 | 407 | 109  | 360 | 112 | 400 | 173 | 402 |
| 705    | 112 | 266 | =    | 245 | 134 | 298 | =    | 272 | 102 | 276 | 161 | 324 |
| 815    | 79  | 145 | =    | 142 | 112 | 172 | =    | 168 | 95  | 141 | 113 | 168 |

Fuente: The Mechanical Properties of Stainless Steel [29].

### 2.3.6 Esfuerzos combinados

Cuando un elemento se encuentra sometido a un esfuerzo en una sola dirección, la comparación con un valor permisible es una tarea simple. Sin embargo, cuando el elemento se encuentra sometido a más de un esfuerzo en diferentes direcciones, estos esfuerzos se combinan en uno solo, el cual permite ser comparado con un valor permisible.

No existe una manera universal en que se combinados estos esfuerzos, sino que a través de los años se han formulado y probado varias hipótesis, las cuales han conducido a las prácticas aceptadas en la actualidad. Como han sido aceptadas, estas prácticas se caracterizan como teorías. Las teorías, generalmente, aceptadas son: Esfuerzo cortante máximo, Energía de distorsión y Mohr-Coulomb para materiales dúctiles.

#### 2.3.6.1 Teoría de la energía de distorsión

De acuerdo con esta teoría, un componente estructural es seguro siempre que el valor máximo de la energía de distorsión por unidad de volumen en ese material sea menor que la energía de distorsión por unidad de volumen requerida para hacer fluir una probeta del mismo material sometida a tensión.

El esfuerzo equivalente o esfuerzo Von Mises,  $\sigma_{VM}$ , usando componentes xyz del esfuerzo tridimensional, viene dado por la ecuación (2.64):

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (2.64)$$

El valor de  $\sigma_{VM}$  será comparado con un valor permisible como el esfuerzo de fluencia o el esfuerzo último del material.

<sup>18</sup> Donde YS corresponde al Esfuerzo de Fluencia (Yield Streght) y TS corresponde al Esfuerzo Último (Tensile Streght). Unidades en MPa.

## Capítulo 3

### Caso estudio: Paila pirotubular

#### 3.1 Descripción del problema

El problema consiste en diseñar y estudiar diferentes diseños de pailas tipo pirotubular para la etapa de evaporación del proceso de elaboración de la panela. Para ello se determinará la potencia térmica transmitida por los gases de combustión al jugo, utilizando para ello cinco diseños de pailas pirotubulares, los cuales serán comparados con los resultados de la paila plana aleteada evaporadora de la referencia [1]. Además se realizará un análisis estructural de cada paila con el fin de hallar los esfuerzos térmicos generados.

Para la simulación de los procesos térmicos en las pailas correspondientes a los dominios 1 (paila pirotubular circular), dominio 2 (paila pirotubular rectangular redondeada), dominio 3 (paila pirotubular trapezoidal), dominio 4 (paila pirotubular aleteada trapezoidal) y dominio 5 (paila pirotubular aleteada rectangular redondeada) se hará uso de cuatro subdominios computacionales:

1. **Subdominio “Ducto de humos”**, es donde los gases de combustión provenientes de la cámara de combustión “Ward -CIMPA” atraviesa por el ducto de humos, suministrando a las superficies de la base de la paila la energía térmica (por convección y radiación) que es necesaria para el calentamiento del jugo de caña.
2. **Subdominio “Paila pirotubular”**, es el medio que separa los gases de combustión con el jugo de caña. Su función principal es transferir el máximo de energía térmica de los productos de combustión hacia el jugo de caña.
3. **Subdominio “Aletas”**: son superficies extendidas en contacto con la base inferior de la paila. Su función es aumentar el área de transferencia de calor. Este subdominio está presente en los dominios 4 y 5.
4. **Subdominio “Jugo de caña”**, que comprende el jugo de caña contenido dentro del subdominio “Paila”. Este es el dominio en el cual, el jugo de caña recibe la energía térmica proveniente de los gases de combustión.

Los mismos que serán necesarios para la obtención de resultados detallados del proceso de transferencia de energía térmica existente entre los gases productos de la combustión y el jugo de caña.

Para la simulación de los procesos estructurales de las pailas correspondientes a todos los dominios no es necesario establecer subdominios computacionales.

### 3.2 Análisis fluidodinámico

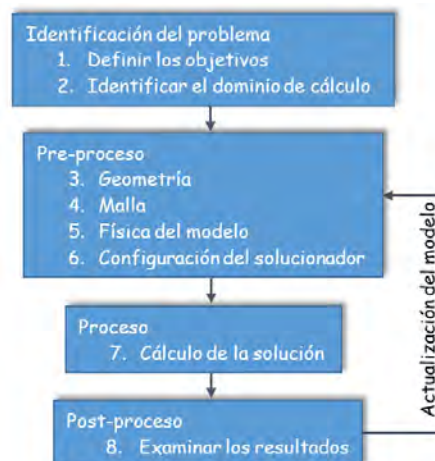
La dinámica de fluidos computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés) es la ciencia que consiste en predecir el flujo de fluidos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados, mediante la solución numérica del conjunto de las ecuaciones de conservación, haciendo uso del Método de Elementos Finitos (FEM – Finite Element Method por sus siglas en inglés) o del Método de Volúmenes Finitos (FVM – Finite Volume Method por su siglas en inglés). Los resultados de análisis con CFD tiene especial importancia en:

- Estudios conceptuales de nuevos diseños
- Desarrollo detallado de productos
- Solución de problemas
- Re-diseño

El análisis de CFD complementa pruebas y experimentos reduciendo así el esfuerzo y costos requeridos por la experimentación y adquisición de datos.

#### 3.2.1 Visión general de la modelación en CFD

Para realizar una simulación en la que se utilizan técnicas de CFD, se debe seguir una serie de pasos, los cuales se definen en la figura 23:



**Figura 23. Pasos a seguir durante una simulación en CFD.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.1.1 Identificación del problema

#### A. Definir los objetivos

Para esta etapa del proceso se definen la clase de resultados de interés (potencia térmica, caída de presión, flujo másico, etc.). Dependiendo de ello, se deben determinar qué modelos (turbulencia, compresibilidad, radiación, etc.) y/o simplificaciones (flujo estacionario, flujo incompresible, simetría, etc.) se tienen que aplicar. Por último, se debe conocer el nivel de exactitud requerido y el tiempo disponible para obtener los resultados. Una vez evaluado lo anterior se debe cuestionar si CFD es la herramienta necesaria para la resolución del problema.

#### B. Identificar el dominio de cálculo

En muchos casos no es necesario simular un sistema global, sino elegir una parte determinada (ver figura 24). Para definir el dominio de cálculo, es importante verificar si se tiene la información necesaria para implementar las condiciones de frontera para la simulación. En caso que no se tenga, se debe analizar si el dominio de cálculo se puede extender a una zona donde se tenga la información.



Figura 24. Definición del dominio de cálculo dentro de un sistema global.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.1.2 Pre-proceso

#### A. Geometría

Es importante definir: cómo se obtendrá las dimensiones de la geometría, por ejemplo, si se va a obtener la geometría del fluido a partir de un sólido ya existente y qué tipo de software CAD<sup>19</sup> se va a utilizar para ello. Se debe analizar si es factible simplificar la geometría, por ejemplo, removiendo partes complejas de ésta que pueden complicar la tarea del mallado. Además, si el dominio de cálculo lo permite, se puede elegir condiciones de simetría o periodicidad, las cuales reducen dicho dominio disminuyendo los tiempos de cálculo y los requerimientos de memoria.

<sup>19</sup> Computer-aided design o diseño asistido por computador.

## B. Malla

Dependiendo de la fenomenología presente en el campo de flujo, se define la densidad de malla requerida en cada una de las regiones del dominio. Hay que tener en cuenta que la malla debe ser capaz de capturar gradientes de interés, como por ejemplo: velocidad, presión, temperatura, etc. Hay que poseer la sensibilidad para decidir si la malla será capaz de capturar la fenomenología del caso en estudio.

Es necesario elegir la malla más apropiada: en este sentido se debe analizar la complejidad de la geometría del dominio de cálculo y además elegir el tipo de elementos que se utilizará en el mallado.

Por último, se debe analizar si se cuenta con suficientes recursos computacionales: el tiempo de cálculo dependerá de la capacidad de cálculo de la computadora, el número de celdas/nodos y la cantidad de modelos físicos involucrados.

## C. Física y configuración del solucionador

Para un problema determinado es necesario definir:

- Las propiedades de los materiales tanto de sólidos, líquidos y gases.
- Los modelos físicos: turbulencia, combustión, multifase, etc.
- Las condiciones de frontera (velocidad, flujo másico, presión, simetría, periodicidad, etc.) que serán utilizadas en el modelo.
- Proveer valores iniciales para la primera iteración.
- Los valores de monitoreo para la convergencia de la simulación.

### 3.2.1.3 Solución

En este apartado se resuelve el sistema de ecuaciones de conservación iterativamente hasta su convergencia.

La convergencia se alcanza cuando: el cambio entre una iteración y la siguiente es despreciable o se cumplen un cierto número de iteraciones, en ambos casos esto es definido por el usuario.

La precisión de la solución una vez alcanzada convergencia depende de: la precisión de los modelos físicos elegidos, la resolución de la malla y errores numéricos.

### 3.2.1.4 Post-proceso

Esta es la parte final y consiste en evaluar los resultados obtenidos para verificar si son representativos de la solución del campo de flujo, de no ser así se debe cambiar las condiciones de frontera y/o los modelos físicos y realizar una nueva simulación.

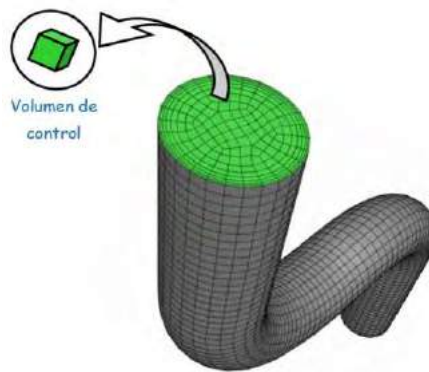
## 3.2.2 Programa ANSYS-CFX

ANSYS CFX es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) de alto rendimiento que ofrece soluciones fiables y precisas, de forma rápida y robusta a través de una amplia gama de aplicaciones de CFD y multi-física. CFX es reconocido por su excelente precisión, robustez y velocidad con máquinas rotativas. No obstante, tiene la

capacidad para modelar motores de combustión interna, aero-acústica y sistemas multifase.

Los solucionadores de Ansys CFD están basados en el método de discretización espacial de volúmenes finitos. Para Ansys-CFX, el proceso de funcionamiento es el siguiente:

- El dominio es discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control (ver figura 25).
- Las ecuaciones de transporte para masa, momento, energía, especies, etc, son resueltas en este conjunto de volúmenes de control.
- El sistema de ecuaciones en derivadas parciales son discretizadas en un sistema de ecuaciones lineales.
- El sistema de ecuaciones lineales son resueltas numéricamente para obtener una solución aproximada de la solución real.



**Figura 25. Discretización y volumen de control de la región de fluido de una tubería.**

Fuente: Ansys CFX Workshop.

### 3.2.3 Geometría

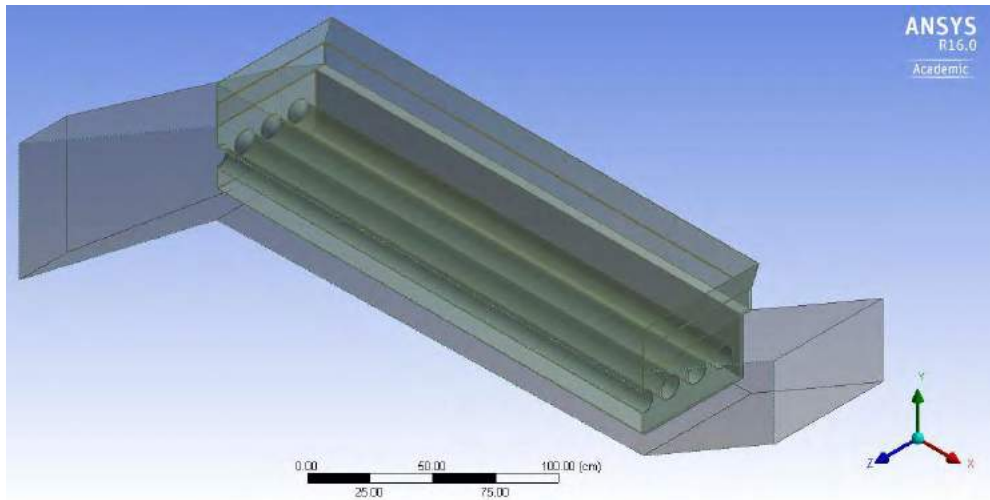
Para la obtención de la geometría se utilizó el programa ANSYS Designmodeler. Si bien la geometría puede elaborarse utilizando cualquier software CAD y luego ser importada por Designmodeler, se prefirió utilizar este programa, ya que al ser un software propio de ANSYS, brinda la facilidad de poder modificar las operaciones realizadas en la geometría. De esta manera sólo es necesario elaborar completamente una geometría y editando sólo algunas operaciones es posible obtener la geometría de todos los dominios computacionales, ahorrando de esta manera tiempo y esfuerzo.

El diseño de cada paila fue proporcionado por el Dr. Ing. Rafael Saavedra. Los planos de cada una se encuentran en el Anexo A.

Cabe resaltar que para efectos de un máximo aprovechamiento de los recursos computacionales, sólo será empleado como dominio computacional la mitad de todas las geometrías que comprenden dichos subdominios, pues todos ellos presentan simetría con respecto a la sección longitudinal definido por el plano ubicado en la mitad de la hornilla (plano XY).

### 3.2.3.1 Dominio 1: Paila pirotubular circular

En la figura 26 se muestra la geometría en 3D del dominio computacional que se utilizará para la simulación. La paila pirotubular circular, fue “cortada” a una altura de 50 cm a partir de su base. Este procedimiento fue realizado con el fin de disminuir el costo computacional.

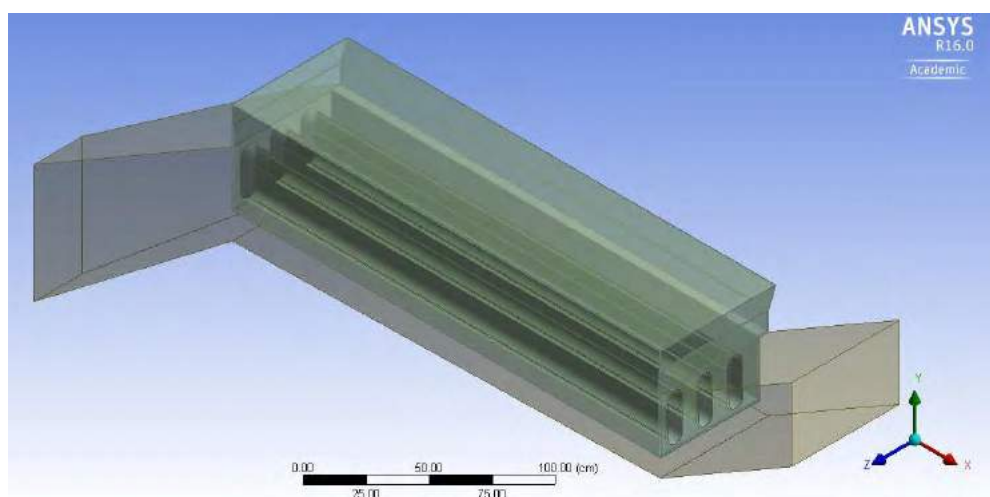


**Figura 26. Representación geométrica del dominio computacional 1: Paila pirotubular circular.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3.2 Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada

En la figura 27 se muestra la geometría en 3D del dominio computacional que se utilizará para la simulación. La paila pirotubular rectangular redondeada, fue “cortada” a una altura de 50 cm a partir de su base. Al igual que en el caso anterior este procedimiento fue realizado con el fin de disminuir el costo computacional.



**Figura 27. Representación geométrica del dominio computacional 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3.3 Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal

En la figura 28 se muestra la geometría en 3D del dominio computacional que se utilizará para la simulación. La paila pirotubular trapezoidal, fue “cortada” a una altura de 50 cm a partir de su base. Al igual que en el caso anterior este procedimiento fue realizado con el fin de disminuir el costo computacional.

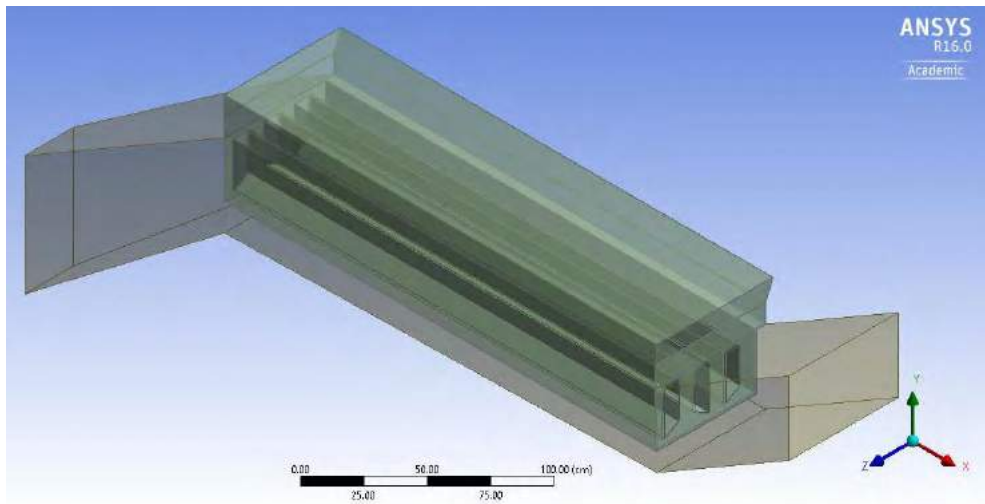


Figura 28. Representación geométrica del dominio computacional 3: Paila pirotubular trapezoidal.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3.4 Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal

En la figura 29 se muestra la geometría en 3D del dominio computacional que se utilizará para la simulación. La paila pirotubular aleteada trapezoidal, fue “cortada” a una altura de 50 cm a partir de su base. Al igual que en el caso anterior este procedimiento fue realizado con el fin de disminuir el costo computacional.

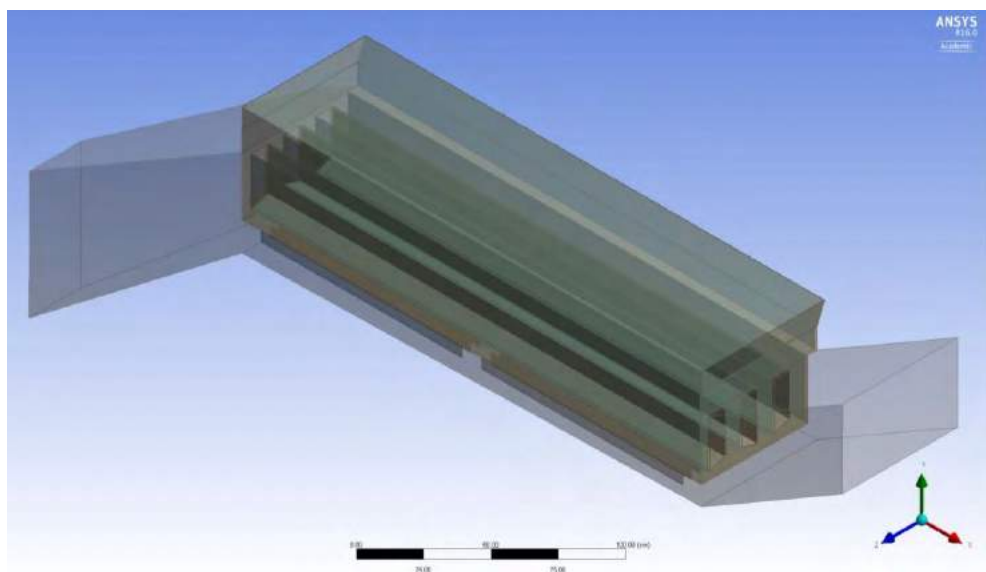


Figura 29. Representación geométrica del dominio computacional 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3.5 Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada

En la figura 30 se muestra la geometría en 3D del dominio computacional que se utilizará para la simulación. La paila pirotubular aleteada rectangular redondeada, fue “cortada” a una altura de 50 cm a partir de su base. Al igual que en el caso anterior este procedimiento fue realizado con el fin de disminuir el costo computacional.

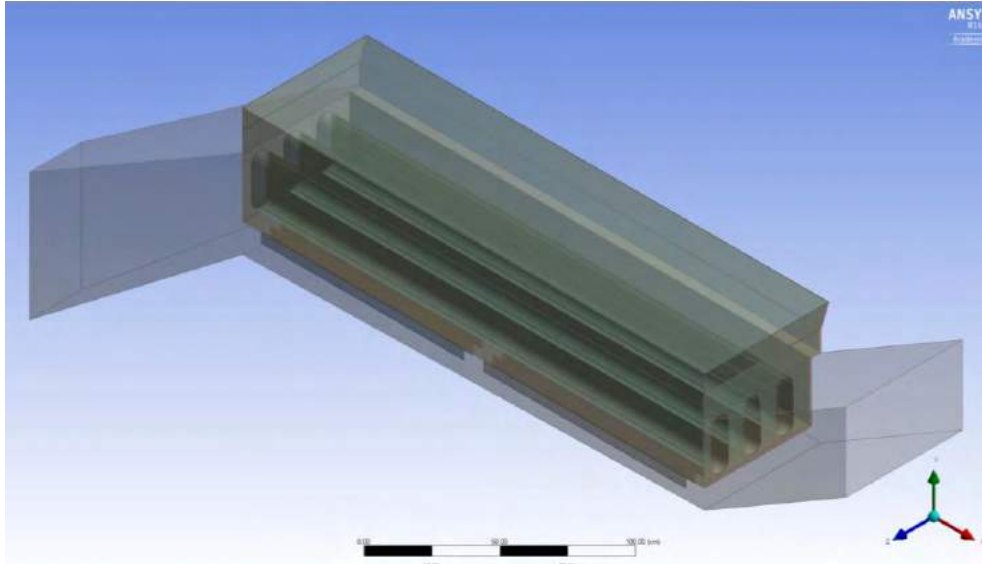


Figura 30. Representación geométrica del dominio computacional 4: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.

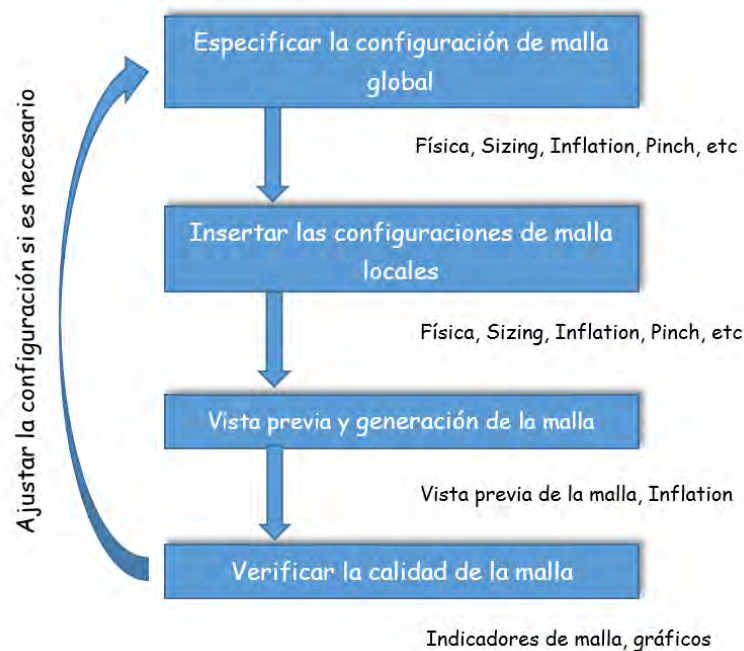
Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.4 Discretización en volúmenes finitos

Para poder resolver las ecuaciones de conservación en forma diferencial es necesario discretizar los dominios en un conjunto de puntos o volúmenes finitos denominado malla. La discretización del dominio requiere cierta organización de los volúmenes finitos de manera que la solución sea lo más eficiente posible. Además, la discretización debe adaptarse a las regiones de frontera de tal manera que las condiciones de frontera puedan ser representadas con precisión.

Para la discretización de los cuatro dominios computacionales se utilizó la herramienta ANSYS – Meshing Grid™. Este programa es una plataforma de mallado de siguiente generación que combina las ventajas de pre-procesamiento ofrecidas por Ansys ICEM-CFD, GAMBIT, TGRID y CFX-Mesh. Además es capaz de crear mallas para diferentes tipos Física (CFD, mecánica, electromagnetismo) y solucionadores (Fluent, CFX, POLYFLOW, Static Structural, Rigid dynamics, etc.).

El proceso de mallado utilizado por ANSYS-Meshing se representa en la figura 31:



**Figura 31. Proceso de mallado.**  
Fuente: Elaboración propia.

#### 3.2.4.1 Configuración global de la malla

En la figura 32 se muestra la interfaz del programa. En la barra lateral izquierda se observa el “Outline” dentro del cual se encuentra la carpeta “Project” seguida de “Model”. Dentro de esta última se encuentra cuatro subcarpetas:

- **Geometry:** en esta carpeta se encuentra la geometría de cada subdominio de estudio, la cual fue creada previamente en Designmodeler u otro software CAD de preferencia.
- **Coordinate System:** Indica el sistema de coordenadas Global o en caso haya, también muestra los sistemas de referencia auxiliares.
- **Mesh:** Permite definir los parámetros tanto globales como locales que se utilizarán en la construcción de la malla. También permite observar las estadísticas e indicadores de calidad de la malla.
- **Named selections:** Indica el nombre de las superficies de la geometría que serán utilizadas para definir las condiciones de frontera. Este procedimiento puede ser hecho tanto en ANSYS Meshing como en ANSYS Designmodeler.



Figura 32. Interfaz de Ansys Meshing.  
Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de configuración global de la malla se encuentran en la vista de detalle de la subcarpeta Mesh. A través de estos parámetros se puede tener un control considerable de cómo los volúmenes de control se encuentran distribuidos en todo el modelo. Los parámetros globales utilizados en las simulaciones se muestran en la figura 33:

| Details of "Mesh"                               |                   |
|-------------------------------------------------|-------------------|
| Display                                         |                   |
| Display Style                                   | Body Color        |
| Defaults                                        |                   |
| Physics Preference                              | CFD               |
| Solver Preference                               | CFX               |
| Relevance                                       | 100               |
| Sizing                                          |                   |
| Use Advanced Size Function                      | On: Curvature     |
| Relevance Center                                | Fine              |
| Initial Size Seed                               | Active Assembly   |
| Smoothing                                       | Low               |
| Transition                                      | Slow              |
| Span Angle Center                               | Fine              |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | 12.0 °            |
| <input type="checkbox"/> Min Size               | 0.50 mm           |
| <input type="checkbox"/> Max Face Size          | 9.0 mm            |
| <input type="checkbox"/> Max Size               | 12.0 mm           |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate            | 1.10              |
| Minimum Edge Length                             | 0.558410 mm       |
| Inflation                                       |                   |
| Use Automatic Inflation                         | None              |
| Inflation Option                                | Smooth Transition |
| <input type="checkbox"/> Transition Ratio       | 0.77              |
| <input type="checkbox"/> Maximum Layers         | 7                 |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate            | 1.1               |
| Inflation Algorithm                             | Pre               |
| View Advanced Options                           | Yes               |
| Collision Avoidance                             | Stair Stepping    |

Figura 33. Detalles de la malla.  
Fuente: Elaboración propia.

De los parámetros mostrados en la figura 33, se han modificado los siguientes:

- **Physics Preference:** permite establecer como el programa realiza el mallado dependiendo de la Física del tipo de análisis que se especifique. Al seleccionar la Física, establece valores predeterminados para varios parámetros de control. En este caso se ha elegido la opción CFD.
- **Solver Preference:** esta opción aparece una vez escogida la Física. Para el caso de CFD, se puede escoger entre los solucionadores Fluent, CFX o Polyflow. Basándose en el tipo de solucionador escogido, el programa establece valores predeterminados a los parámetros de configuración de manera que se genere una malla más favorable. En este caso se ha elegido la opción CFX.
- **Relevance:** permite controlar que tan fina es la malla de todo el modelo. Puede tomar un valor de +100 (soluciones de alta precisión) o -100 (soluciones de gran velocidad). En este caso se ha optado por un valor de 100.
- **Use Advance Size Function:** esta opción brinda un mayor control sobre las funciones de tamaño de la malla. Dependiendo de la opción que se escoja, se activan ciertos mecanismos de refinamiento. Se ha escogido la opción On: Curvature.
- **Relevance center:** permite definir qué tan fina (fine) o gruesa (coarse) es la malla. Se ha decidido optar por una malla fina.
- **Smoothing:** intenta mejorar la calidad del elemento moviendo la ubicación de los nodos con respecto a los nodos y elementos los que rodean. Se ha elegido el valor de High.
- **Transition:** afecta la velocidad a la que los elementos adyacentes crecerán. La opción Slow produce una transición suave mientras que Fast produce transiciones más abruptas. Se ha optado por la opción Slow.
- **Span Angle Center:** establece la meta para el refinamiento basado en la curvatura. La malla se subdivide en regiones curvas hasta que los elementos individuales abarcan un ángulo determinado. Se ha seleccionado la opción Fine, que corresponde a un ángulo de 12° a 36°.
- **Min Size:** es el tamaño mínimo que la función de tamaño retornará al mallador. Algunos elementos pueden ser de menor tamaño que este valor dependiendo del tamaño de ciertas regiones u otras anomalías geométricas. Con el fin de generar una malla lo suficientemente fina se ha escogido un valor de 0.5 mm.
- **Max Face Size:** es el tamaño máximo que la función de tamaño retornará al mallador de superficie. Algunas caras de elementos pueden ser más grandes que este tamaño dependiendo del tamaño de bordes duros o aritmética de punto flotante. Con el fin de generar una malla lo suficientemente fina se ha escogido un valor de 9 mm.

- **Max Size:** es el tamaño máximo que la función de tamaño retornará al mallador.
- **Growth Rate:** representa el porcentaje de aumento de longitud del borde del elemento con cada capa sucesiva de elementos. Se ha escogido un valor de 1.2.
- **Maximum Layers:** determina el número de capas en la malla. El número de capas permite captar mejor el comportamiento en las regiones de frontera, sin embargo, mientras mayor sea el valor escogido menor será la calidad de la malla. Se ha escogido un valor de 7.

### 3.2.4.2 Configuración local de la malla

La mayoría de veces es necesario refinar o distribuir los volúmenes de determinadas regiones con valores diferentes a los de la configuración global con el fin de aumentar la precisión o captar mejor el comportamiento del fluido en aquellas regiones. Para el caso estudio es importante el valor de las propiedades en las superficies en contacto. Para asegurar una alta precisión, es necesaria una malla lo suficientemente fina y que capture de manera adecuada el comportamiento de flujo en la capa límite. Esto último se logró mediante la utilización de la herramienta “Inflation”.

Para esta simulación se ha modificado altura de cada una de las capas (First Layer Height), el número de capas (Maximum Layers) y la relación de crecimiento (Growth Rate).

El valor de los parámetros correspondientes de Inflation es igual en los cinco dominios, y es la única configuración local de malla aplicada en los dominios de 1 a 3. Las regiones modificadas (color rojo) y su correspondiente configuración se muestran en la figuras 34 a la 39:

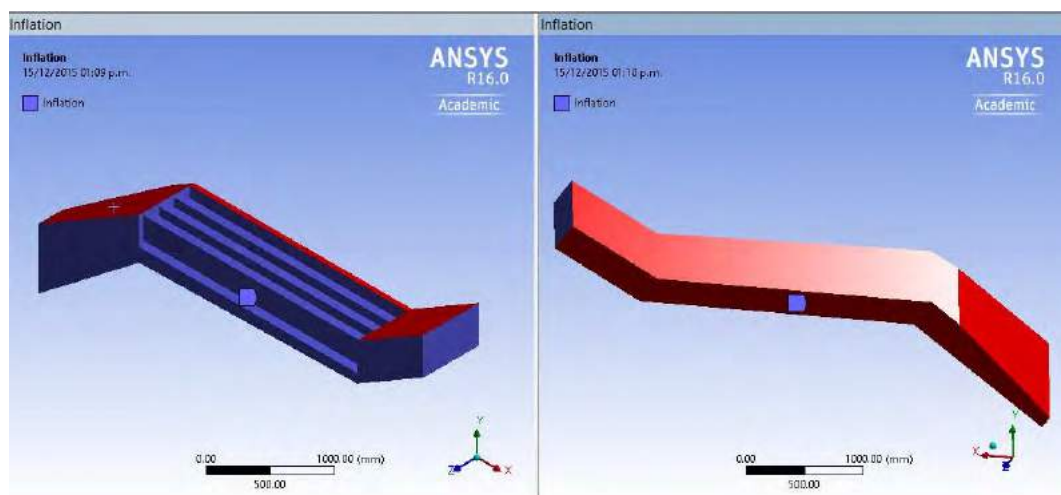


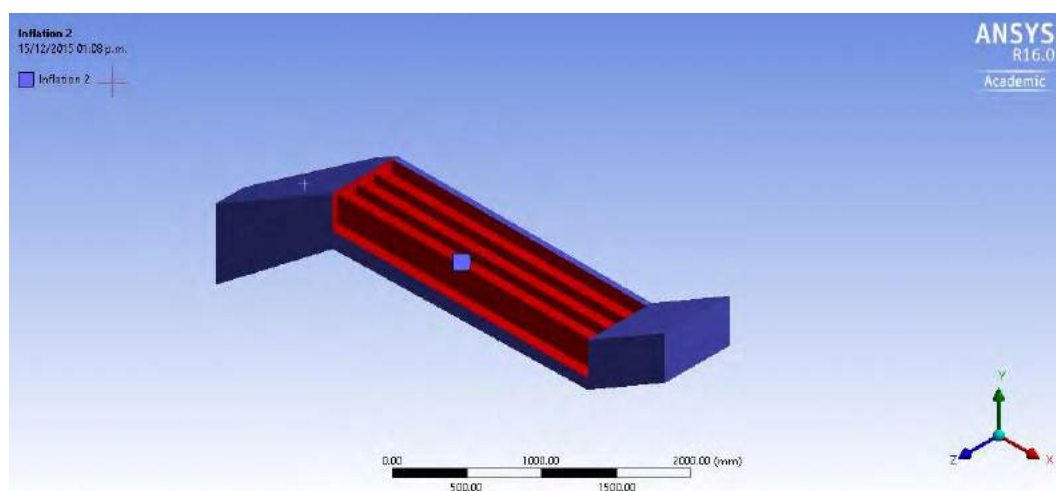
Figura 34. Regiones en el subdominio Ducto de humos correspondientes a Inflation.

Fuente: Elaboración propia.

| Details of "Inflation" - Inflation          |                       |
|---------------------------------------------|-----------------------|
| [-] Scope                                   |                       |
| Scoping Method                              | Geometry Selection    |
| Geometry                                    | 1 Body                |
| [-] Definition                              |                       |
| Suppressed                                  | No                    |
| Boundary Scoping Method                     | Geometry Selection    |
| Boundary                                    | 8 Faces               |
| Inflation Option                            | First Layer Thickness |
| <input type="checkbox"/> First Layer Height | 1.5 mm                |
| <input type="checkbox"/> Maximum Layers     | 7                     |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate        | 1.2                   |
| Inflation Algorithm                         | Pre                   |

**Figura 35. Detalles de configuración de Inflation.**

Fuente: Elaboración propia.



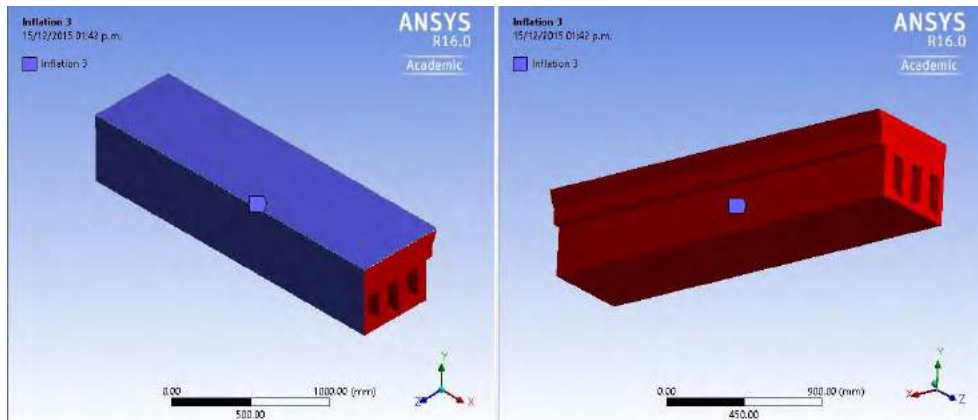
**Figura 36. Regiones en el subdominio Ducto de humos correspondientes a Inflation 2.**

Fuente: Elaboración propia.

| Details of "Inflation 2" - Inflation        |                       |
|---------------------------------------------|-----------------------|
| [-] Scope                                   |                       |
| Scoping Method                              | Geometry Selection    |
| Geometry                                    | 1 Body                |
| [-] Definition                              |                       |
| Suppressed                                  | No                    |
| Boundary Scoping Method                     | Geometry Selection    |
| Boundary                                    | 9 Faces               |
| Inflation Option                            | First Layer Thickness |
| <input type="checkbox"/> First Layer Height | 1.5 mm                |
| <input type="checkbox"/> Maximum Layers     | 7                     |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate        | 1.15                  |
| Inflation Algorithm                         | Pre                   |

**Figura 37: Detalles de configuración de Inflation 2.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 38. Regiones en el subdominio Jugo de caña correspondientes a Inflation 3.**

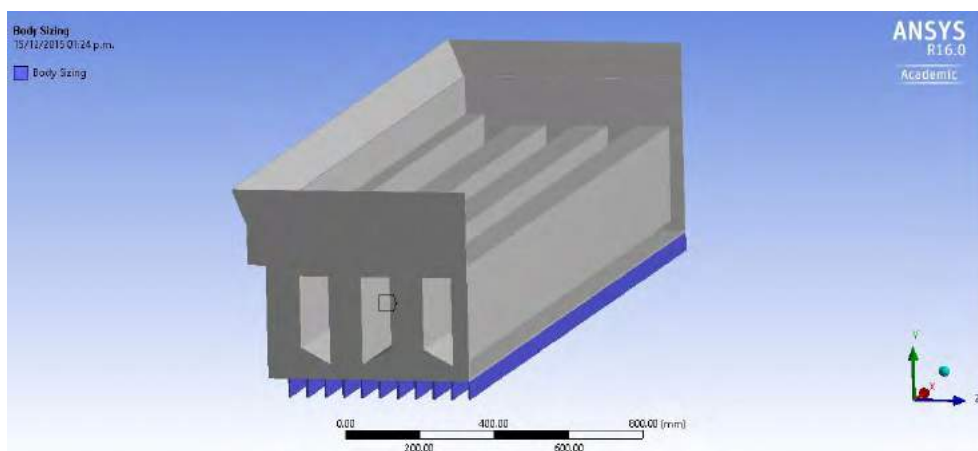
Fuente: Elaboración propia.

| Details of "Inflation 3" - Inflation        |                       |
|---------------------------------------------|-----------------------|
| Scope                                       |                       |
| Scoping Method                              | Geometry Selection    |
| Geometry                                    | 1 Body                |
| Definition                                  |                       |
| Suppressed                                  | No                    |
| Boundary Scoping Method                     | Named Selections      |
| Boundary                                    | Multiple Entities     |
| Inflation Option                            | First Layer Thickness |
| <input type="checkbox"/> First Layer Height | 2. mm                 |
| <input type="checkbox"/> Maximum Layers     | 7                     |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate        | 1.2                   |
| Inflation Algorithm                         | Pre                   |

**Figura 39. Detalles de configuración de Inflation 3.**

Fuente: Elaboración propia.

Para los dominios cuatro y cinco, debido a la geometría de las aletas, fue necesario refinar aún más los elementos de la malla en esa zona. Para este propósito se utilizó la herramienta “Body Sizing”, la cual permite modificar el tamaño de los elementos (Element Size). Los cuerpos modificados (color azul) y su correspondiente configuración se muestran en las figuras 40 y 41:



**Figura 40. Subdominio Aletas correspondientes a Body Sizing.**

Fuente: Elaboración propia.

| Details of "Body Sizing" - Sizing               |                    |
|-------------------------------------------------|--------------------|
| [-] Scope                                       |                    |
| Scoping Method                                  | Geometry Selection |
| Geometry                                        | 11 Bodies          |
| [-] Definition                                  |                    |
| Suppressed                                      | No                 |
| Type                                            | Element Size       |
| <input type="checkbox"/> Element Size           | 1.5 mm             |
| Behavior                                        | Soft               |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default            |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate            | Default            |
| <input type="checkbox"/> Local Min Size         | Default (0.5 mm)   |

**Figura 41. Detalles de configuración de Body Sizing.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.4.3 Selección de superficies como condiciones de fronteras

Con el fin de facilitar el trabajo en la etapa de acondicionamiento del problema se seleccionan las superficies de la geometría que serán utilizadas para definir las condiciones de frontera o interfases mediante el uso de la herramienta “Named Selections”.

Las condiciones de frontera son un conjunto de valores de propiedades (como por ejemplo velocidad, presión, temperatura, etc.) que se imponen en la frontera de un dominio con el fin de dar solución al sistema de ecuaciones diferenciales de conservación. Mientras que las interfases son las superficies de contacto que conectan dos dominios diferentes. Son de gran interés para conocer la tasa de transferencia de calor.

### 3.2.4.4 Generación de malla

Una vez definidos tanto los parámetros de configuración globales como locales, se procede a generar la malla. El tiempo de generación depende de la capacidad de cálculo disponible y de que tan fina se requiera que sea la malla.

### 3.2.4.5 Verificación la calidad de la malla

Una vez generada la malla es necesario verificar su calidad. Una malla de buena calidad se caracteriza porque sus criterios de calidad se encuentran dentro de rangos aceptables, la solución es independiente del tamaño de sus elementos y captura de forma correcta detalles geométricos importantes. Por otro lado, una malla de mala calidad puede causar dificultades en la convergencia, una mala descripción de la física y una solución difusa.

Para que la solución sea independiente respecto al número de elementos de la malla y se capturaren detalles geométricos importantes, se ha creado una malla relativamente fina mediante la configuración de los parámetros globales y locales de la malla. Esto ha sido posible gracias a la gran capacidad de cálculo disponible.

Por otra parte, los indicadores estadísticos de la malla muestran información acerca de los nodos y elementos. Dentro de este conjunto de indicadores se encuentran los indicadores de calidad de la malla, los cuales brindan un criterio de selección. Los

indicadores estadísticos de calidad utilizados son: la calidad ortogonal, la asimetría y la relación de aspecto.

Generalmente, se trata de mantener una calidad ortogonal mínima mayor a 0.1, una asimetría máxima menor a 0.95 y una relación de aspecto menor a 5. Sin embargo, estos valores pueden ser diferentes dependiendo de la física y de la ubicación del elemento. En las tablas 5, 6 y 7 se muestra el rango de valores de la asimetría, calidad ortogonal y relación de aspecto, respectivamente, para el caso estudio.

**Tabla 5. Espectro de valores para la asimetría de la malla.**

| Excelente | Muy buena | Buena     | Aceptable | Mala      | Inaceptable |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 0-0.25    | 0.25-0.50 | 0.50-0.80 | 0.80-0.94 | 0.95-0.97 | 0.98-1.00   |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6. Espectro de valores para la calidad ortogonal de la malla.**

| Inaceptable | Mala       | Aceptable | Buena     | Muy buena | Excelente |
|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0-0.001     | 0.001-0.14 | 0.14-0.20 | 0.20-0.69 | 0.70-0.95 | 0.95-1.00 |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 7. Espectro de valores para la relación de aspecto de la malla.**

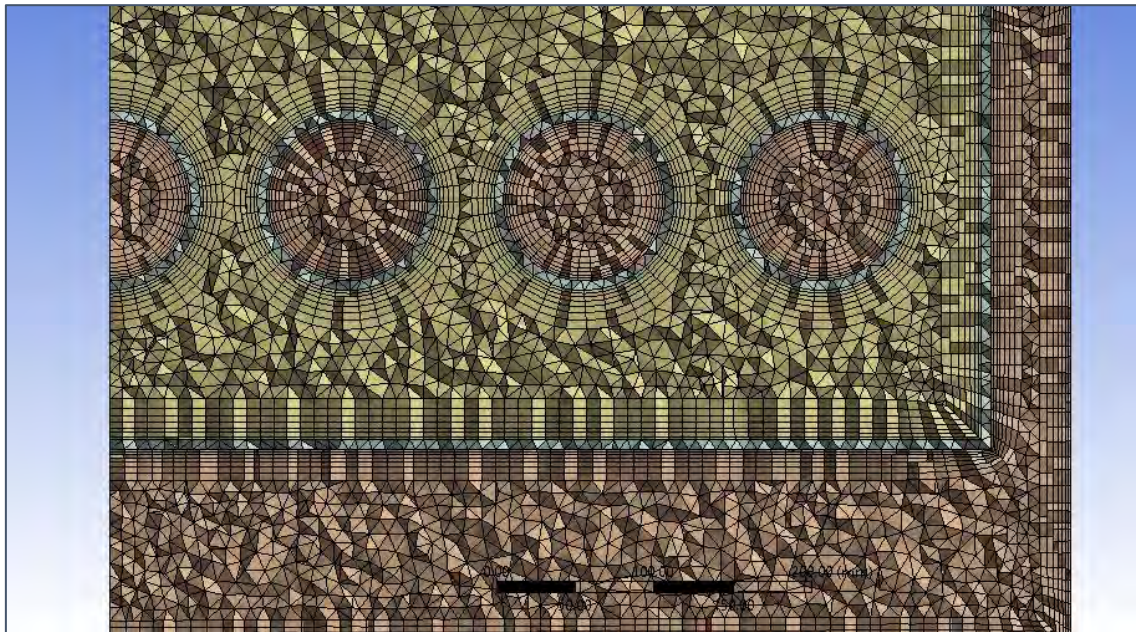
| Excelente | Aceptable | Mala  |
|-----------|-----------|-------|
| 0-3.00    | 3.00-5.00 | 5.00< |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se verifica la calidad de la malla para cada dominio computacional basándose en los criterios previamente mencionados.

#### - Dominio 1: Paila pirotubular circular

En la discretización de este dominio se generó casi 11 millones de volúmenes finitos de tipo tetraédrico y prismático. En particular, se observa en la figura 42, el alto refinamiento de la malla localizada en las tres subdominios computacionales “Ducto de humos”, “Paila pirotubular” y “Jugo de caña”. Esto con el objetivo de capturar con una buena aproximación la capa límite fluidodinámica y térmica en la interacción de los productos de combustión y el jugo de caña con la superficie sólida de la “Paila pirotubular”.



**Figura 42. Dominio 1: Paila pirotubular circular.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.**

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se presenta la métrica que determina la calidad de los elementos discretizados del dominio y de los tres subdominios que lo comprenden. Se observa que todos los subdominios computacionales presentan una “razón de aspecto medio” (mean aspect ratio) que es inferior a 3, siendo el valor máximo recomendado 5. Nótese, que a pesar del refinamiento que se realizó para captar la capa límite en las regiones adyacentes a los pirotubos de la “Paila pirotubular”, la razón de aspecto se ha mantenido en límites aceptables y los elementos con razones altas son escasos de manera que se ha estimado no influirán de manera significativa en los resultados de la simulación.

De manera similar, la “calidad ortogonal media” (mean orthogonal quality) para los subdominios “Ducto de humos”, “Jugo de caña” y “Paila pirotubular” son mayores a 0.8, lo cual es un indicativo de una malla de buena calidad pues, se aproximan al valor ideal de 1.

Cabe resaltar que se realizó un refinamiento con la herramienta Inflation del Meshing Grid<sup>TM</sup>, con el objetivo de captar con buena precisión la capa límite turbulenta. Este refinamiento también trae como consecuencia, el aumento de la asimetría de algunos elementos de malla cercanos a las paredes, razón por la cual se obtuvieron en algunos elementos, una “asimetría máxima” (Maximum Skewness) mayor a 0.9. Sin embargo, son escasos los elementos que presentan “asimetría máxima” superior a 0.9. Por lo tanto, se estima que éstos no comprometerán de manera significativa en la convergencia de la solución. Se resalta que en promedio la razón de asimetría de 0.22 en todo el dominio y de 0.31 debido a la geometría que representa.

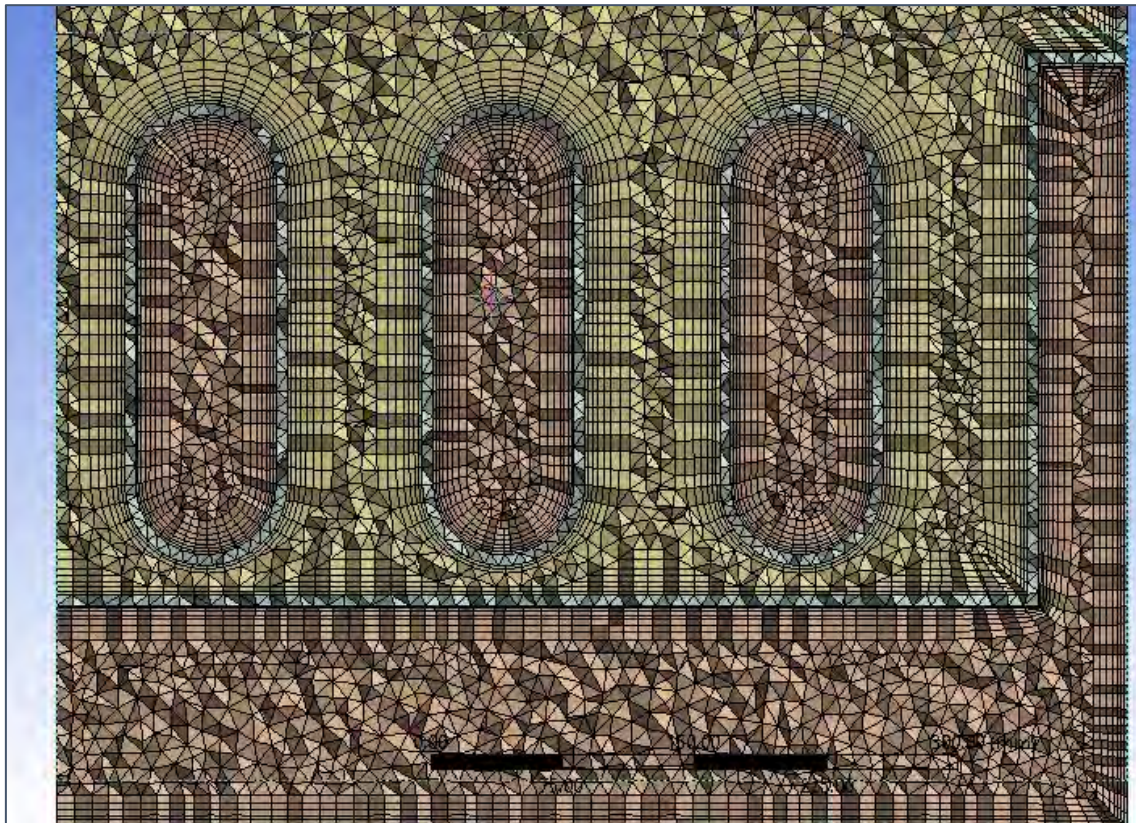
**Tabla 8. Dominio 1: Paila pirotubular circular.- Métrica que determina la calidad de la malla en los tres subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.**

| Subdominios              | Parámetro                   | Valor     |
|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| <b>Ducto de humos</b>    | Número de elementos         | 6 202 073 |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.89      |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.63      |
|                          | Asimetría estadística media | 0.22      |
| <b>Paila pirotubular</b> | Número de elementos         | 523 149   |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.8       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.22      |
|                          | Asimetría estadística media | 0.31      |
| <b>Jugo de caña</b>      | Número de elementos         | 4 450 282 |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.88      |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.24      |
|                          | Asimetría estadística media | 0.22      |
| <b>DOMINIO 1</b>         | Número de elementos         | 11175504  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.88      |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.45      |
|                          | Asimetría estadística media | 0.22      |

Fuente: Elaboración propia.

**- Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada**

En la discretización de este dominio se generó casi 11 millones de volúmenes finitos de tipo tetraédrico y prismático. En particular, se observa en la figura 43, el alto refinamiento de la malla localizada en las tres subdominios computacionales “Ducto de humos”, “Paila pirotubular” y “Jugo de caña”. Esto con el objetivo de capturar con una buena aproximación la capa límite fluidodinámica y térmica en la interacción de los productos de combustión y el jugo de caña con la superficie sólida de la “Paila pirotubular”.



**Figura 43. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.**

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9 se presenta la métrica que determina la calidad de los elementos discretizados del dominio y de los tres subdominios que lo comprenden. Se observa que todos los subdominios computacionales presentan una “razón de aspecto medio” (mean aspect ratio) que es inferior a 3. Nótese, que a pesar del refinamiento que se realizó para captar la capa límite en las regiones adyacentes a los pirotubos de la “Paila pirotubular”, la razón de aspecto se ha mantenido en límites aceptables y los elementos con razones altas son escasos de manera que se ha estimado no influirán de manera significativa en los resultados de la simulación.

De manera similar, la “calidad ortogonal media” (mean orthogonal quality) para los subdominios “Ducto de humos”, “Jugo de caña” y “Paila pirotubular” son mayores a 0.79, lo cual es un indicativo de una malla de buena calidad pues, se aproximan al valor ideal de 1.

Cabe resaltar que se realizó un refinamiento con la herramienta Inflation del Meshing Grid™, con el objetivo de captar con buena precisión la capa límite turbulenta. Este refinamiento también trae como consecuencia, el aumento de la asimetría de algunos elementos de malla cercanos a las paredes, razón por la cual se obtuvieron en algunos elementos, una “asimetría máxima” (Maximum Skewness) mayor a 0.9. Sin embargo, son escasos los elementos que presentan “asimetría máxima” superior a 0.9. Por lo tanto, se estima que éstos no comprometerán de manera significativa en la convergencia

de la solución. Se resalta que en promedio la razón de asimetría de 0.23 en todo el dominio y de 0.32 debido a la geometría que representa.

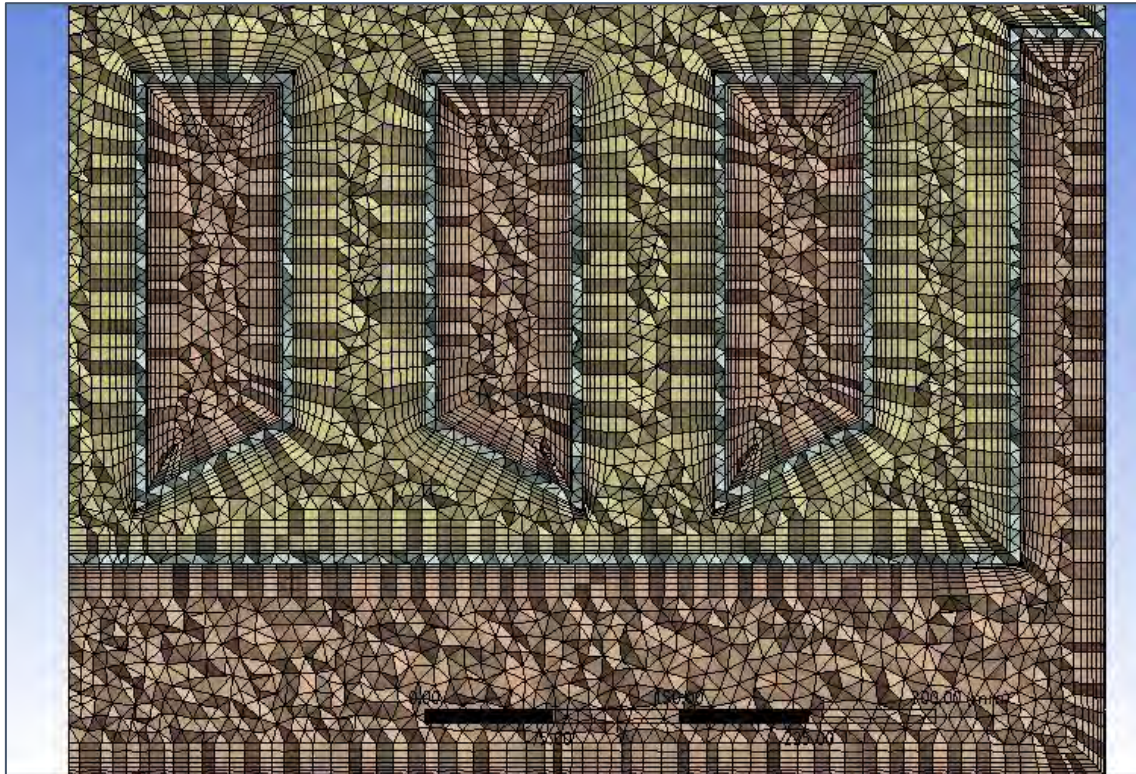
**Tabla 9. Dominio 2: Paila pirotubular redondeada.- Métrica que determina la calidad de la malla en los tres subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.**

| Subdominios              | Parámetro                   | Valor      |
|--------------------------|-----------------------------|------------|
| <b>Ducto de humos</b>    | Número de elementos         | 6 817 106  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.89       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.67       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.22       |
| <b>Paila pirotubular</b> | Número de elementos         | 634 673    |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.79       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.21       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.32       |
| <b>Jugo de caña</b>      | Número de elementos         | 4 148 824  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.88       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.34       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.23       |
| <b>DOMINIO 2</b>         | Número de elementos         | 11 600 603 |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.88       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.53       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.23       |

Fuente: Elaboración propia.

#### - **Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal**

En la discretización de este dominio se generó casi 11 millones de volúmenes finitos de tipo tetraédrico y prismático. En particular, se observa en la figura 44, el alto refinamiento de la malla localizada en las tres subdominios computacionales “Ducto de humos”, “Paila pirotubular” y “Jugo de caña”. Esto con el objetivo de capturar con una buena aproximación la capa límite fluidodinámica y térmica en la interacción de los productos de combustión y el jugo de caña con la superficie sólida de la “Paila pirotubular”.



**Figura 44. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.**

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 10 se presenta la métrica que determina la calidad de los elementos discretizados del dominio y de los tres subdominios que lo comprenden. Se observa que todos los subdominios computacionales presentan una “razón de aspecto medio” (mean aspect ratio) que es inferior a 3. Nótese, que a pesar del refinamiento que se realizó para captar la capa límite en las regiones adyacentes a los pirotubos de la “Paila pirotubular”, la razón de aspecto se ha mantenido en límites aceptables y los elementos con razones altas son escasos de manera que se ha estimado no influirán de manera significativa en los resultados de la simulación.

De manera similar, la “calidad ortogonal media” (mean orthogonal quality) para los subdominios “Ducto de humos”, “Jugo de caña” y “Paila pirotubular” son mayores a 0.78, lo cual es un indicativo de una malla de buena calidad pues, se aproximan al valor ideal de 1.

Cabe resaltar que se realizó un refinamiento con la herramienta inflation del Meshing Grid™, con el objetivo de captar con buena precisión la capa límite turbulenta. Este refinamiento también trae como consecuencia, el aumento de la asimetría de algunos elementos de malla cercanos a las paredes, razón por la cual se obtuvieron en algunos elementos, una “asimetría máxima” (Maximum Skewness) mayor a 0.9. Sin embargo, son escasos los elementos que presentan “asimetría máxima” superior a 0.9. Por lo tanto, se estima que éstos no comprometerán de manera significativa en la convergencia

de la solución. Se resalta que en promedio la razón de asimetría de 0.24 en todo el dominio y de 0.34 debido a la geometría que representa

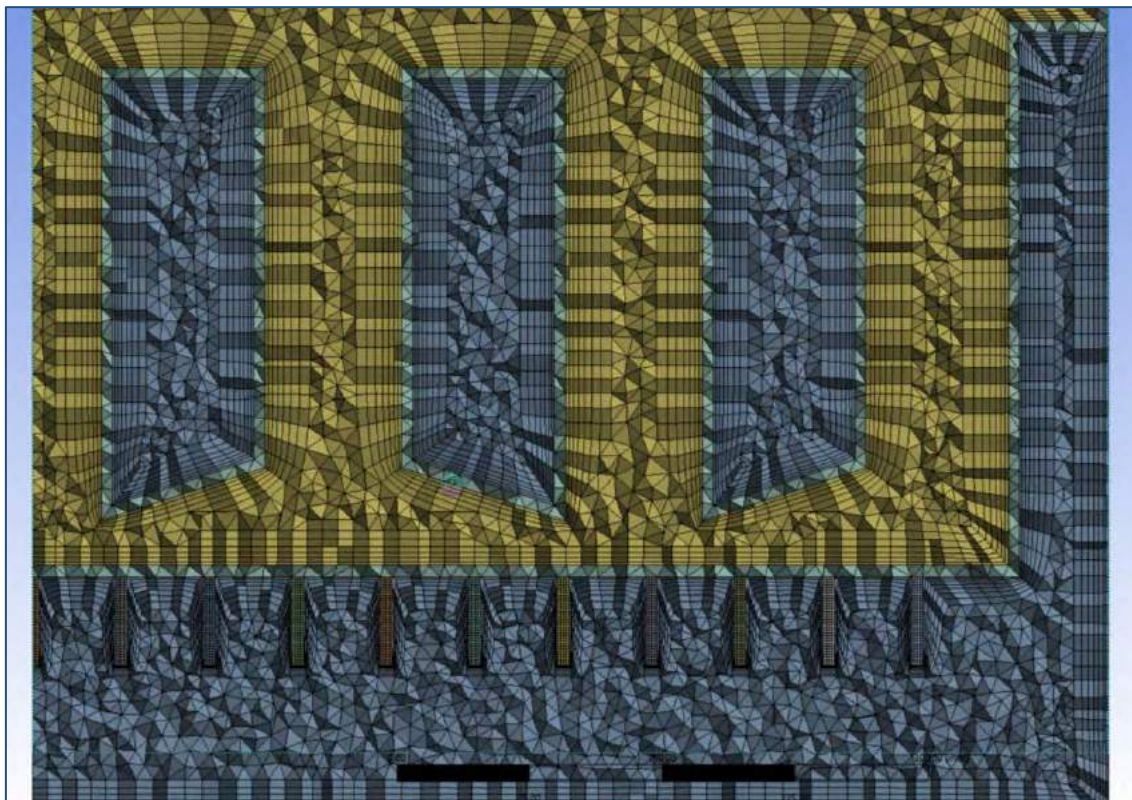
**Tabla 10. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal.- Métrica que determina la calidad de la malla en los tres subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.**

| Subdominios              | Parámetro                   | Valor      |
|--------------------------|-----------------------------|------------|
| <b>Ducto de humos</b>    | Número de elementos         | 6 603 653  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.88       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.73       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.23       |
| <b>Paila pirotubular</b> | Número de elementos         | 616 641    |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.78       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.27       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.34       |
| <b>Jugo de caña</b>      | Número de elementos         | 4 294 779  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.87       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.41       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.23       |
| <b>DOMINIO 3</b>         | Número de elementos         | 11 515 073 |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.87       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.58       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.24       |

Fuente: Elaboración propia.

#### - **Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal**

En la discretización de este dominio se generó casi 14 millones de volúmenes finitos de tipo tetraédrico y prismático. En particular, se observa en la figura 45, el alto refinamiento de la malla localizada en las tres subdominios computacionales “Ducto de humos”, “Paila pirotubular”, “Aletas” y “Jugo de caña”. Esto con el objetivo de capturar con una buena aproximación la capa límite fluidodinámica y térmica en la interacción de los productos de combustión y el jugo de caña con la superficie sólida de la “Paila pirotubular”.



**Figura 45: Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.**

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11 se presenta la métrica que determina la calidad de los elementos discretizados del dominio y de los tres subdominios que lo comprenden. Se observa que todos los subdominios computacionales presentan una “razón de aspecto medio” (mean aspect ratio) que es inferior a 3. Nótese, que a pesar del refinamiento que se realizó para captar la capa límite en las regiones adyacentes a los pirotubos de la “Paila pirotubular”, la razón de aspecto se ha mantenido en límites aceptables y los elementos con razones altas son escasos de manera que se ha estimado no influirán de manera significativa en los resultados de la simulación.

De manera similar, la “calidad ortogonal media” (mean orthogonal quality) para los subdominios “Ducto de humos”, “Paila pirotubular”, “Aletas” y “Jugo de caña” son mayores a 0.78, lo cual es un indicativo de una malla de buena calidad pues, se aproximan al valor ideal de 1.

Cabe resaltar que se realizó un refinamiento con la herramienta inflation del Meshing Grid™, con el objetivo de captar con buena precisión la capa límite turbulenta. Este refinamiento también trae como consecuencia, el aumento de la asimetría de algunos elementos de malla cercanos a las paredes, razón por la cual se obtuvieron en algunos elementos, una “asimetría máxima” (Maximum Skewness) mayor a 0.9. Sin embargo, son escasos los elementos que presentan “asimetría máxima” superior a 0.9. Por lo tanto, se estima que éstos no comprometerán de manera significativa en la convergencia de la solución.

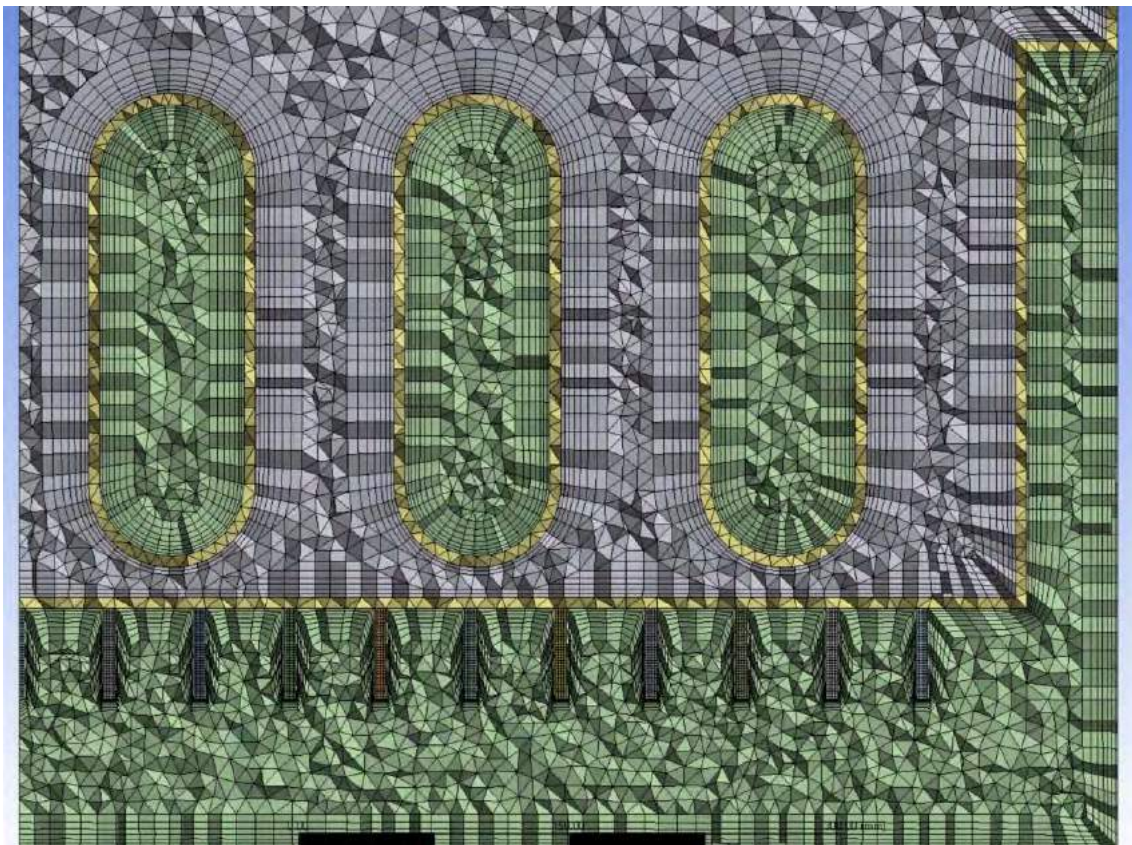
**Tabla 11. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.- Métrica que determina la calidad de la malla en los cuatro subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.**

| Subdominios              | Parámetro                   | Valor      |
|--------------------------|-----------------------------|------------|
| <b>Ducto de humos</b>    | Número de elementos         | 7 504 145  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.84       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 3.01       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.26       |
| <b>Paila pirotubular</b> | Número de elementos         | 619 733    |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.78       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.27       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.35       |
| <b>Aletas</b>            | Número de elementos         | 2 221 494  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.99       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 1.06       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.003      |
| <b>Jugo de caña</b>      | Número de elementos         | 4 292 024  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.87       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.41       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.23       |
| <b>DOMINIO 4</b>         | Número de elementos         | 14 637 396 |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.87       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.54       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.22       |

Fuente: Elaboración propia.

#### **- Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada**

En la discretización de este dominio se generó casi 14 millones de volúmenes finitos de tipo tetraédrico y prismático. En particular, se observa en la figura 46, el alto refinamiento de la malla localizada en las tres subdominios computacionales “Ducto de humos”, “Paila pirotubular”, “Aletas” y “Jugo de caña”. Esto con el objetivo de capturar con una buena aproximación la capa límite fluidodinámica y térmica en la interacción de los productos de combustión y el jugo de caña con la superficie sólida de la “Paila pirotubular”.



**Figura 46: Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.- Detalle de la discretización de los subdominios computacionales.**  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 12 se presenta la métrica que determina la calidad de los elementos discretizados del dominio y de los tres subdominios que lo comprenden. Se observa que todos los subdominios computacionales presentan una “razón de aspecto medio” (mean aspect ratio) que es inferior a 3. Nótese, que a pesar del refinamiento que se realizó para captar la capa límite en las regiones adyacentes a los pirotubos de la “Paila pirotubular”, la razón de aspecto se ha mantenido en límites aceptables y los elementos con razones altas son escasos de manera que se ha estimado no influirán de manera significativa en los resultados de la simulación.

De manera similar, la “calidad ortogonal media” (mean orthogonal quality) para los subdominios “Ducto de humos”, “Paila pirotubular”, “Aletas” y “Jugo de caña” son mayores a 0.78, lo cual es un indicativo de una malla de buena calidad pues, se aproximan al valor ideal de 1.

Cabe resaltar que se realizó un refinamiento con la herramienta inflation del Meshing Grid™, con el objetivo de captar con buena precisión la capa límite turbulenta. Este refinamiento también trae como consecuencia, el aumento de la asimetría de algunos elementos de malla cercanos a las paredes, razón por la cual se obtuvieron en algunos elementos, una “asimetría máxima” (Maximum Skewness) mayor a 0.9. Sin embargo,

son escasos los elementos que presentan “asimetría máxima” superior a 0.9. Por lo tanto, se estima que éstos no comprometerán de manera significativa en la convergencia de la solución.

**Tabla 12. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.- Métrica que determina la calidad de la malla en los cuatro subdominios computacionales que conforma el dominio computacional.**

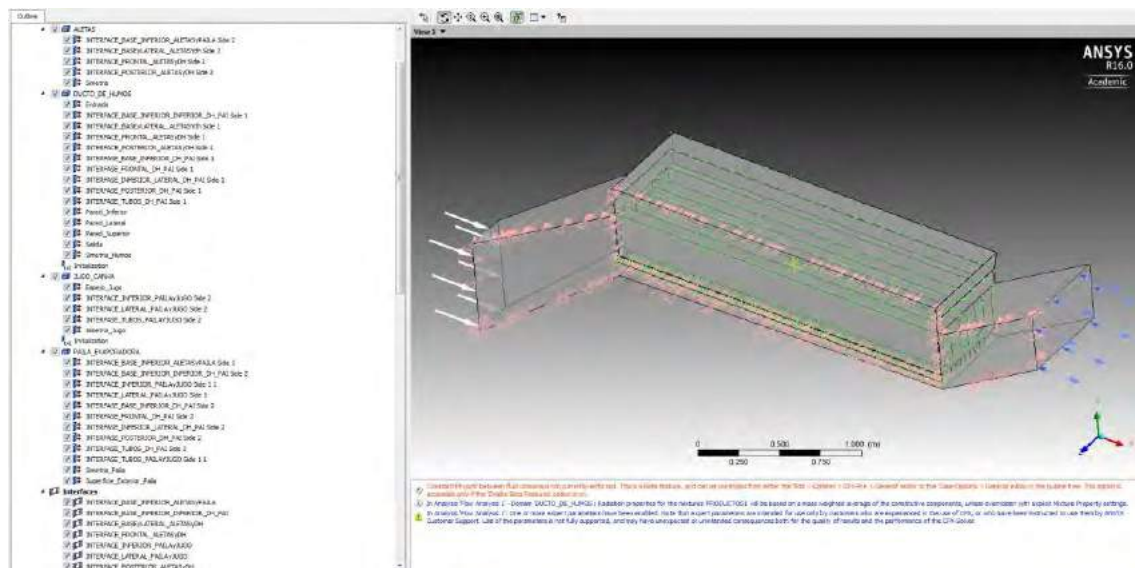
| Subdominios              | Parámetro                   | Valor      |
|--------------------------|-----------------------------|------------|
| <b>Ducto de humos</b>    | Número de elementos         | 7 421 145  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.83       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 3.01       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.21       |
| <b>Paila pirotubular</b> | Número de elementos         | 622 822    |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.78       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.23       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.32       |
| <b>Aletas</b>            | Número de elementos         | 2 321 494  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.99       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 1.06       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.003      |
| <b>Jugo de caña</b>      | Número de elementos         | 4 421 112  |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.88       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.36       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.22       |
| <b>DOMINIO 5</b>         | Número de elementos         | 14 786 573 |
|                          | Calidad ortogonal media     | 0.85       |
|                          | Razón de aspecto medio      | 2.47       |
|                          | Asimetría estadística media | 0.21       |

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.5 Pre-proceso

El acondicionamiento del problema para la simulación del comportamiento fluidodinámico y térmico de los dominios será efectuada mediante el empleo de la

herramienta computacional ANSYS–CFX–PRE™, en donde se tomará en consideración el desarrollo simultáneo de todos los subdominios según corresponda (ver figura 47).



**Figura 47. Interfaz de CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.

El acondicionamiento del problema es básicamente idéntico para todos los dominios computacionales. Antes de ingresar los datos en el programa, es necesario crear ciertas expresiones y funciones que serán utilizadas en este proceso.

### 3.2.5.1 Propiedades de los materiales

Las tablas 13, 14, 15 y 16, describen las propiedades de los productos de combustión, acero inoxidable AISI 304, hierro puro y jugo de caña, respectivamente, que componen cada uno de los subdominios “Ducto de humos”, “Paila pirotubular”, “Aletas” y “Jugo de caña”. Estas propiedades se ingresan al crear un nuevo material en la subcarpeta “Materials”, en las figuras 45, 46, 47 y 48 se muestran las pestañas en las que se ingresan estos datos.

Se utilizó para la simulación el software ANSYS–CFX™, en donde todas las ecuaciones de transporte fueron discretizadas utilizando el esquema del tipo “Up Wind”. Además, se asumieron como criterios de convergencia, (i) residuos medios menores a  $1 \times 10^{-5}$  (ii) desbalance en las ecuaciones de conservación menor a 0.01% y (iii) variación de las magnitudes fluidodinámicas y térmicas menores a 0.1%.

Tabla 13. Principales propiedades termodinámicas y de transporte de los productos de combustión en CFX-Pre.

| Propiedad                                                                                     | Simbología                         | Valor                                                                                               | Unidad              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Fraciones másicas de las especies (tomada el 19 de dic 2014 a las 8:20 am).                   | $y_i$                              | $y_{CO} = 0.0001, y_{CO_2} = 0.0509$<br>$y_{H_2O} = 0.0370, y_{N_2} = 0.7648$<br>$y_{O_2} = 0.1472$ |                     |
| Calor específico a presión cte de especies químicas que componen los productos de combustión. | $c_{p,prod} = \sum y_i c_{p,i}(T)$ | Tablas de coeficientes polinomiales (NASA)                                                          | J / kg K            |
| Peso molar de los productos de combustión                                                     | $\bar{W}_{prod}$                   | 28.01                                                                                               | kg / kmol           |
| Viscosidad dinámica de los productos de combustión                                            | $\mu_{prod}(T, Y_i)$               | Función de Mezcla                                                                                   | Pa.s                |
| Conductividad térmica de los productos de combustión                                          | $k_{prod}(T, Y_i)$                 | Función de mezcla                                                                                   | W / m K             |
| Densidad de los productos de combustión                                                       | $\rho_{prod}(p, T, Y_i)$           | Gas ideal                                                                                           | kg / m <sup>3</sup> |
| Coefficiente de absorción de los productos de combustión                                      | $a_{prod}(p, T, Y_i)$              | Modelo suma promediada de los gases grises (WSGGM)                                                  | 1 / m               |

Fuente: Elaboración propia.

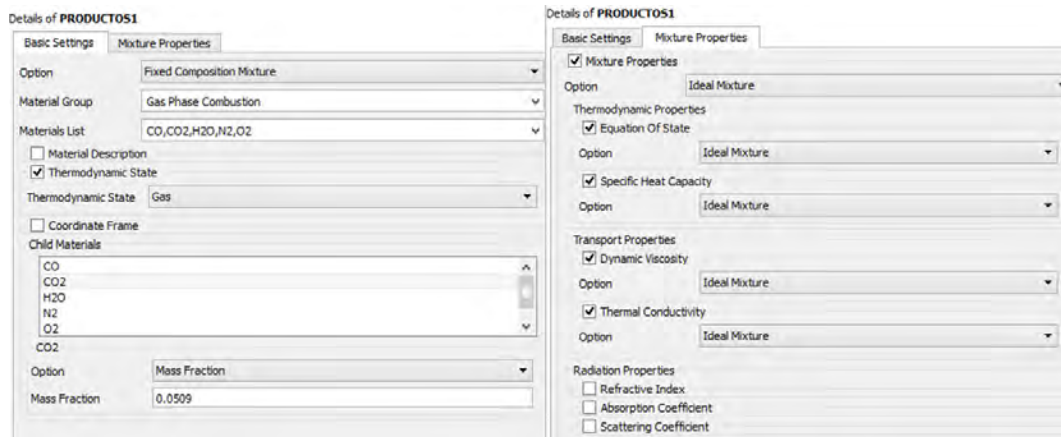


Figura 48. Interfaz de ingreso de propiedades de los productos de combustión en CFX-Pre.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Propiedades del hierro puro.

| Propiedad                           | Simbología    | Valor                                         | Unidad              |
|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| Densidad del acero A36              | $\rho_{Fe}$   | 7 870                                         | kg / m <sup>3</sup> |
| Calor específico del acero A36      | $c_{p,Fe}(T)$ | Datos obtenidos de Y. Çengel<br>(ver Anexo B) | J / kg K            |
| Conductividad térmica del acero A36 | $k_{Fe}(T)$   | Datos obtenidos de Y. Çengel<br>(ver Anexo B) | W / m K             |

Fuente: Elaboración propia.

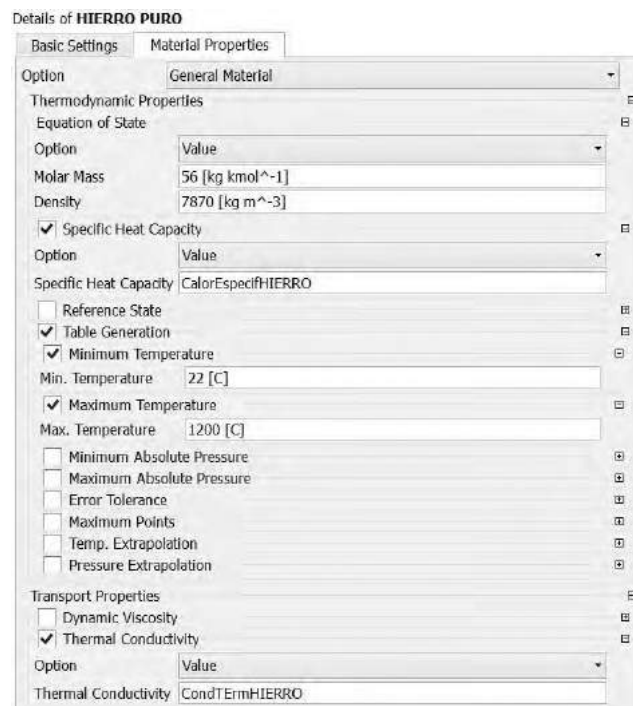


Figura 49. Interfaz de ingreso de propiedades del hierro puro en CFX-Pre.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Propiedades del acero inoxidable.

| Propiedad                                       | Simbología    | Valor                                         | Unidad              |
|-------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| Densidad del acero inoxidable A304              | $\rho_{Fe}$   | 7900                                          | kg / m <sup>3</sup> |
| Calor específico del acero inoxidable A304      | $c_{p,Fe}(T)$ | Datos obtenidos de Y. Çengel<br>(ver Anexo B) | J / kg K            |
| Conductividad térmica del acero inoxidable A304 | $k_{Fe}(T)$   | Datos obtenidos de Y. Çengel<br>(ver Anexo B) | W / m K             |

Fuente: Elaboración propia.

Details of **ACERO INOX 304**

Basic Settings | Material Properties

Option: General Material

Thermodynamic Properties

Equation of State

Option: Value

Molar Mass: 56 [kg kmol<sup>-1</sup>]

Density: 7900 [kg m<sup>-3</sup>]

☒ Specific Heat Capacity

Option: Value

Specific Heat Capacity: CalorEspecifACERO

☐ Reference State

☒ Table Generation

☒ Minimum Temperature

Min. Temperature: 22 [C]

☒ Maximum Temperature

Max. Temperature: 1200 [C]

☐ Minimum Absolute Pressure

☐ Maximum Absolute Pressure

☐ Error Tolerance

☐ Maximum Points

☐ Temp. Extrapolation

☐ Pressure Extrapolation

Transport Properties

☐ Dynamic Viscosity

☒ Thermal Conductivity

Option: Value

Thermal Conductivity: CondTErmACERO

**Figura 50. Interfaz de ingreso de propiedades del acero AISI 304 en CFX-Pre.**  
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 16. Principales propiedades termodinámicas y de transporte del jugo de la caña.**

| Propiedad             | Simbología                       | Valor                                                                                                                                       | Unidad              |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Densidad              | $\rho_l(T, Brix)$<br>$\rho_v(T)$ | $\rho_l(T, Brix) = 1043 + 4.854 Brix - 1.07 (T - 273.15)$<br>$\rho_v(T) = 353.44 / T$                                                       | kg / m <sup>3</sup> |
| Viscosidad            | $\mu_l(T)$<br>$\mu_v(T)$         | $\mu_l(T) = 0.047 / (T - 273.15)$<br>$\mu_v(T) = 1.718e^{-5} + 4.62e^{-8}(T - 273.15)$                                                      | Pa.s                |
| Calor específico      | $c_{p,l}(Brix)$<br>$c_{p,v}(T)$  | $c_{p,l}(Brix) = 4187(1 - 0.006 Brix)$<br>$c_{p,v}(T) = 999.2 + 0.147(T - 273.15) + 1.101e^{-4}(T - 273.15)^2 - 6.7581e^{-8}(T - 273.15)^3$ | J / kg K            |
| Conductividad térmica | $k_l(T, Brix)$<br>$k_v(T)$       | $k_l(T, Brix) = 0.3815 - 0.0051 Brix + 0.001866 (T - 273.15)$<br>$k_v(T) = 0.0244 + 0.6773e^{-4}(T - 273.15)$                               | W / m K             |
| Temp. ebul.           | $T_{ebu}(Brix)$                  | $T_{ebu}(Brix) = 369.7 + 0.9209 \exp(0.0557 Brix)$                                                                                          | K                   |

Fuente: Elaboración propia.

Details of JUGODECAIHA

Basic Settings | Material Properties

Option: General Material

Thermodynamic Properties

Equation of State

Option: Value

Molar Mass: 1.0 [kg kmol<sup>-1</sup>]

Density: if (T <= Tboiling, RhoL, RhoV)

☒ Specific Heat Capacity

Option: Value

Specific Heat Capacity: Cpl

Specific Heat Type: Constant Pressure

☐ Reference State

☒ Table Generation

☒ Minimum Temperature

Min. Temperature: 20 [C]

☒ Maximum Temperature

Max. Temperature: 900 [C]

☐ Minimum Absolute Pressure

☐ Maximum Absolute Pressure

☐ Error Tolerance

☐ Maximum Points

☐ Temp. Extrapolation

☐ Pressure Extrapolation

Transport Properties

☒ Dynamic Viscosity

Option: Value

Dynamic Viscosity: if (T <= Tboiling, MuL, MuV)

☒ Thermal Conductivity

Option: Value

Thermal Conductivity: if (T <= Tboiling, kL, kV)

Radiation Properties

☒ Buoyancy Properties

Option: Value

Thermal Expansivity: 0.00021 [K<sup>-1</sup>]

**Figura 51. Interfaz de ingreso de propiedades del jugo de caña en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.5.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas en los subdominios “Aletas”, “Ducto de humos”, “Paila pirotubular” y “Jugo de caña”, se detallan en las tablas 17, 18, 19 y 20. Además, en las figuras 52 a 62 se observan las interfaces de ingreso de estos datos en CFX-Pre. Tener en cuenta que los datos de acondicionamiento en la presente tesis son idénticos en los cuatro dominios computacionales considerados.

**Tabla 17. Condiciones de contorno para el subdominio “Aletas”.**

| REGIÓN                                                        | CONDICIONES DE CONTORNO                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Interface (Pared frontal, posterior, laterales y base)</b> | Solido: Acero estructural A36<br>$\dot{q}''_{Ta}$ (Flujo de calor total transmitido por los productos de combustión y las paredes internas del ducto de humos hacia las aletas). |

Fuente: Elaboración propia.

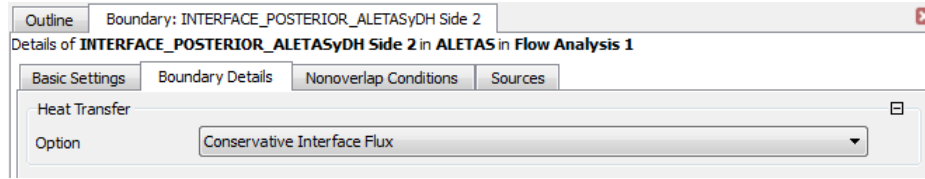


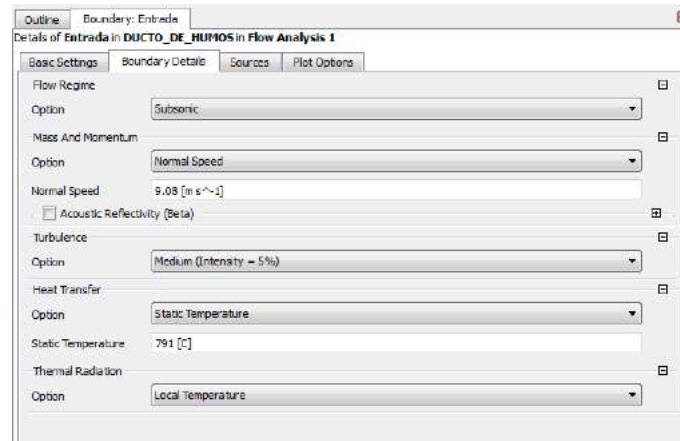
Figura 52. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface Aletas” del subdominio “Aletas” en CFX-Pre.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Condiciones de contorno para el subdominio “Ducto de Humos”.

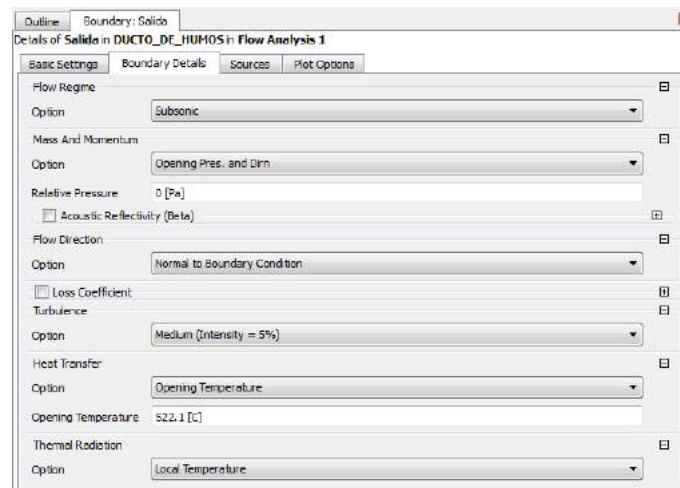
| REGIÓN                                             | CONDICIONES DE CONTORNO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Entrada                                            | <p>Fluido: productos de combustión:</p> $Y_{CO} = 0.0001, Y_{CO_2} = 0.0509, \quad Y_{H_2O} = 0.037,$ $Y_{N_2} = 0.7648, \quad Y_{O_2} = 0.1472$ $Q_{ent} = 3.247 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\bar{u}_{x,0} = 7.45 \text{ m/s})$ $\bar{T}_{ent} = 791 \text{ }^\circ\text{C}.$ $I_t = \frac{\sqrt{u_{x,0}^2}}{\bar{u}_{x,0}} = 0.05 \text{ (Intensidad turbulenta moderada).}$ $\bar{u}_n = 9.08 \text{ m/s (uniforme)}^{(*)}$ <p>(*) velocidad correspondiente al flujo másico de 0.73 kg/s</p> |
| Salida                                             | $\bar{p}_{rel} = 0 \text{ atm.}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Interfaces (Paredes inferior, lateral y superior ) | $\bar{u}_{j,p} = 0 \text{ m/s (sin deslizamiento).}$ $\bar{T}_p: \text{ variación lineal de } 591 \text{ }^\circ\text{C hasta } 322.1 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0.94 \text{ (Emisividad del ladrillo refractario).}$                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Interface (Paredes de la Paila Pirotubular)        | $\bar{u}_{j,p} = 0 \text{ m/s (sin deslizamiento).}$ $q_{Tp} \text{ (Flujo de calor total transmitido a las pailas).}$ $\varepsilon = 0.4 \text{ (Emisividad del acero inoxidable).}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Interface (Paredes de las aletas)                  | $\bar{u}_{j,p} = 0 \text{ m/s (sin deslizamiento).}$ $q_{Ta} \text{ (Flujo de calor total transmitido a las aletas).}$ $\varepsilon = 0.64 \text{ (Emisividad del acero estructural).}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Fuente: Elaboración propia.



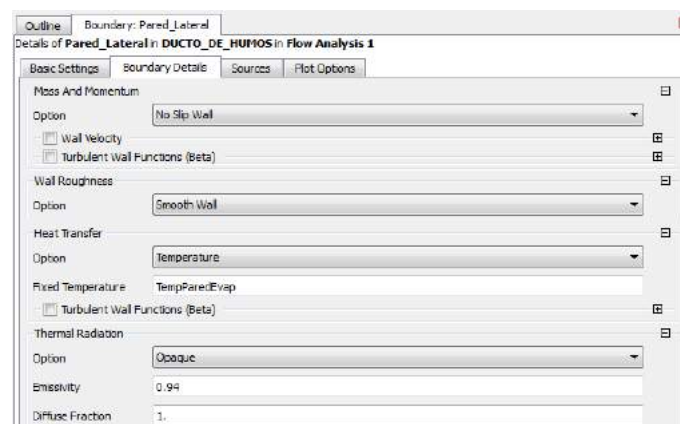
**Figura 53. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Entrada” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.



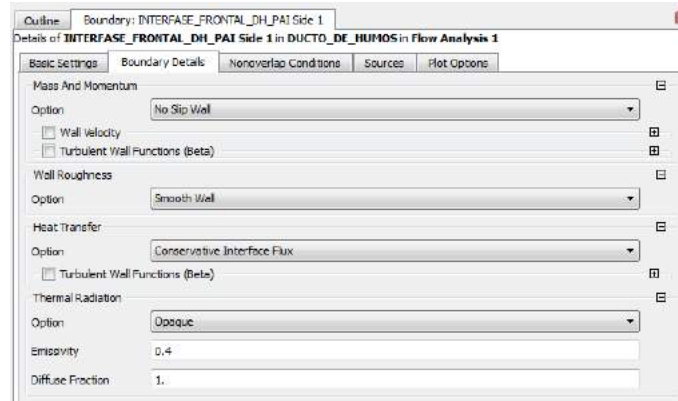
**Figura 54 Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Salida” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.



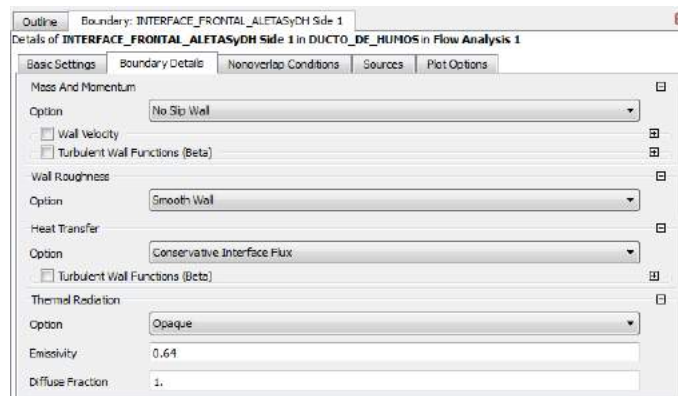
**Figura 55. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Pared lateral, inferior y superior” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 56. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface paredes de la paila pirotubular” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.



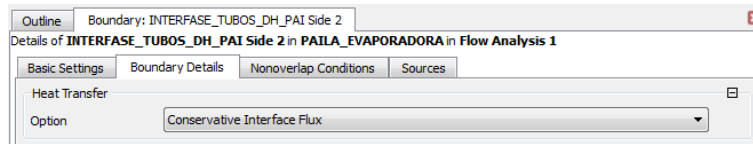
**Figura 57. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface paredes de las aletas” del subdominio “Ducto de humos” en CFX-Pre..**

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 19. Condiciones de contorno para el subdominio “Paila pirotubular”.**

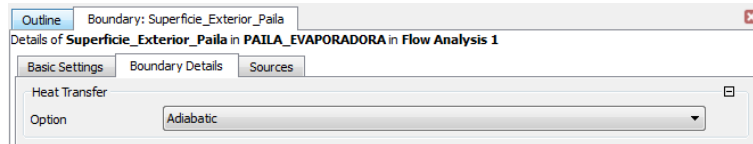
| REGIÓN                                                       | CONDICIONES DE CONTORNO                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Interface paredes internas                                   | $\dot{q}_{Tp}''$ (Flujo de calor total que proviene de los productos de combustión y las paredes internas del ducto de humos). |
| Interface (Paredes aletas)                                   | $\dot{q}_{Ta}''$ (Flujo de calor total que proviene de los productos de combustión y las paredes internas del ducto de humos). |
| Interface (Pared de la base interior de la paila aleteada I) | $-\dot{q}_{T1}''$ (Flujo de calor total que se transfiere desde la pared base al jugo de caña).                                |
| Interface (Paredes laterales de la paila aleteada I)         | $-\dot{q}_{T2}''$ (Flujo de calor que se transfiere desde la pared lateral al jugo de caña).                                   |
| Interface (Paredes de los pirotubos)                         | $-\dot{q}_{T3}''$ (Flujo de calor que se transfiere desde las paredes de los pirotubos al jugo de caña).                       |
| Interface (Paredes externas de la paila)                     | $\dot{q}'' = 0$ (Flujo de calor nulo = Pared Adiabática)                                                                       |

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 58** Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la regiones “Interface paredes internas, paredes aletas, pared de la base interior, paredes laterales y paredes de los pirotubos” del subdominio “Paila pirotubular” en CFX-Pre.

Fuente: Elaboración propia.



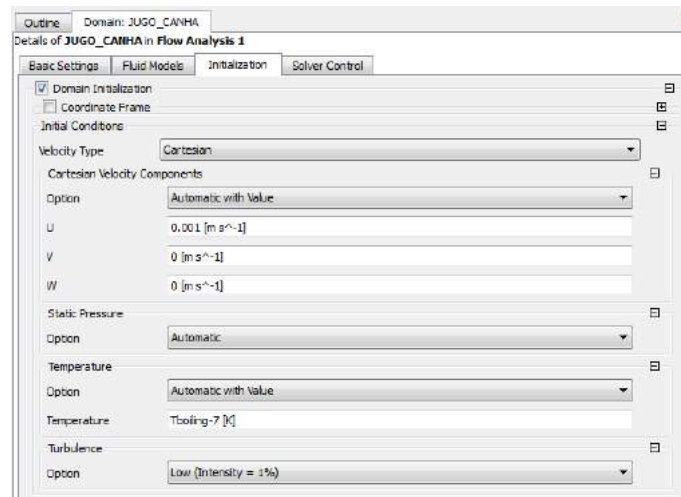
**Figura 59.** Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface paredes externas de la paila” del subdominio “Paila pirotubular” en CFX-Pre.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 20.** Condiciones inicial y de contorno para el subdominio “Jugo de caña”.

| REGIÓN                                                 | CONDICIONES DE CONTORNO                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CONDICIÓN INICIAL                                      | <p>Fluido: Jugo de Caña</p> <p><math>\bar{T}_0 = \bar{T}_{ebu} - 7 \text{ }^{\circ}\text{C. (Temperatura del jugo)}</math></p> <p><math>I_{t0} = \frac{\sqrt{u_{x,0}^2}}{\bar{u}_{x,0}} = 0.01</math> (Intensidad turbulenta baja).</p> |
| Interface (Pared de la base interior del jugo de caña) | $\dot{q}_{T1}''$ (Flujo de calor total que se transfiere desde la pared base al jugo de caña).                                                                                                                                          |
| Interfaces (Paredes laterales del jugo de caña)        | $\dot{q}_{T2}''$ (Flujo de calor que se transfiere desde la pared lateral al jugo de caña).                                                                                                                                             |
| Interface (Paredes de los pirotubos)                   | $\dot{q}_{T3}''$ (Flujo de calor que se transfiere desde las paredes de los pirotubos al jugo de caña).                                                                                                                                 |
| “Espejo de agua”                                       | <p><math>\bar{u}_{j,p} = \bar{u}_j</math> (Deslizamiento libre).</p> <p><math>\bar{T}_p = \bar{T}_{ebu} - 7 \text{ }^{\circ}\text{C. (Condición Quasi-estático)}</math>.</p>                                                            |

Fuente: Elaboración propia.



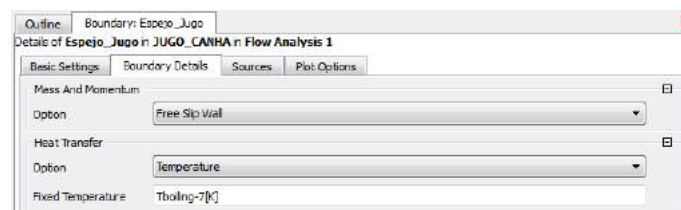
**Figura 60. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno iniciales del subdominio “Jugo de caña” en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 61. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Interface pared de la base interior del jugo de caña, paredes laterales y paredes de los piro tubos” del subdominio “Jugo de caña” en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.



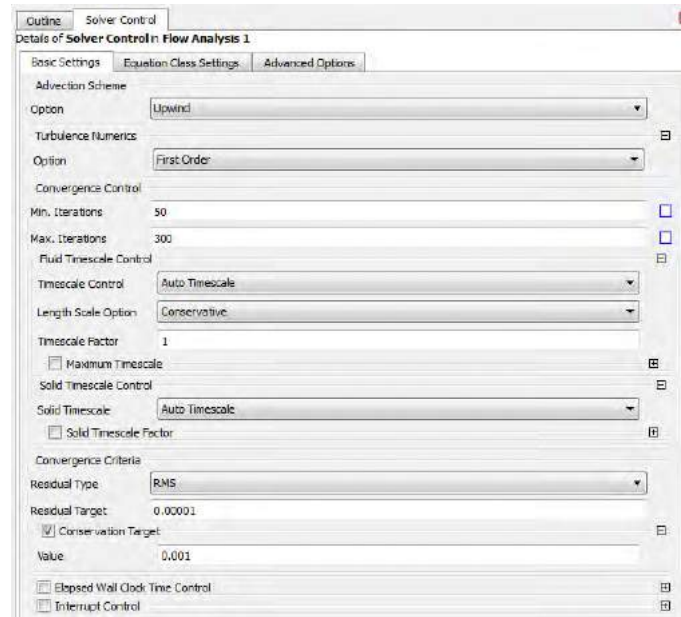
**Figura 62. Interfaz de ingreso de condiciones de contorno para la región “Espejo de agua” del subdominio “Jugo de caña” en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.5.3 Configuración del solucionador

En la figura 63 se observa la interfaz de configuración de parámetros del solucionador. Para todas las simulaciones se ha considerado una cantidad mínima de 50 y máxima de 300 iteraciones, un residuo de convergencia RMS<sup>20</sup> de  $10^{-5}$  y un control de escala de tiempo automático conservativo.

<sup>20</sup> Root Mean Square o media cuadrática. Es el promedio de los errores al cuadrado.

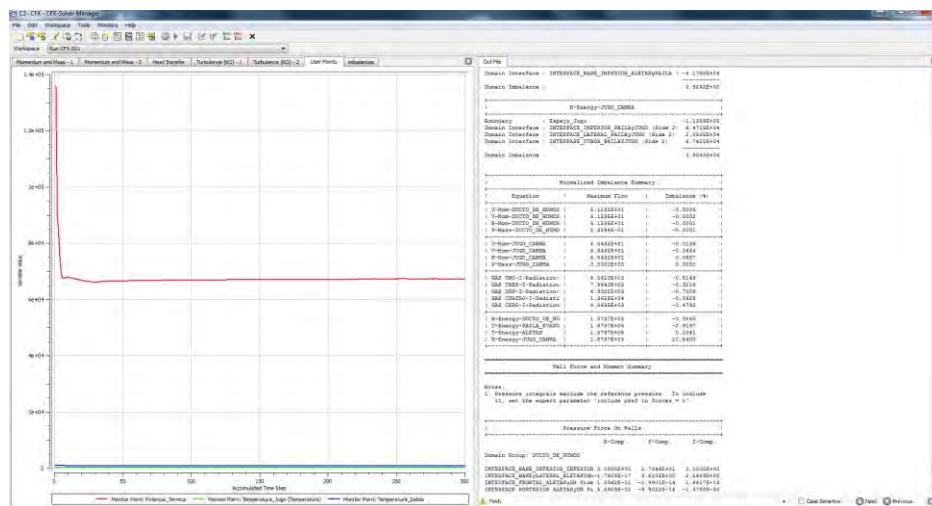


**Figura 63. Interfaz configuración de parámetros del solucionador en CFX-Pre.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.6 Solución

La solución del problema se realizó mediante el empleo del programa CFX Solver Manager de Ansys. Cabe señalar que los parámetros de configuración del solucionador se introducen previamente en CFX-Pre (ver figura 64).



**Figura 64. Interfaz de CFX Solver Manager.**

Fuente: Elaboración propia.

La simulación fue realizada mediante el empleo de 20 procesos en paralelo sobre la HPC Supermicro<sup>TM</sup> que posee procesador Intel<sup>TM</sup> Xeon<sup>TM</sup> 2670 de 20 núcleos, 2.5 Ghz de frecuencia y 32 Gb de memoria RAM.

### 3.3 Análisis estructural

Una vez terminada la simulación en ANSYS CFX, se procede a realizar el análisis estructural. Para ello se ha utilizado el programa ANSYS Static Structural.

El análisis estructural se realiza mediante el uso del Método de Elementos Finitos (FEM), el cual es similar al Método de Volúmenes Finitos, por ello, los pasos a seguir en la simulación son muy parecidos a los de CFD (ver figura 23).

A diferencia de ANSYS CFX, en el programa ANSYS Static Structural, el mallado, pre-proceso, solución y post-proceso se realizan dentro de una misma interfaz. Además, las propiedades de los materiales deben definirse antes de realizar el pre-proceso.

Las propiedades mecánicas se ingresan en la ventana Engineering Data (ver figura 65), a la que se accede a través del bloque Static Structural que se encuentra en el Workbench de ANSYS.

| Outline of Schematic E2: Engineering Data    |                                                   |                       |                    |                                                                                                 |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                              | A                                                 | B                     | C                  | D                                                                                               |
| 1                                            | Contents of Engineering Data                      |                       | Source             | Description                                                                                     |
| 2                                            | Material                                          |                       |                    |                                                                                                 |
| 3                                            | Pure Iron                                         |                       |                    | Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1 |
| 4                                            | Stainless Steel                                   |                       |                    |                                                                                                 |
| 5                                            | Structural Steel                                  |                       |                    | Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1 |
| *                                            | Click here to add a new material                  |                       |                    |                                                                                                 |
| Properties of Outline Row 4: Stainless Steel |                                                   |                       |                    |                                                                                                 |
|                                              | A                                                 | B                     | C                  | D                                                                                               |
| 1                                            | Property                                          | Value                 | Unit               |                                                                                                 |
| 2                                            | Density                                           | 7750                  | kg m <sup>-3</sup> |                                                                                                 |
| 3                                            | Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion |                       |                    |                                                                                                 |
| 4                                            | Coefficient of Thermal Expansion                  | 1.7E-05               | C <sup>-1</sup>    |                                                                                                 |
| 5                                            | Reference Temperature                             | 22                    | C                  |                                                                                                 |
| 6                                            | Isotropic Elasticity                              |                       |                    |                                                                                                 |
| 7                                            | Derive from                                       | Young's Modulus an... |                    |                                                                                                 |
| 8                                            | Young's Modulus                                   | 1.93E+11              | Pa                 |                                                                                                 |
| 9                                            | Poisson's Ratio                                   | 0.31                  |                    |                                                                                                 |
| 10                                           | Bulk Modulus                                      | 1.693E+11             | Pa                 |                                                                                                 |
| 11                                           | Shear Modulus                                     | 7.3664E+10            | Pa                 |                                                                                                 |
| 12                                           | Field Variables                                   |                       |                    |                                                                                                 |
| 13                                           | Temperature                                       | Yes                   |                    |                                                                                                 |
| 14                                           | Shear Angle                                       | No                    |                    |                                                                                                 |
| 15                                           | Degradation Factor                                | No                    |                    |                                                                                                 |
| 16                                           | Tensile Yield Strength                            | 2.07E+08              | Pa                 |                                                                                                 |
| 17                                           | Compressive Yield Strength                        | 2.07E+08              | Pa                 |                                                                                                 |

**Figura 65. Ventana Engineering Data.**

Fuente: Elaboración propia.

Los materiales utilizados para la simulación son el acero estructural A36 y el acero inoxidable AISI 304. Las propiedades relevantes para la simulación de estos materiales se encuentran en la figura 22, tabla 4 y Anexo B.

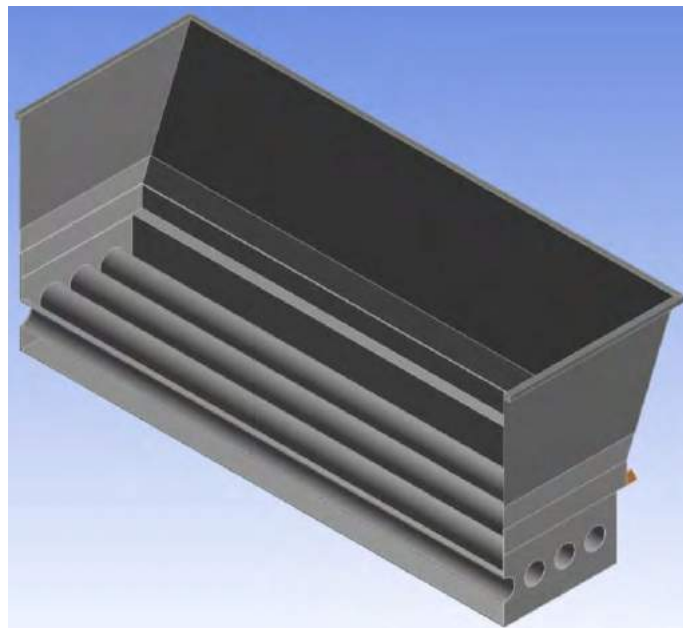
### 3.3.1 Geometría

Al igual que en el análisis fluido-dinámico, la geometría se elaboró en el programa Designmodeler de Ansys. Para este caso sólo se ha considerado el dominio “Paila pirotubular” con todos sus componentes (base, falca, perfiles y soportes estructurales).

Para la geometría utilizada en la simulación estructural, a diferencia de la simulación CFD, se debe tener en cuenta todos los detalles de diseño (radios de curvatura, cordones de soldadura, etc). El diseño de cada paila fue proporcionado por el Dr. Ing. Rafael Saavedra. Los planos de cada una se encuentran en el Anexo A.

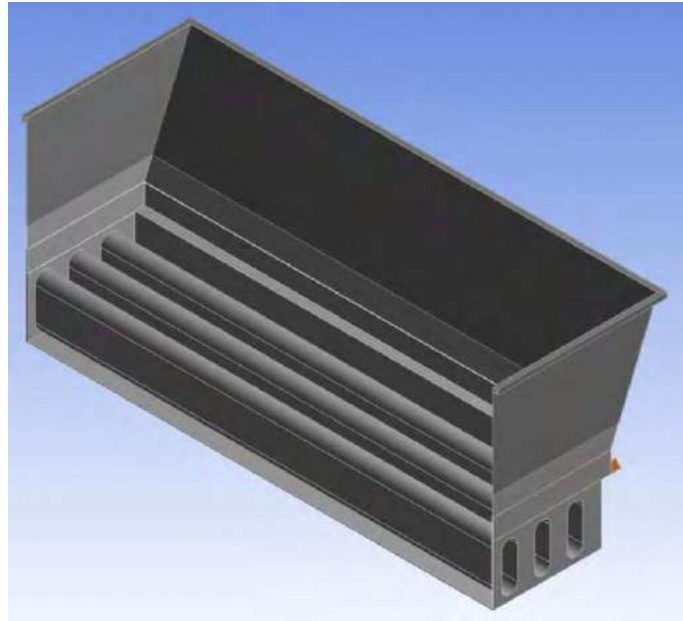
Cabe resaltar que para efectos de un máximo aprovechamiento de los recursos computacionales, sólo será empleada como dominio computacional la mitad de las geometrías que comprenden dicho subdominio, pues presenta simetría con respecto a la sección longitudinal definido por el plano ubicado en la mitad de la hornilla (plano XY).

En las figuras 66 a la 70 se muestran las geometrías en 3D de los dominios computacionales que se utilizarán para las simulaciones.



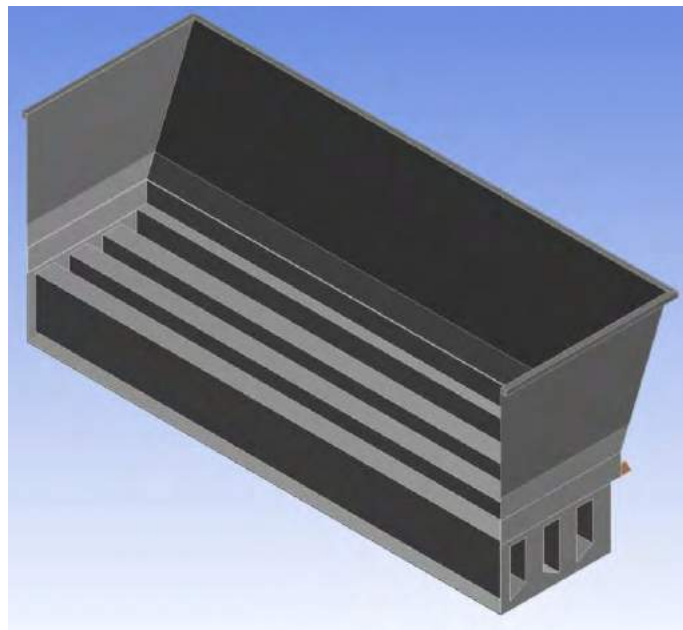
**Figura 66. Representación geométrica del dominio computacional 1: Paila pirotubular circular.**

Fuente: Elaboración propia.



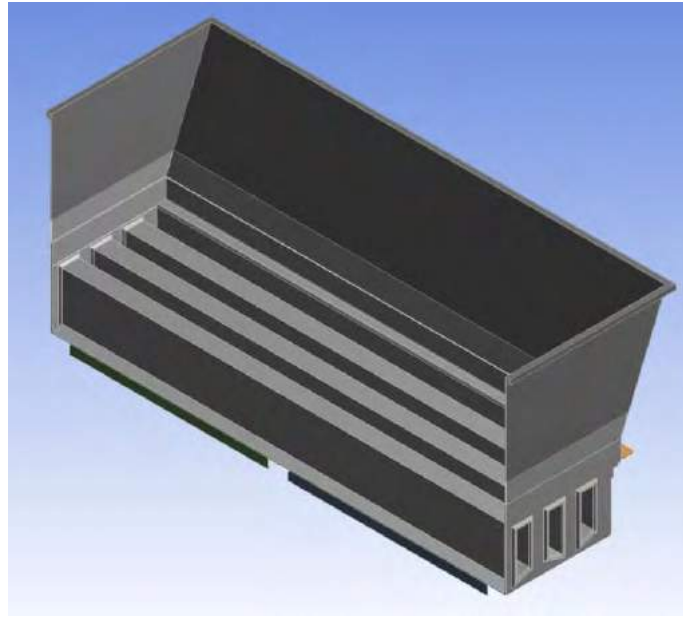
**Figura 67. Representación geométrica del dominio computacional 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.**

Fuente: Elaboración propia.

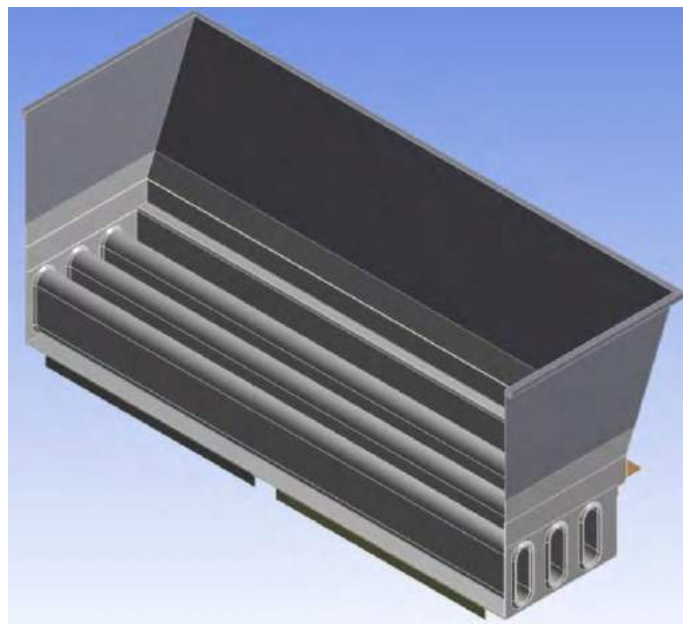


**Figura 68. Representación geométrica del dominio computacional 3: Paila pirotubular trapezoidal.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 69. Representación geométrica del dominio computacional 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.**  
Fuente: Elaboración propia.



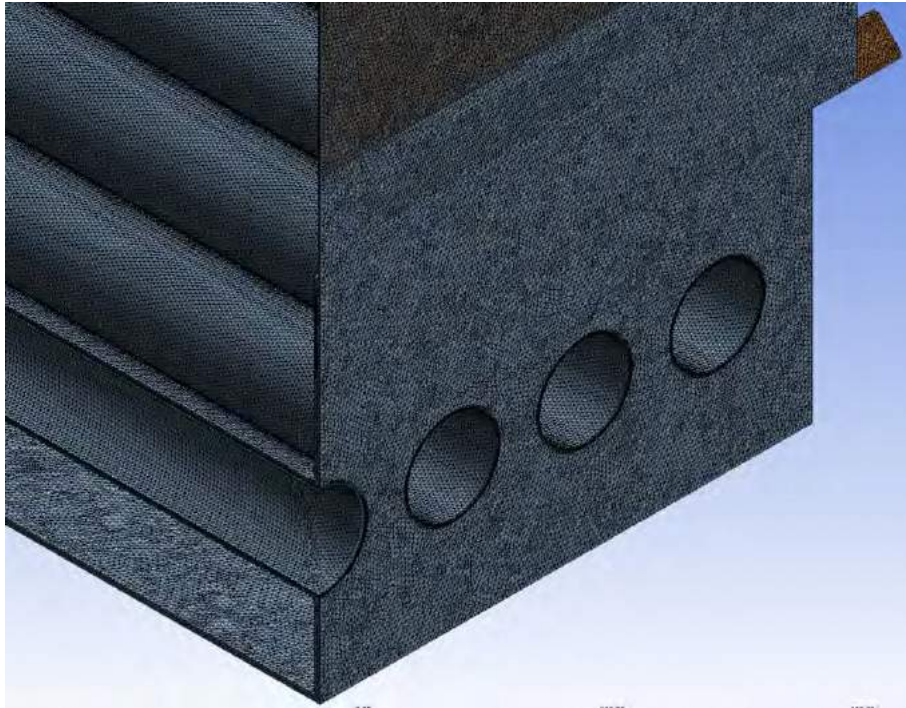
**Figura 70. Representación geométrica del dominio computacional 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.**  
Fuente: Elaboración propia.

### **3.3.2 Discretización en volúmenes finitos**

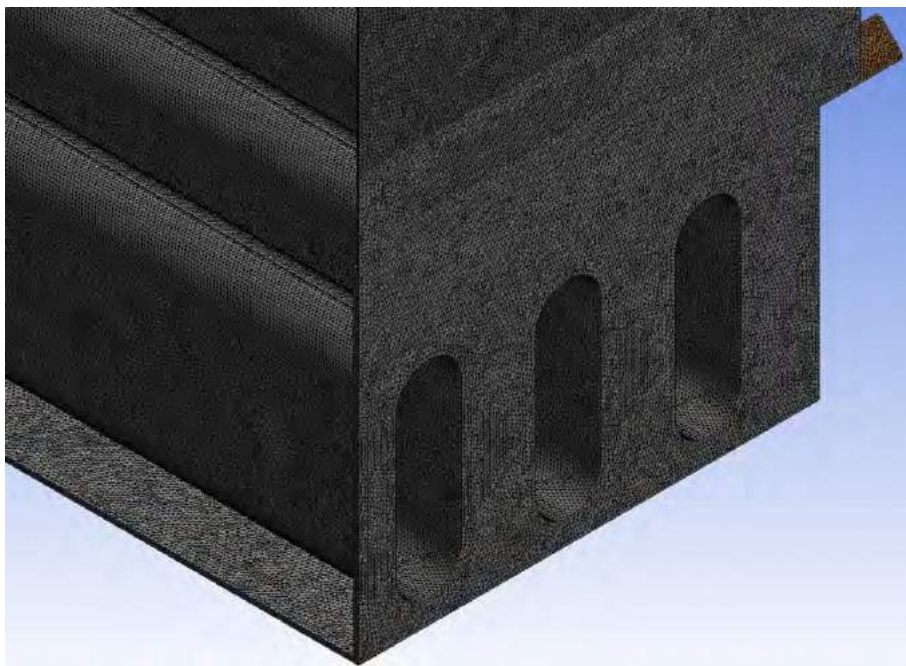
En las figuras 71 a la 75 se muestran las mallas de los dominios computacionales que se utilizarán para las simulaciones.

La generación de la malla se realizó mediante el programa ANSYS – Meshing Grid™, el cual está integrado en la interfaz del programa ANSYS Static Structural.

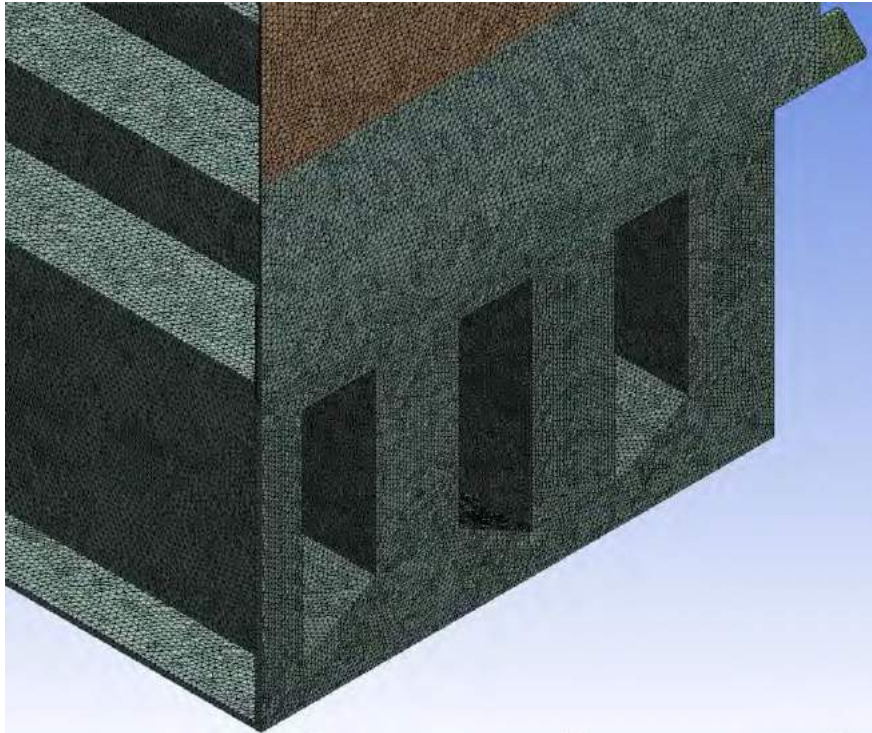
Debido al pequeño espesor de los componentes de la paila, no se modificaron los parámetros de configuración de la malla por defecto, a excepción del tamaño de elementos. Para todos los dominios se generó un aproximado de 7 millones de elementos con el fin de reducir, lo más posible, los errores de convergencia.



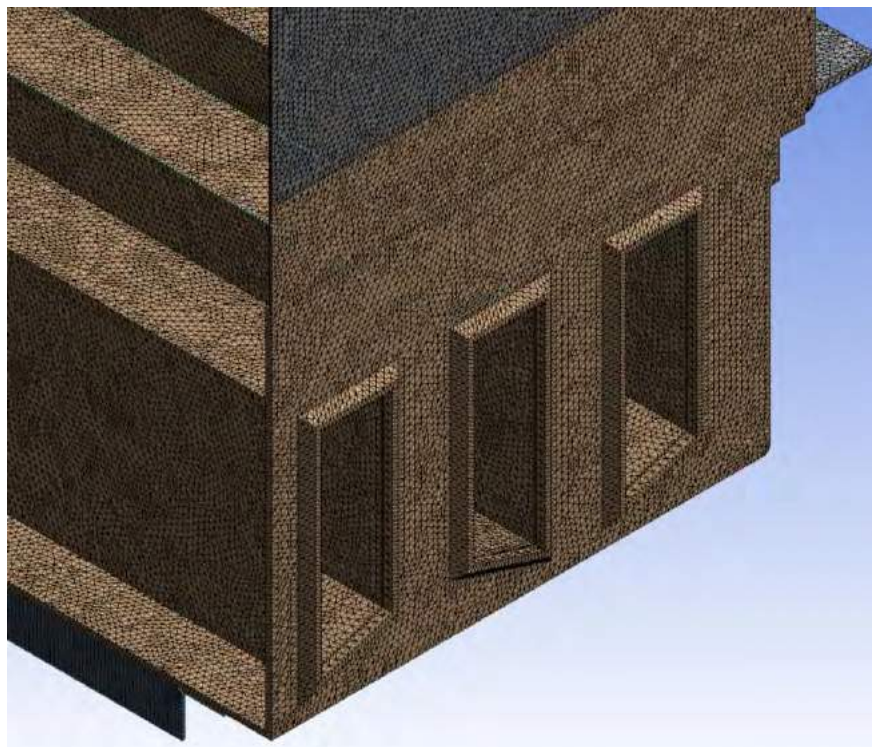
**Figura 71. Dominio 1: Paila pirotubular circular.- Detalle de la discretización.**  
Fuente: Elaboración propia.



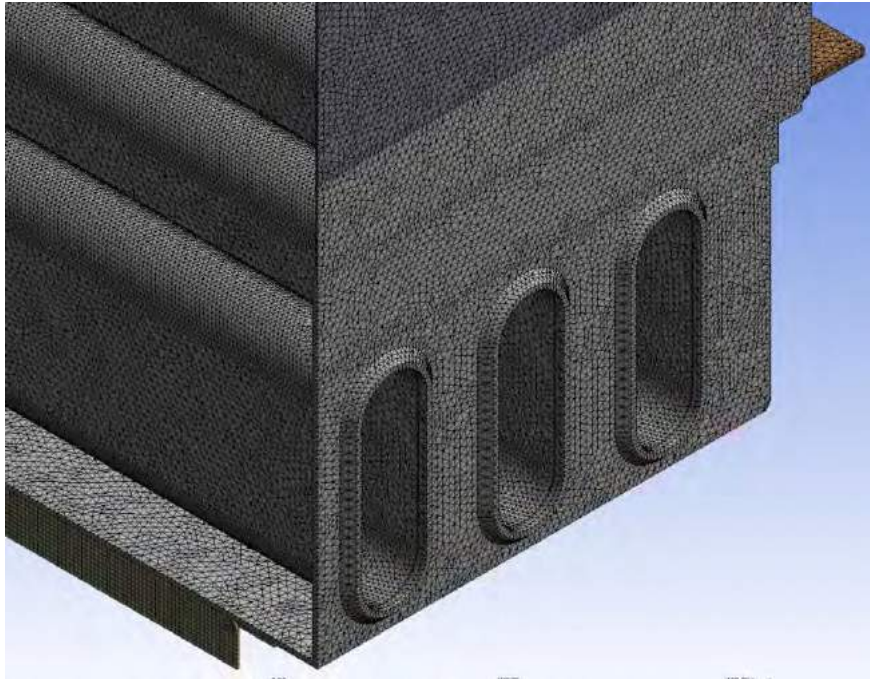
**Figura 72. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada.- Detalle de la discretización.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 73. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal.- Detalle de la discretización.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 74. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal.- Detalle de la discretización.**  
Fuente: Elaboración propia.

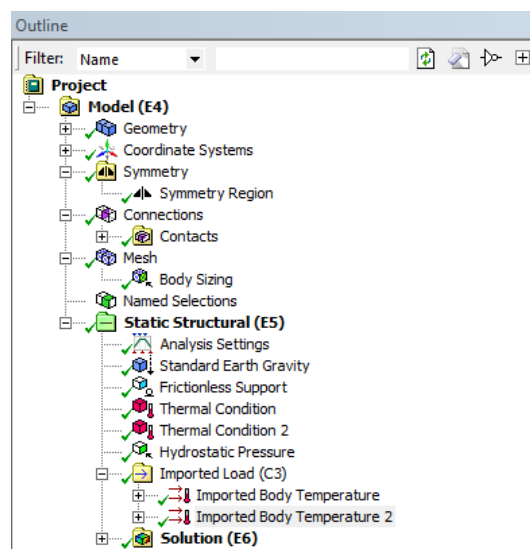


**Figura 75. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada.- Detalle de la discretización.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3 Pre-proceso

El acondicionamiento del problema para la simulación del comportamiento estructural de las pailas será efectuada en el mismo programa y es básicamente idéntico para todos los dominios computacionales.

Consiste, principalmente, en definir las simetrías, el tipo de contactos, los soportes y cargas (ver figura 76). A continuación se describen brevemente las condiciones empleadas para las simulaciones:



**Figura 76. Outline del programa Mechanical Static Structural.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3.1 Simetría

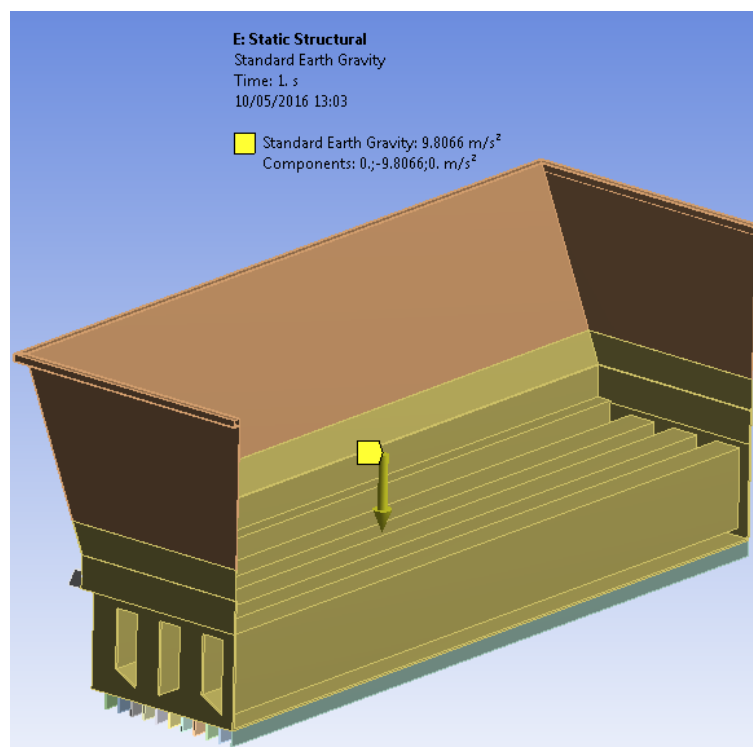
Debido a que sólo se ha utilizado la mitad de la paila con el fin de reducir el costo computacional, es necesario especificar qué región se ha tomado como plano de simetría. La condición de simetría o “Symmetry” en inglés, es equivalente a establecer una condición de soporte fijo sin fricción, con la diferencia de que es necesario establecer la dirección normal de la región de simetría.

### 3.3.3.2 Contactos

Al tratarse de un ensamblaje (base, falca y soportes), es necesario definir condiciones de contacto entre cada componente para describir el movimiento relativo entre cada uno. Para el caso de estudio se utilizó la opción “Bonded”. Las regiones con este tipo de contacto pueden ser consideradas como pegadas, impidiendo un desplazamiento y/o separación entre las regiones en contacto. Para muchas aplicaciones, este tipo de contacto es suficiente para el cálculo de esfuerzos en partes soldadas de ensamblajes.

### 3.3.3.3 Gravedad

La gravedad o “Standard Earth Gravity” puede ser aplicada como una carga inercial y su dirección sólo puede ser definida en cualquiera de los tres ejes de las coordenadas globales. Ya que la gravedad es definida como una aceleración, ésta define su dirección como opuesta a la fuerza gravitacional que genera (ver figuras 77 y 78).



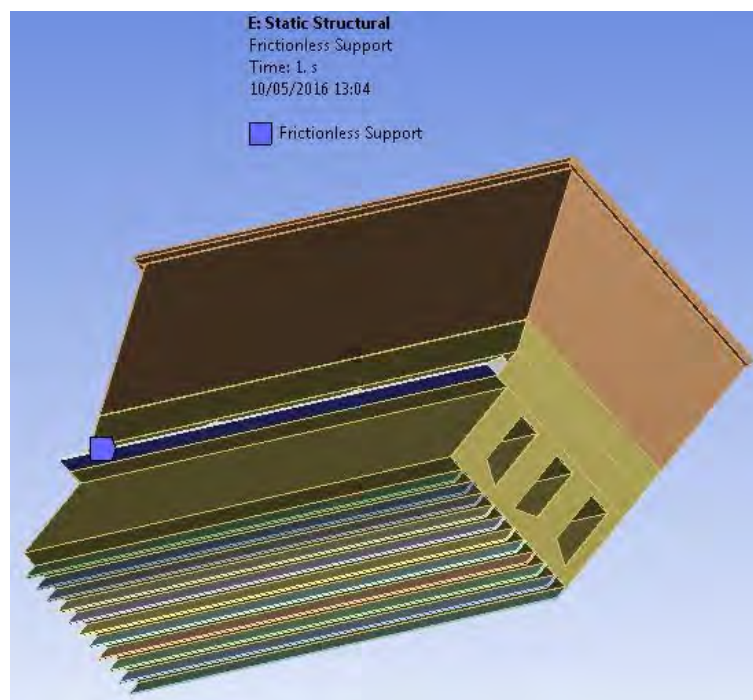
**Figura 77. Condición Standard Earth Gravity.**  
Fuente: Elaboración propia.

| Details of "Standard Earth Gravity" |                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Scope                               |                                   |
| Geometry                            | All Bodies                        |
| Definition                          |                                   |
| Coordinate System                   | Global Coordinate System          |
| X Component                         | 0. m/s <sup>2</sup> (ramped)      |
| Y Component                         | -9.8066 m/s <sup>2</sup> (ramped) |
| Z Component                         | 0. m/s <sup>2</sup> (ramped)      |
| Suppressed                          | No                                |
| Direction                           | -Y Direction                      |

**Figura 78. Detalles de Standard Earth Gravity.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3.4 Soporte fijo sin fricción

En el trapiche la paila reposa en el ducto de humos a través de los soportes estructurales. Considerando la fuerza de fricción entre el soporte y ducto de humos como despreciable, el comportamiento de esta región de contacto se puede modelar como un soporte fijo sin fricción o “Frictionless Support” en inglés (ver figura 79). De esta manera se restringe el desplazamiento de la paila en la dirección normal al plano.

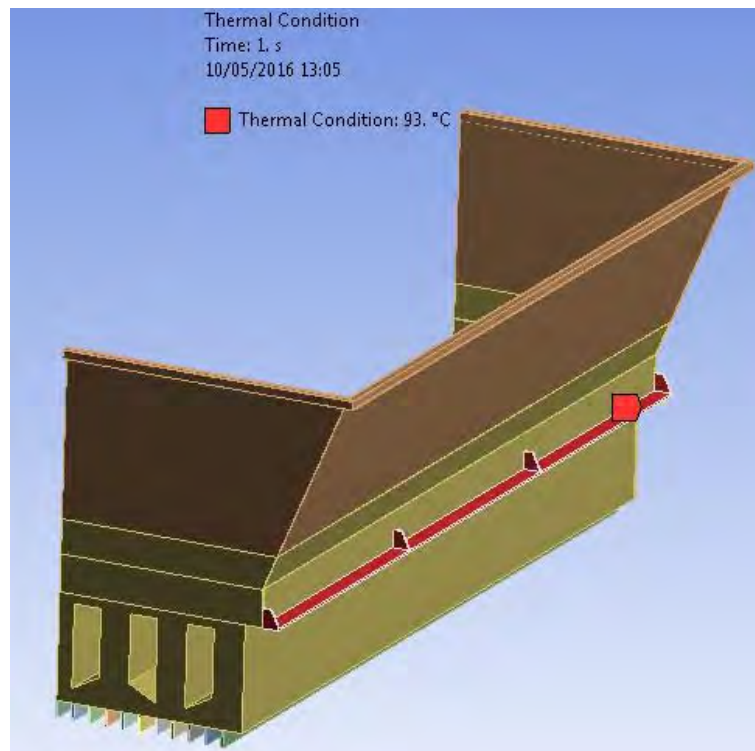


**Figura 79. Condición Frictionless Support.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3.5 Condiciones térmicas

En la simulación fluido dinámica no se han considerado los soportes ni la falca de la paila, por lo tanto no se dispone de datos del perfil de temperatura en estos cuerpos. Por ello, se ha modelado su temperatura, aproximándola a la temperatura más cercana disponible.

Para el caso de los soportes se ha decidido modelarlos con una temperatura uniforme, ya que tienen un tamaño y espesor pequeño (ver figuras 80 y 81). En la falca se ha decidido modelarlo a través de un perfil de temperatura debido a su gran longitud (ver figura 82 y 83).



**Figura 80. Condición térmica de los soportes.**  
Fuente: Elaboración propia.

| Details of "Thermal Condition"     |                    | ⌵ |
|------------------------------------|--------------------|---|
| [-] Scope                          |                    |   |
| Scoping Method                     | Geometry Selection |   |
| Geometry                           | 1 Body             |   |
| [-] Definition                     |                    |   |
| Type                               | Thermal Condition  |   |
| <input type="checkbox"/> Magnitude | 93. °C (ramped)    |   |
| Suppressed                         | No                 |   |

**Figura 81. Detalles de la condición térmica de los soportes para el dominio 4.**  
Fuente: Elaboración propia.

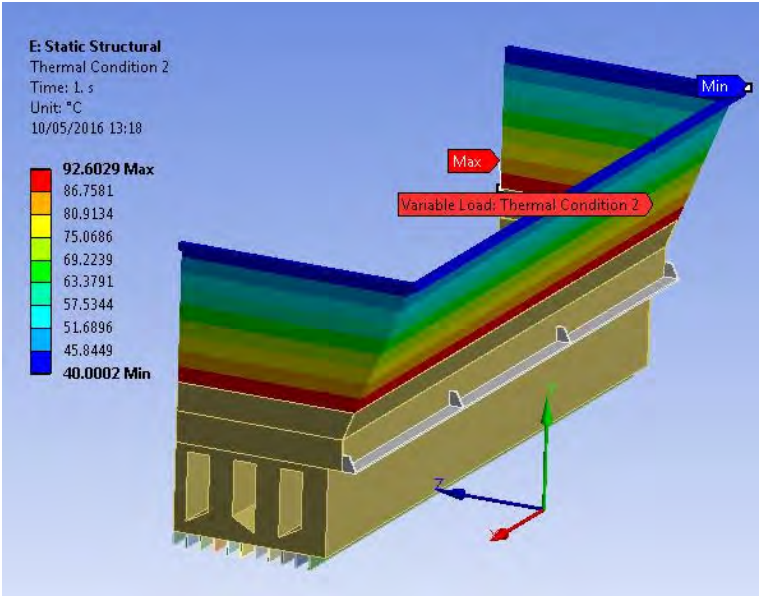


Figura 82. Condición térmica de la falca.  
Fuente: Elaboración propia.

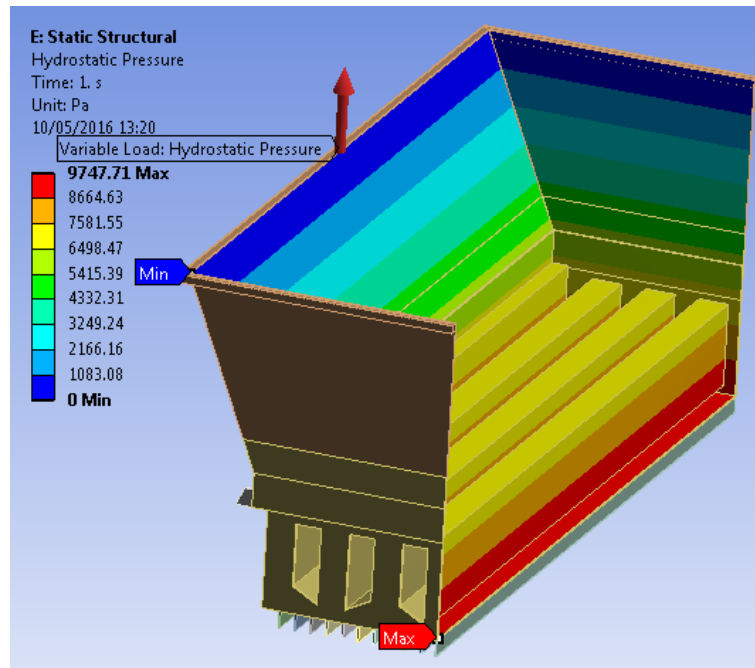
| Details of "Thermal Condition 2" |                                                     |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Scope                            |                                                     |
| Scoping Method                   | Geometry Selection                                  |
| Geometry                         | 1 Body                                              |
| Definition                       |                                                     |
| Type                             | Thermal Condition                                   |
| Magnitude                        | = 256.716151-0.108*y                                |
| Suppressed                       | No                                                  |
| Function                         |                                                     |
| Unit System                      | Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius |
| Angular Measure                  | Degrees                                             |
| Coordinate System                | Global Coordinate System                            |
| Graph Controls                   |                                                     |
| X-Axis                           | Y                                                   |
| Range Minimum                    | 0. m                                                |
| Range Maximum                    | 1. m                                                |
| Number Of Segments               | 200.                                                |

Figura 83. Detalles de la condición térmica de la falca para el dominio 4.  
Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.6 Presión hidrostática

Se ha aplicado la condición Presión Hidrostática o “Hydrostatic Pressure” en inglés (ver figura 84), la cual aplica una carga a una superficie que varía linealmente para simular la fuerza que ejerce un fluido sobre una estructura, considerando el peor de los casos (paila llena de jugo).

Es necesario especificar la magnitud y dirección de la aceleración, la densidad del fluido y las superficies sobre las cuales se ejerce la presión. Para el caso de estudio se ha considerado una densidad relativa del jugo de caña igual a 1 (ver figura 85).



**Figura 84. Condición Hydrostatic Pressure.**  
 Fuente: Elaboración propia.

| Details of "Hydrostatic Pressure"      |                                |
|----------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Scope</b>                           |                                |
| Scoping Method                         | Geometry Selection             |
| Geometry                               | 33 Faces                       |
| <b>Definition</b>                      |                                |
| Type                                   | Hydrostatic Pressure           |
| Coordinate System                      | Global Coordinate System       |
| Suppressed                             | No                             |
| <input type="checkbox"/> Fluid Density | 1000. kg/m <sup>3</sup>        |
| <b>Hydrostatic Acceleration</b>        |                                |
| Define By                              | Components                     |
| <input type="checkbox"/> X Component   | 0. m/s <sup>2</sup> (ramped)   |
| <input type="checkbox"/> Y Component   | 9.81 m/s <sup>2</sup> (ramped) |
| <input type="checkbox"/> Z Component   | 0. m/s <sup>2</sup> (ramped)   |
| <b>Free Surface Location</b>           |                                |
| <input type="checkbox"/> X Coordinate  | 2.4363 m                       |
| <input type="checkbox"/> Y Coordinate  | 2.0046 m                       |
| <input type="checkbox"/> Z Coordinate  | -1.2459 m                      |
| Location                               | Click to Change                |

**Figura 85. Detalles de la Presión Hidrostática.**  
 Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3.7 Cargas importadas

Son todas a aquellas condiciones importadas, en este caso, desde ANSYS CFX. La única condición de relevancia para el análisis estructural del presente estudio son los perfiles de temperatura tanto de la base de la paila como de las aletas (según el caso) ya que la presión ejercida por los gases de combustión es depreciable (ver figuras 86 y 87).

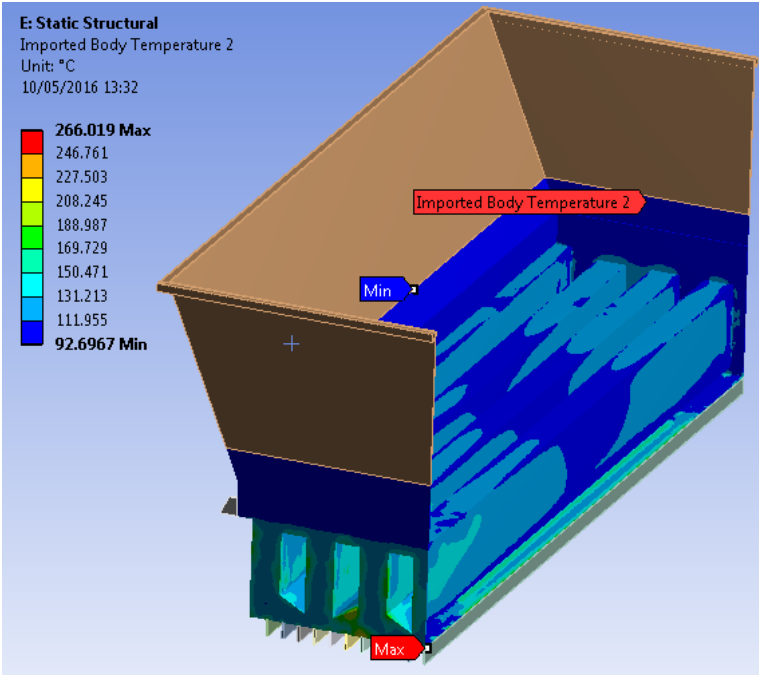


Figura 86. Perfil de temperatura de la base de la paila.  
Fuente: Elaboración propia.

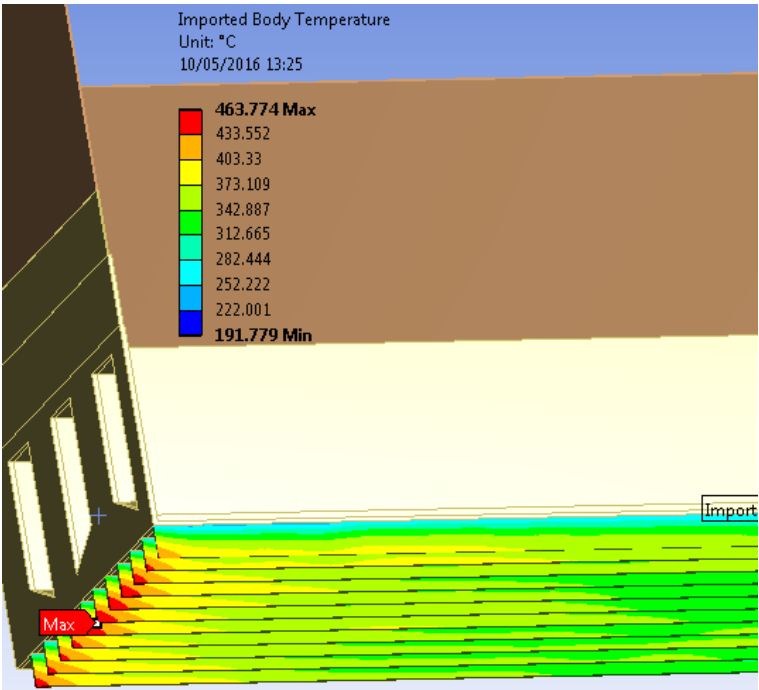


Figura 87. Perfil de temperatura de las aletas de la paila.  
Fuente: Elaboración propia.

## **Capítulo 4**

### **Resultados**

En esta sección se validarán y discutirán los resultados tanto del análisis fluido dinámico como del estructural de las simulaciones en régimen permanente correspondientes a los tipos de pailas pirotubulares explicadas en el capítulo anterior.

La validación de los resultados obtenidos en las simulaciones indica que la geometría, malla, modelo matemático, condiciones de contorno y precisión del solucionador son las adecuadas. Asimismo, nos indica que estos resultados predicen el comportamiento de las pailas con sólo un pequeño margen de error.

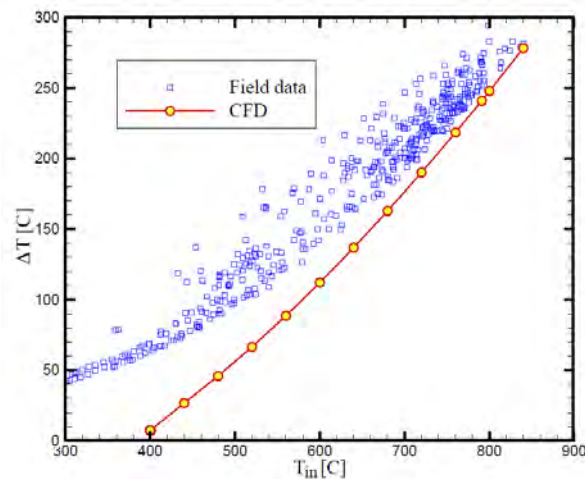
Finalmente, se realizará una comparación de los parámetros de diseño más importantes para cada paila con el objetivo de seleccionar la más eficiente.

#### **4.1 Validación del modelo**

Como se mencionó en un principio, la presente tesis busca predecir el comportamiento térmico, fluidodinámico y estructural de diferentes tipos de pailas pirotubulares sometidas a las mismas condiciones que la paila aleteada de la referencia [1] y de esta manera seleccionar la paila que tenga el mejor comportamiento con respecto a la eficiencia térmica, comportamiento de flujo y esfuerzos térmicos.

Debido a que las condiciones de frontera, propiedades y modelos utilizados son los mismos, la validación del modelo CFD realizada en el Capítulo 4 de la referencia [1], validaría los resultados obtenidos en el presente trabajo.

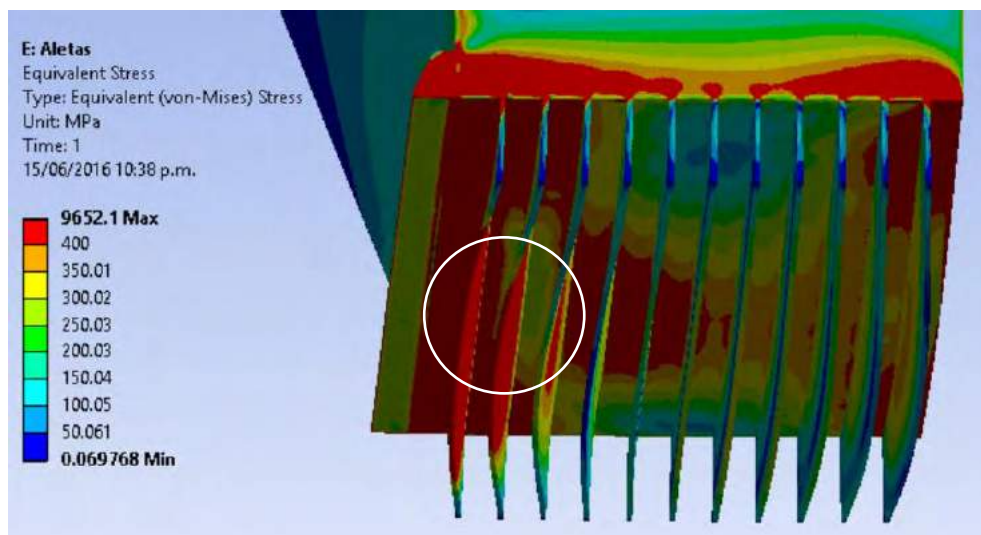
Como se explica en la referencia [1], la validación del modelo CFD se realiza mediante la comparación entre mediciones de campo y los resultados obtenidos en las simulaciones en lo que respecta a la caída de temperatura entre la entrada y salida del dominio. Se observa que las predicciones del modelo CFD utilizado son bastante buenas para temperaturas mayores a 600°C (ver figura 88).



**Figura 88. Comparación entre resultados de simulación CFD y mediciones de campo correspondiente a la caída de temperatura de los gases productos de combustión. Como función de las temperaturas de entrada para la paila aleteada evaporadora de la referencia [1].**

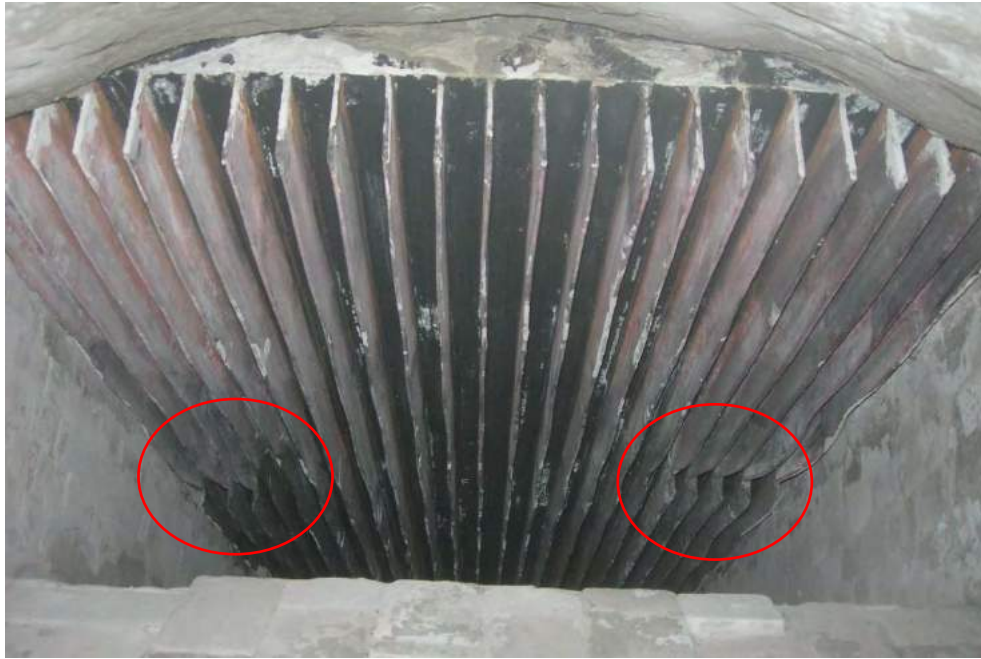
Fuente: Modelación numérica del proceso de transferencia de calor en intercambiadores de calor abiertos utilizados en la industria panelera [1].

En cuanto al análisis estructural, se ha validado cualitativamente mediante la comparación del comportamiento de la paila ante las elevadas temperaturas y los esfuerzos térmicos generados entre la paila aleteada puesta en operación y los resultados obtenidos en la simulación. Como se observa, los resultados obtenidos mediante la simulación en ANSYS Static Structural (ver figura 89), corresponden con las fallas estructurales en las aletas de la paila en operación (ver figura 90).



**Figura 89. Resultados de la simulación estructural correspondientes al esfuerzo equivalente para la paila aleteada evaporadora de la referencia [1].**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 90. Fotografía de las aletas de la paila aleteada evaporadora de la referencia [1].**  
Fuente: Elaboración propia.

## **4.2 Resultados del análisis fluidodinámico**

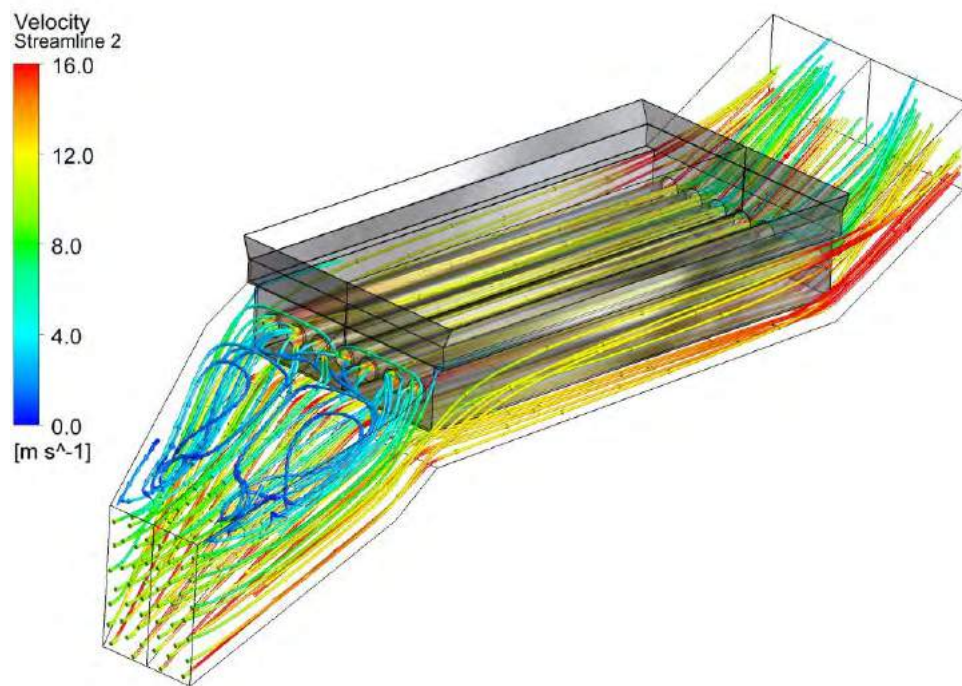
Luego de ser validado el modelo CFD, son detallados los resultados de los cinco casos mostrados en la presente tesis. Los parámetros de interés para el diseño y selección son el campo de velocidades y temperaturas, temperatura en la sección longitudinal del ducto, potencia térmica cedida a la paila y temperaturas en la superficie de la paila.

### **4.2.1 Campo de velocidades**

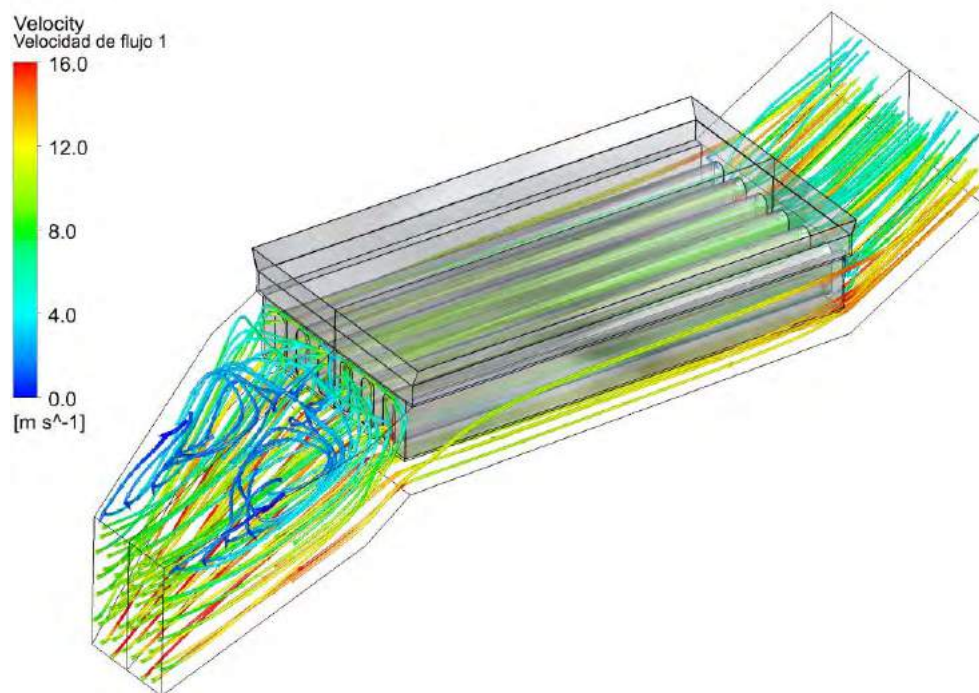
En las figuras 91 a la 95 se observan las líneas de corriente de los gases productos de combustión dentro del ducto de humos, las cuales nos brindan información de la trayectoria y velocidad del flujo.

Como se puede observar, los gases son comprimidos debido a la presencia de la rampa, lo que tiene como consecuencia una depresión y se manifiesta como una recirculación del flujo. Luego, una parte del flujo es re-direccionado con dirección paralela al ducto de humos hacia los pirotubos y la otra en la parte inferior y laterales de la paila. Aquí, se puede apreciar que sólo un pequeño porcentaje del flujo circula a través de los pirotubos.

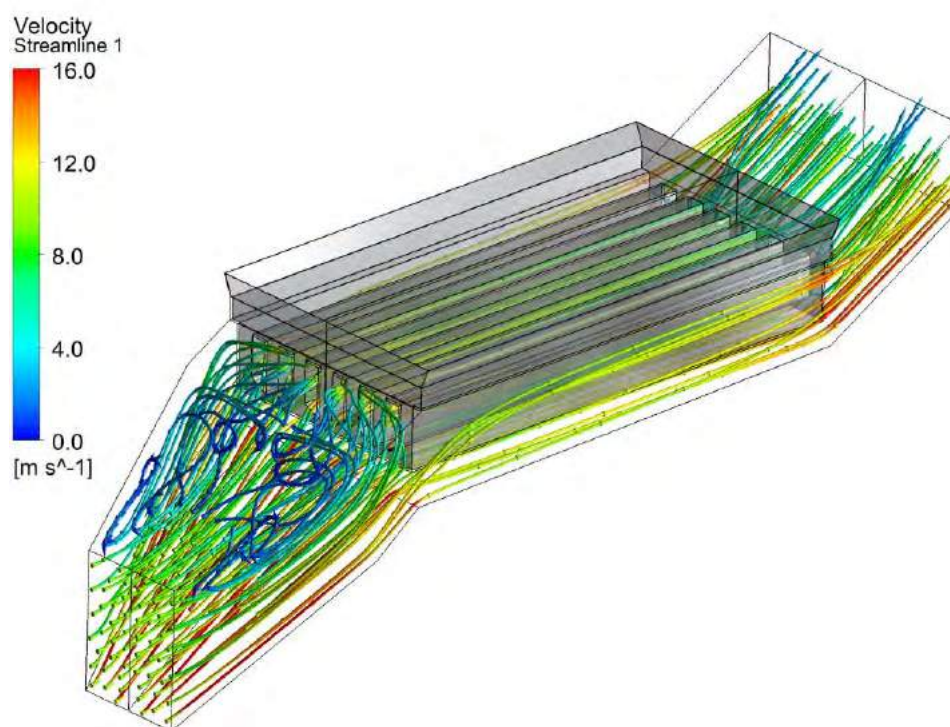
Mientras mayor sea el porcentaje de flujo que circula a través de los pirotubos, más eficiente será la paila. Esto se debe a que el área de transferencia de calor de la paila corresponde en su mayor parte a los pirotubos, por lo tanto mayor calor será transferido a la paila cuanto mayor sea el flujo que circule por los pirotubos.



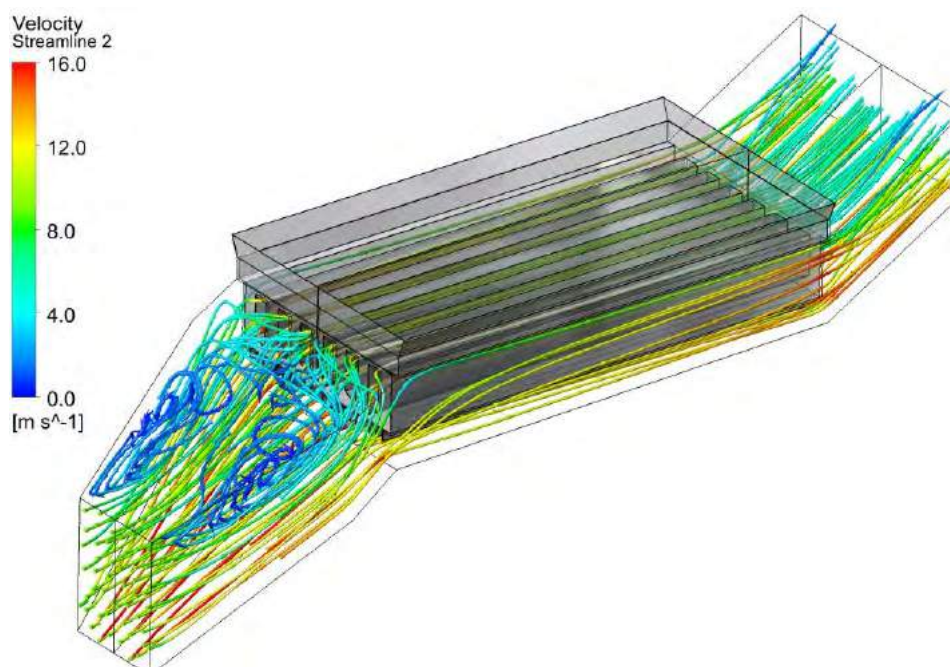
**Figura 91. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad.**  
Fuente: Elaboración propia.



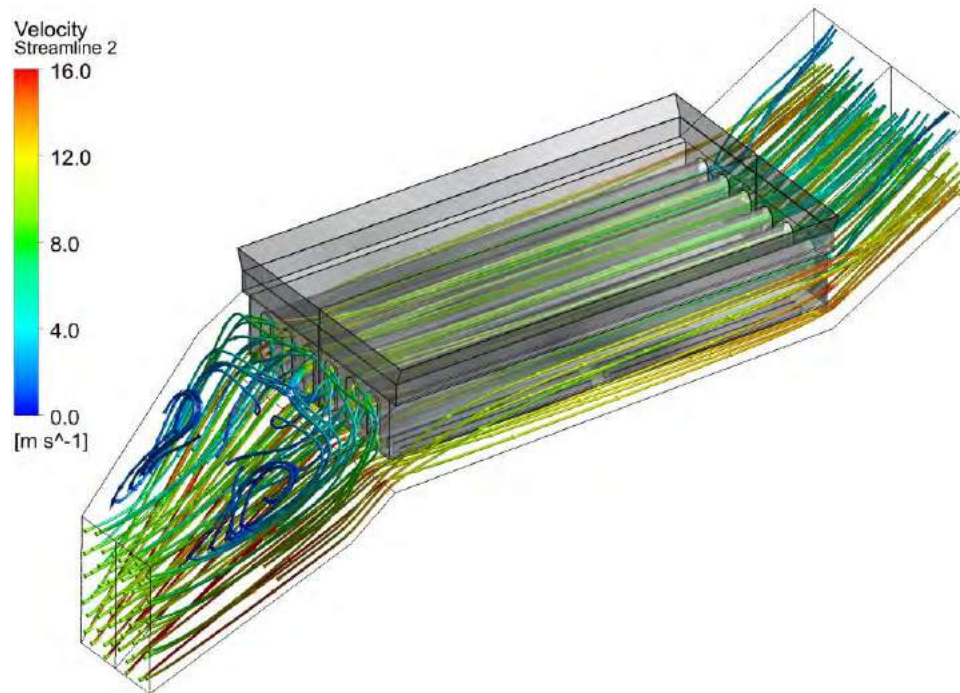
**Figura 92. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 93. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 94. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 95. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la velocidad.**

Fuente: Elaboración propia.

El campo de velocidades en todas las pailas es prácticamente el mismo para todas las pailas con excepción del porcentaje de flujo que pasa a través de los pirotubos. Por ello, al momento de selección se debe tener presente este parámetro.

#### 4.2.2 Campo de temperaturas

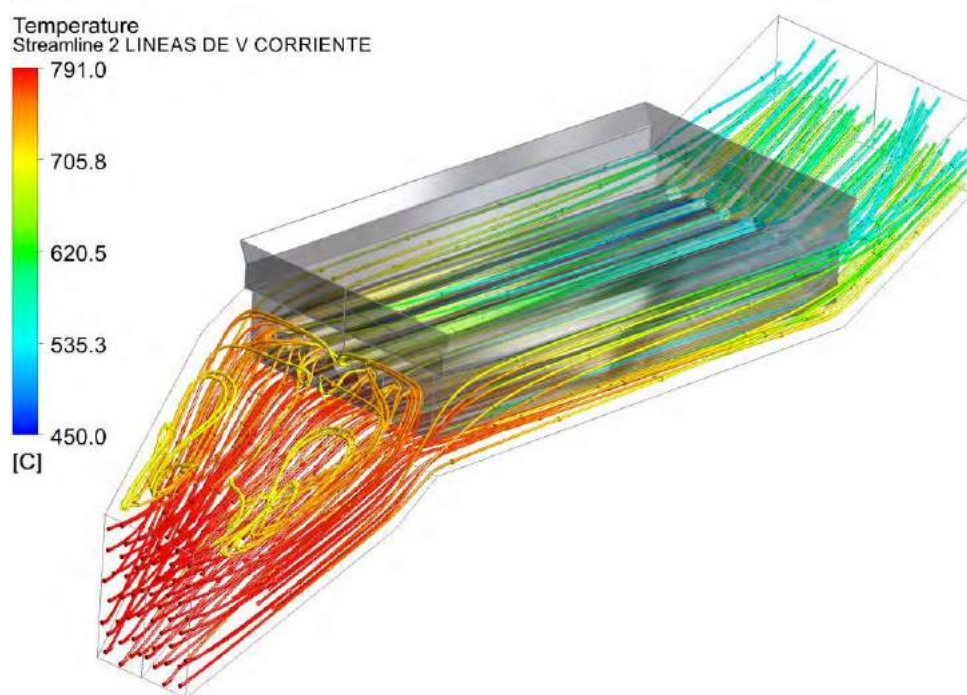
La distribución del campo de temperaturas en las líneas de corriente, en la sección longitudinal del ducto y en las superficies de transferencia de calor en las pailas nos indican cuánto ha disminuido la temperatura a lo largo del ducto como consecuencia del calor transferido hacia las pailas y en menor medida a las paredes del ducto. Además nos indican la distribución de temperaturas en la superficie de la paila lo que será de utilidad al relacionar los esfuerzos térmicos como se explicará más adelante.

Para la paila pirotubular evaporadora tiene importancia tanto el mecanismo de radiación como de convección debido a la alta temperatura de los gases productos de combustión en este tramo del ducto de humos [1].

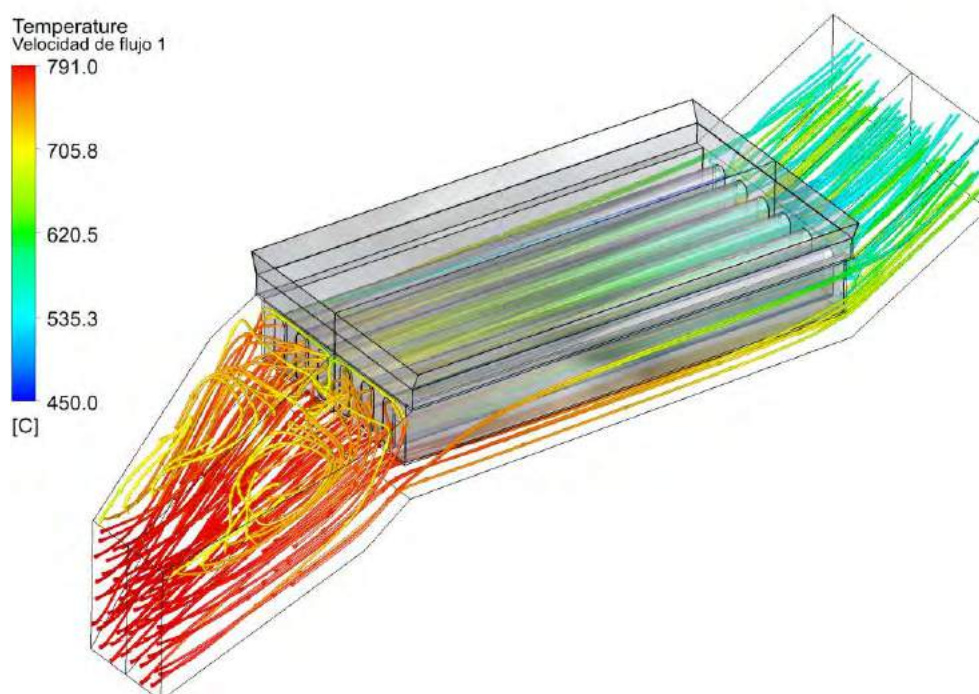
##### 4.2.2.1 En el ducto de humos

En las figuras 96 a la 100 se pueden apreciar las líneas de corriente de los gases productos de combustión que brindan información de la trayectoria y distribución de temperaturas a lo largo de éstas.

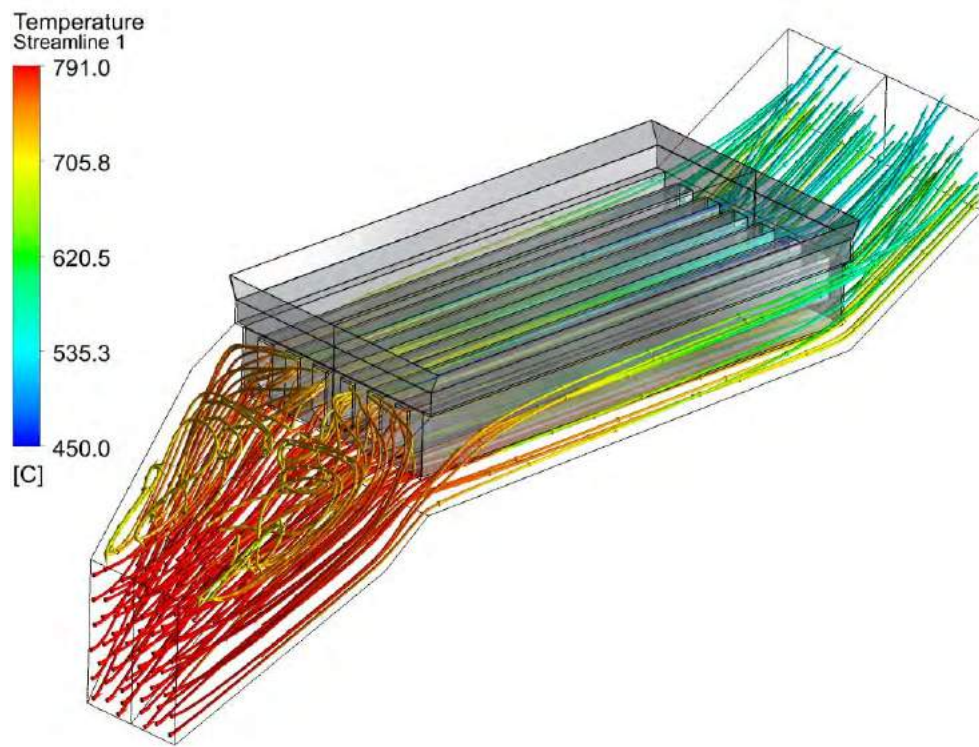
Como se puede observar, antes de entrar en contacto con la paila, la temperatura es prácticamente constante. En el instante que entra en contacto con la paila la temperatura decrece y lo hace con mayor tasa en el flujo que pasa por los pirotubos. Esto nos muestra la eficiencia de los pirotubos en el proceso de transferencia de calor.



**Figura 96. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura.**  
Fuente: Elaboración propia.

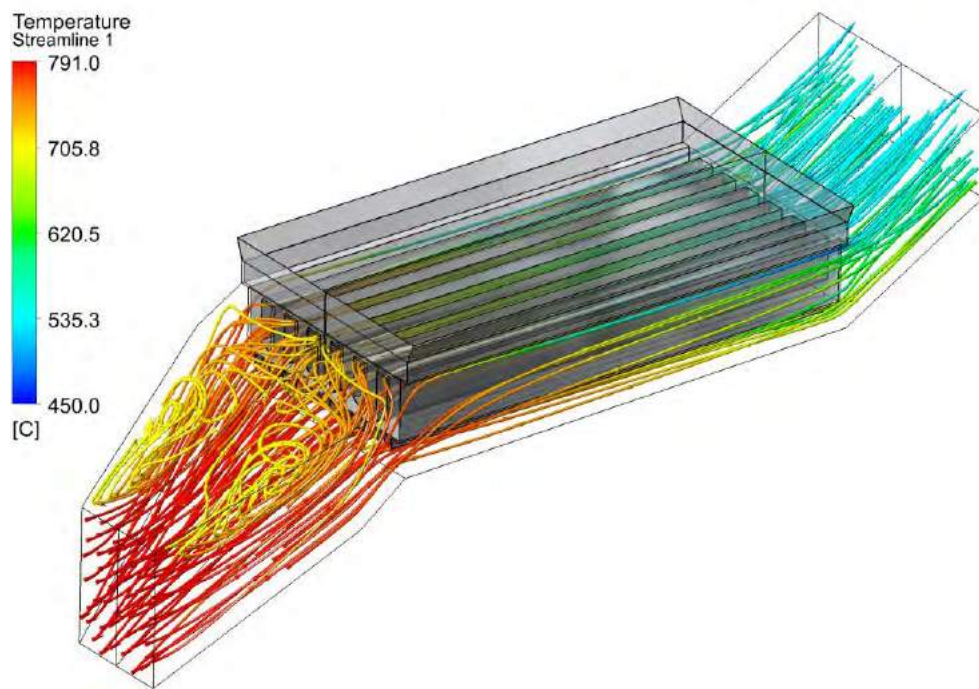


**Figura 97. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura.**  
Fuente: Elaboración propia.



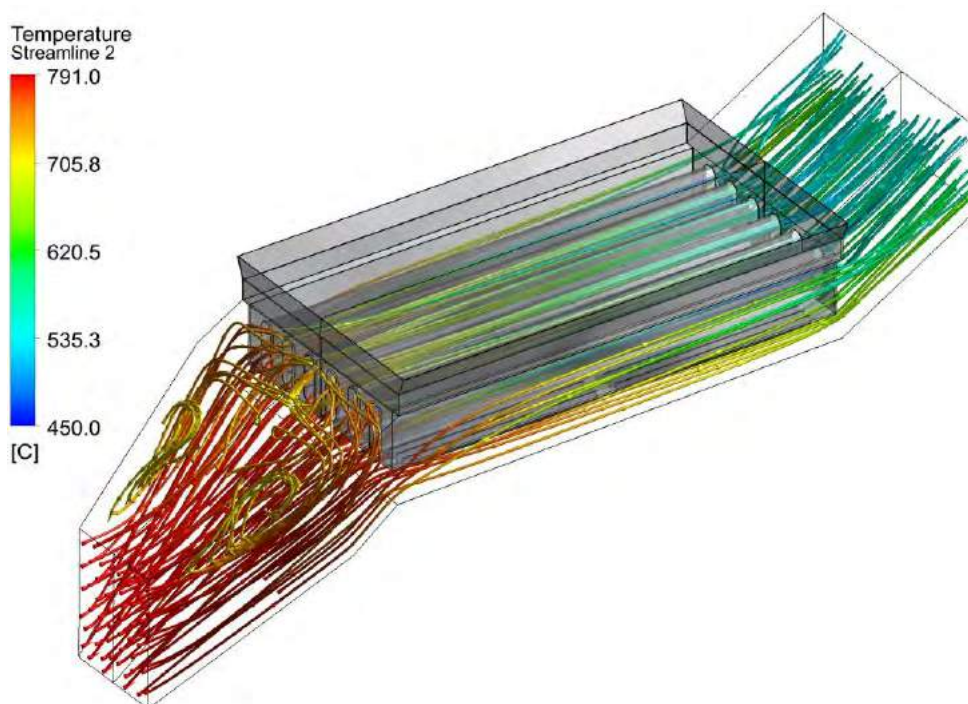
**Figura 98. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 99. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 100. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Líneas de corriente coloreadas de acuerdo a la temperatura.**

Fuente: Elaboración propia.

En el tramo final del dominio, las líneas de corriente muestran un comportamiento casi uniforme tanto en magnitud como dirección consecuencia del equilibrio térmico que alcanzan los flujos provenientes de los pirotubos y de las regiones del ducto de humos inferior y laterales a la paila.

Un parámetro importante para la selección de la paila es la temperatura de salida de los gases, la cual no es otra que la temperatura promedio en la sección de salida de los dominios y nos da una idea de la cantidad de calor de los gases productos de combustión aprovechado por la paila.

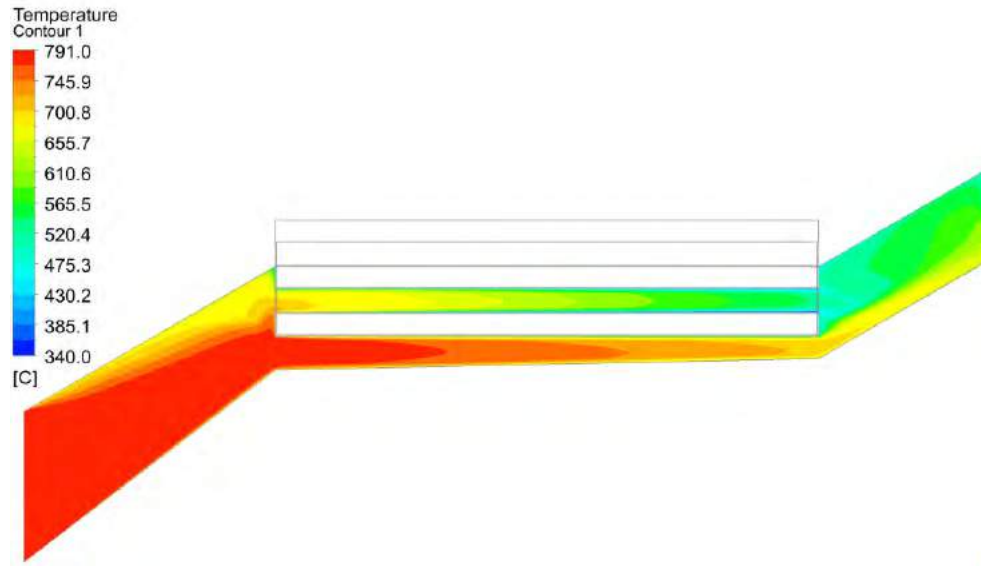
#### **4.2.2.2 En la sección longitudinal del ducto<sup>21</sup>**

El perfil de temperaturas de la sección transversal que corresponde al plano de simetría del ducto de humos de cada paila se muestran en la figuras 101 a la 105. Como se puede observar, los gases productos de combustión al circular por el ducto de humos, ceden calor hacia las paredes del mismo y la paila, esto se manifiesta en la disminución de su temperatura.

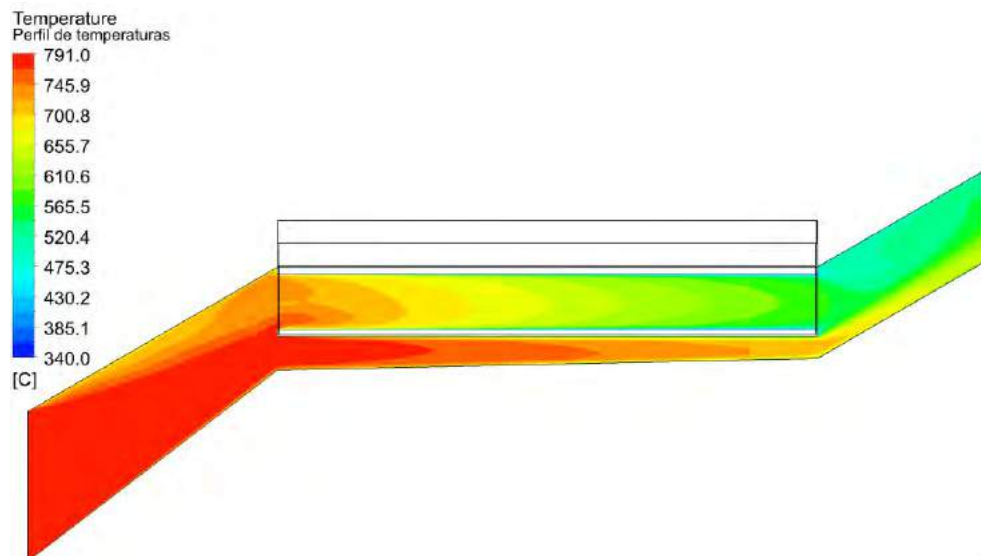
La temperatura de los gases que circulan dentro de los pirotubos es la que desciende más rápido, lo que nos indica la efectividad de los pirotubos como mecanismo de transferencia de calor. Por otra parte, la temperatura de los gases que circulan por la

<sup>21</sup> Para las figuras 101 a 105, se debe mencionar que el plano de simetría es  $z=0$ .

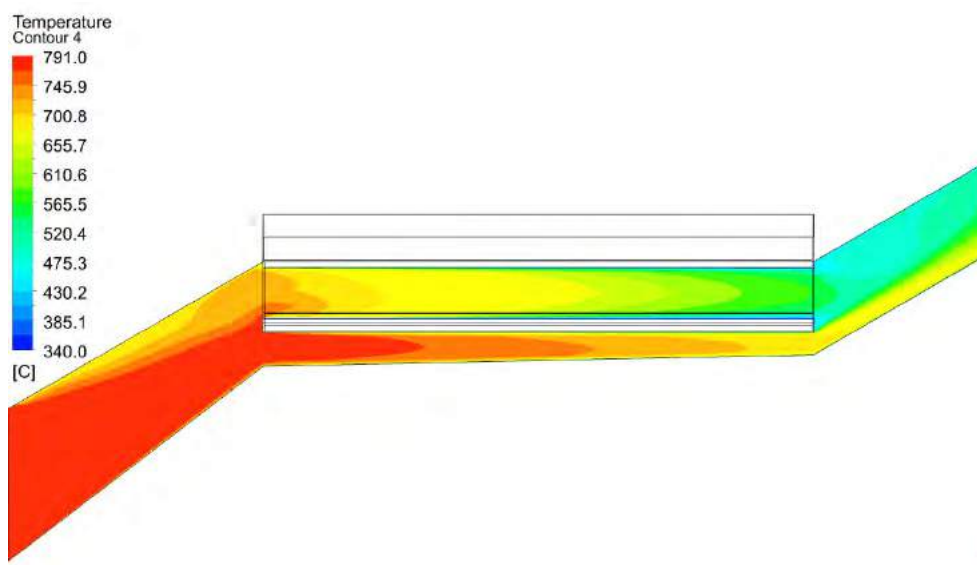
parte inferior a las pails pirotubulares no aleteadas disminuye con menor velocidad (figuras 101 a la 103).



**Figura 101. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. ( $z=7.5$  cm).**  
Fuente: Elaboración propia.



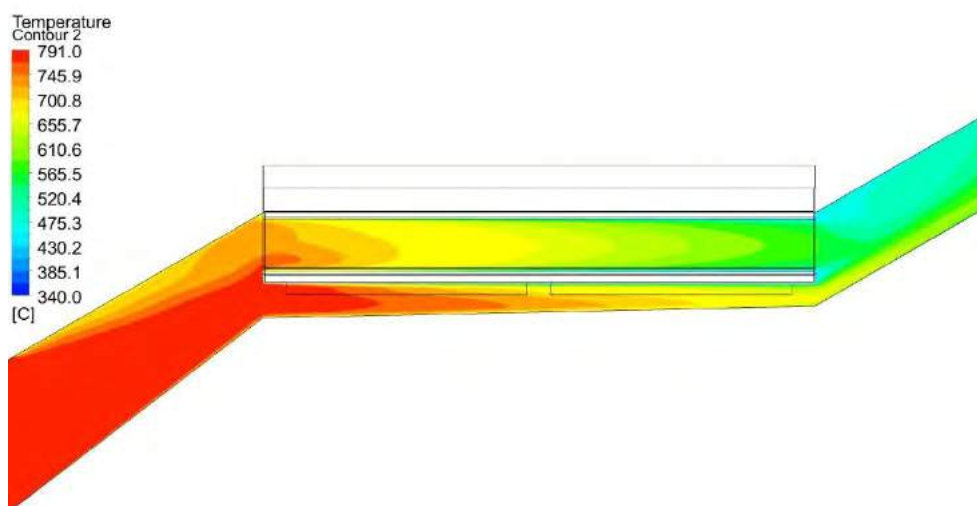
**Figura 102. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. ( $x=7.5$  cm).**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 103. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal. Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. ( $z=7.5$  cm).**

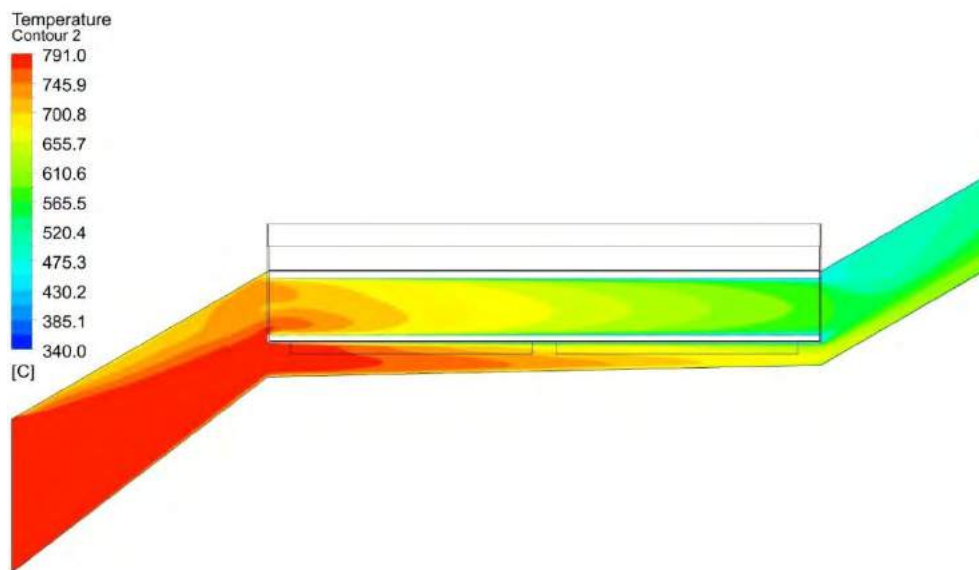
Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de aprovechar mejor el flujo de calor de los gases que circulan debajo de las pailas se decidió añadir aletas y de esta forma aumentar el área de transferencia de calor en esta zona. Como consecuencia, los gases que circulan por las aletas disminuyen su temperatura con una velocidad similar a la de los gases que circulan por los pirotubos, Las pailas pirotubulares con aletas (figuras 104 a la 105) por lo tanto, tienen mayor eficiencia térmica que las pailas pirotubulares sin aletas.



**Figura 104. Dominio 4: Pirotubular aleteada trapezoidal. Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. ( $z=7.5$  cm).**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 105. Dominio 5: Pirotabular aleteada rectangular redondeada. Campo de temperaturas de la sección longitudinal del ducto de humos. ( $z=7.5$  cm).**

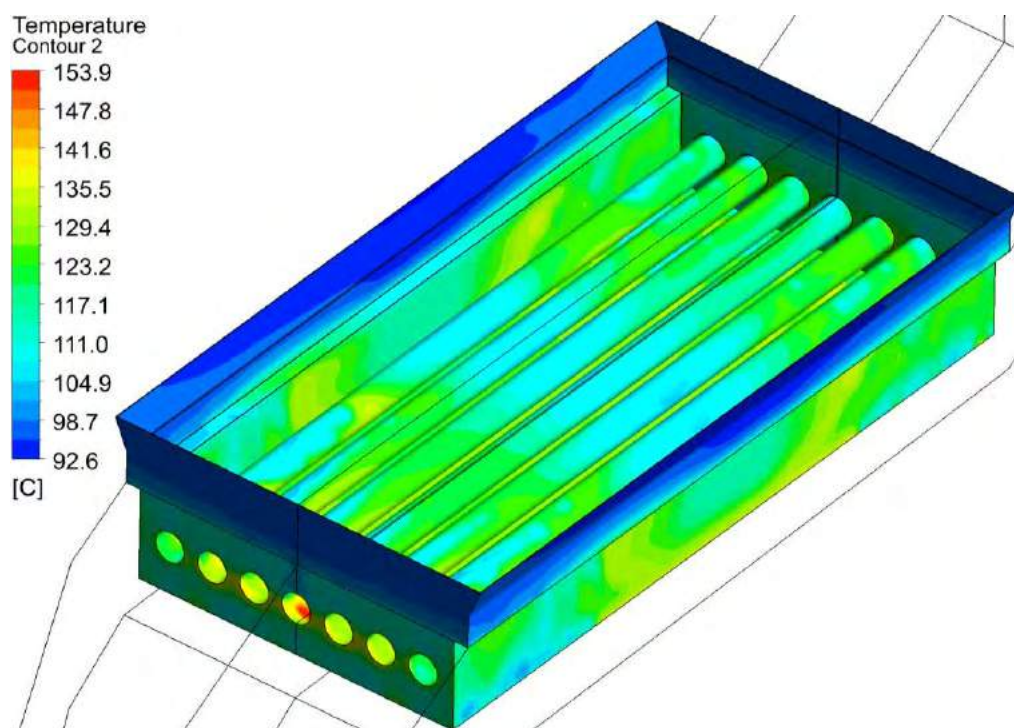
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.3 Superficie de la paila en contacto con los gases

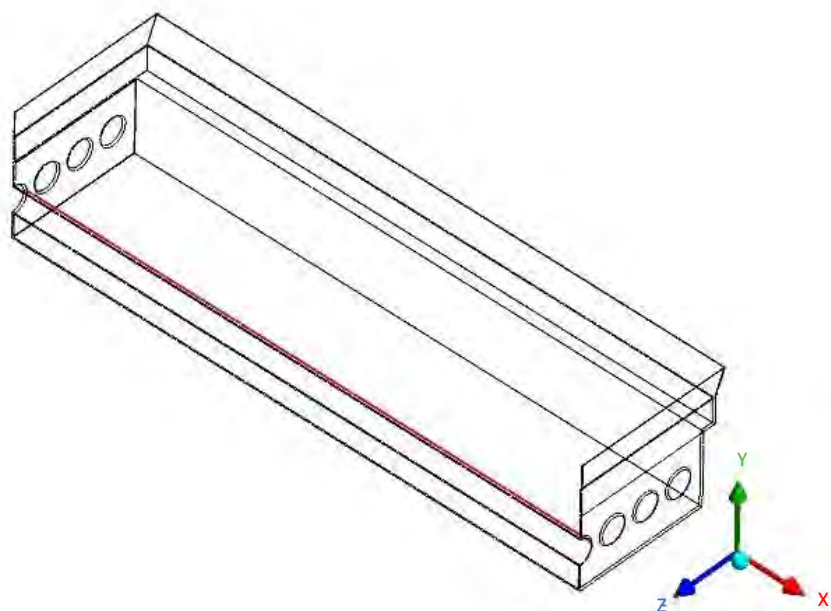
Las figuras 106 a la 112 muestran los campos de temperaturas sobre la superficie en contacto con los gases de combustión. Conocer la distribución de temperaturas en la superficie de cada paila nos da una idea de que zonas estarían sometidas a grandes esfuerzos térmicos y nos permitirá conocer las propiedades mecánicas del material como el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último, los cuales disminuyen con el aumento de temperatura.

Las pailas pirotubulares (ver figuras 106 a la 108) tienen una distribución de temperaturas similar en la mayor parte de su longitud, la cual se encuentra en el rango de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Además, todas presentan picos de temperatura en las secciones de entrada de los pirotubos de  $155\text{ }^{\circ}\text{C}$  para la paila pirotubular circular (ver figura 106),  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  para la rectangular redondeada (ver figura 111) y  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  para la trapezoidal (ver figura 112).

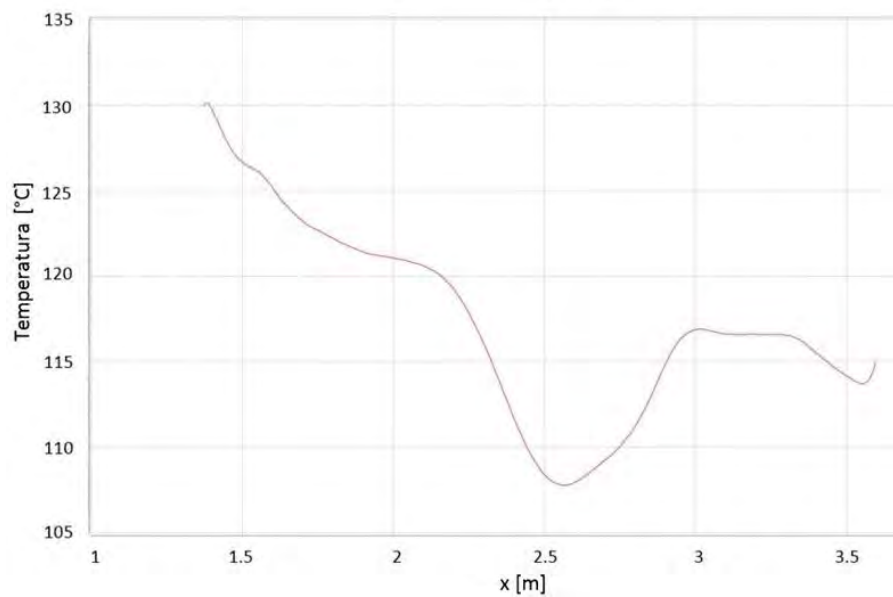
Para el caso de la paila pirotubular circular (ver figura 106), se ha graficado la distribución de temperatura a lo largo de isolíneas ubicadas a lo largo y ancho de la paila (figuras 107 y 109 respectivamente). Como se puede observar en la figura 108, la temperatura a lo largo de la paila varía desde  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $108\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente en la mitad de la longitud de la paila para luego aumentar hasta  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$  al final.



**Figura 106. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.**  
Fuente: Elaboración propia.

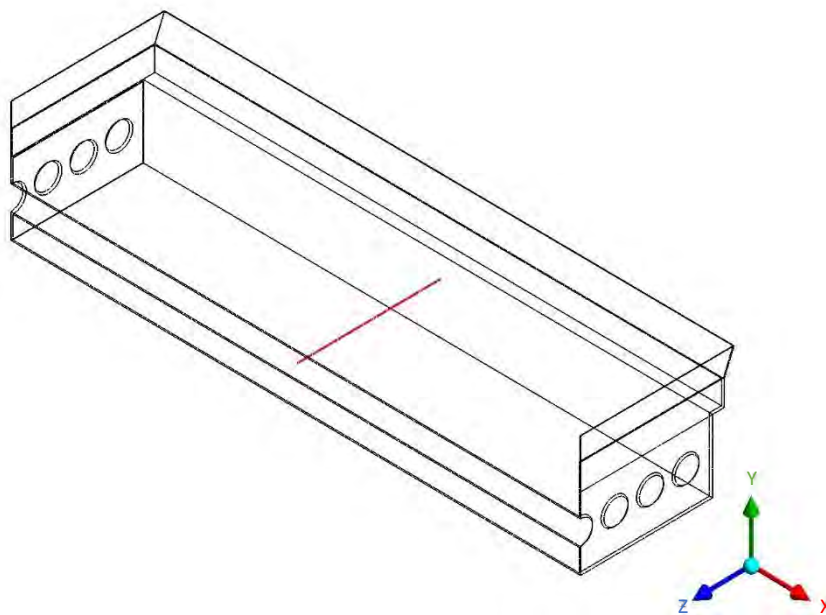


**Figura 107. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Ubicación de isolínea de temperatura a lo largo de la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.

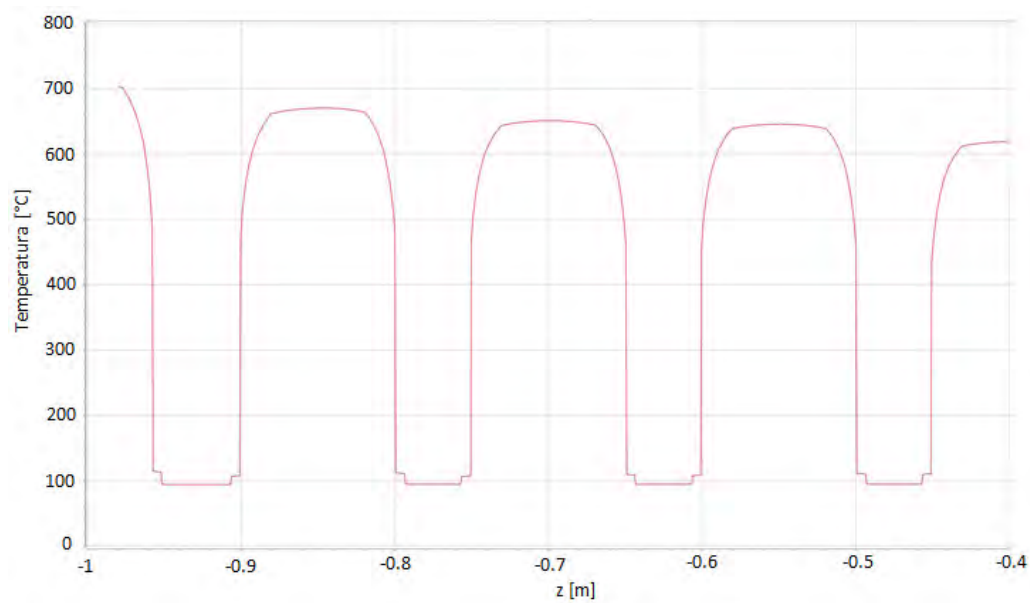


**Figura 108. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Temperatura a lo largo de la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.

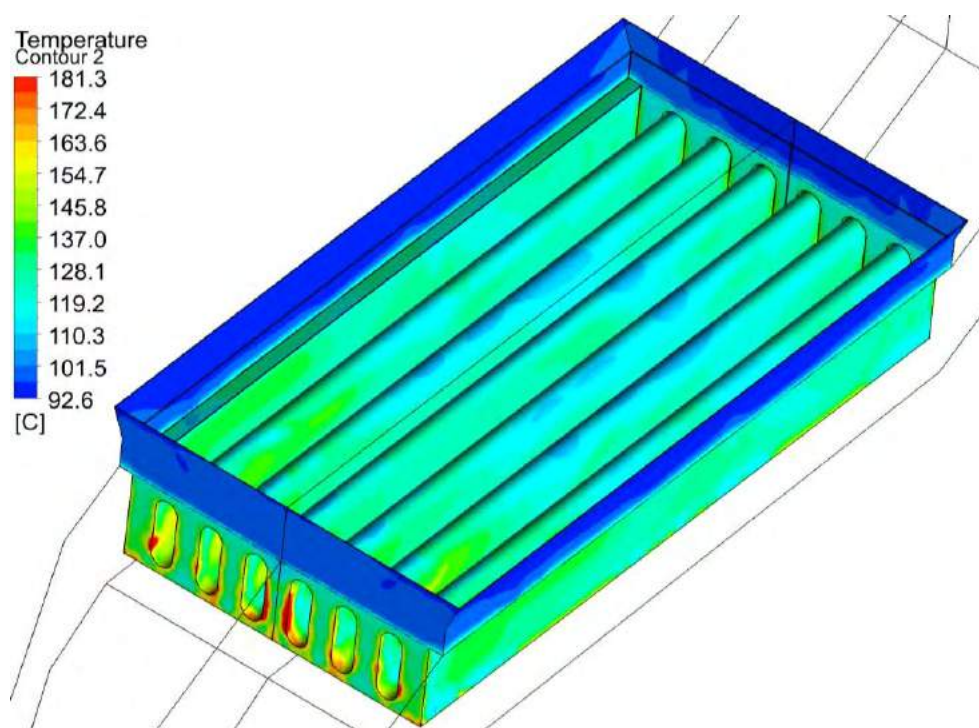
En la figura 110 se puede apreciar la distribución de temperaturas a lo ancho de la paila para la ubicación que se muestra en la figura 109. La isolínea de la figura 109 atraviesa los gases de combustión, la paila y el jugo de caña de azúcar. Los gases de combustión tienen una temperatura de 700 °C, la cual disminuye rápidamente al entrar en contacto con los pirotubos hasta 110 °C. Finalmente, la temperatura de los pirotubos al entrar en contacto con el jugo de caña disminuye hasta 95 °C aproximadamente.



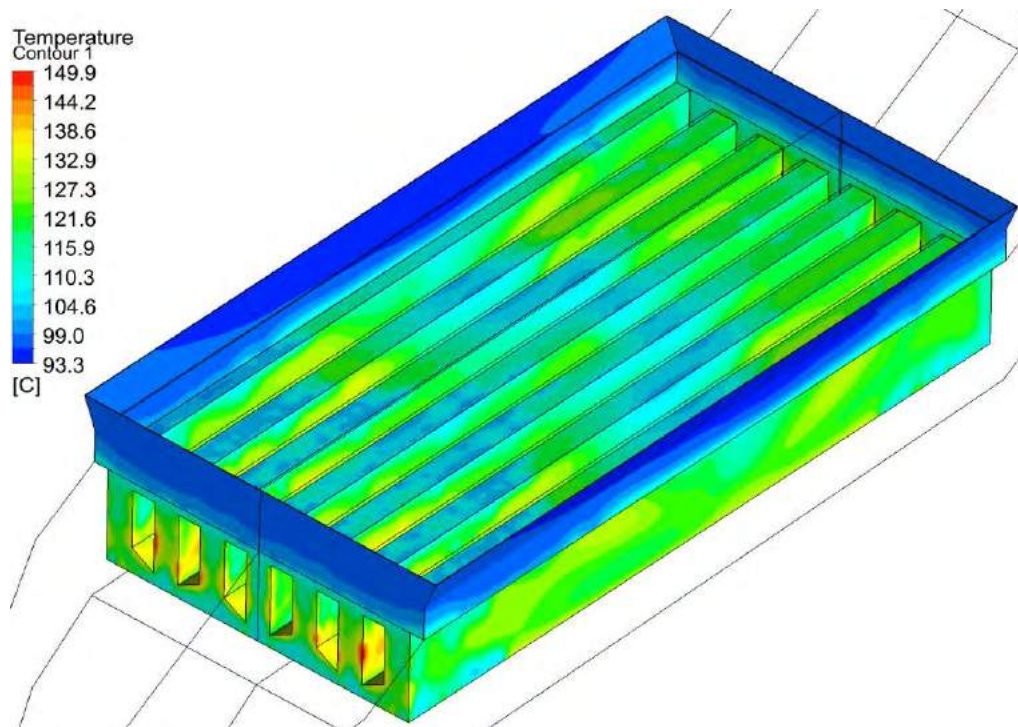
**Figura 109. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Ubicación de isolínea de temperatura a lo ancho de la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 110. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Temperatura a lo ancho de la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 111. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.**  
Fuente: Elaboración propia.

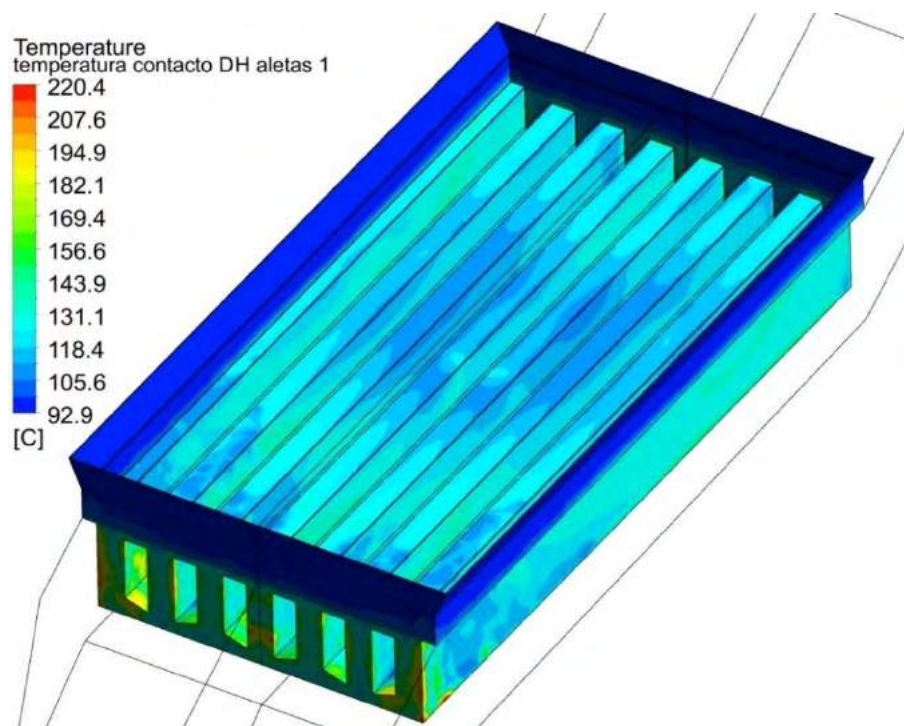


**Figura 112. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.**

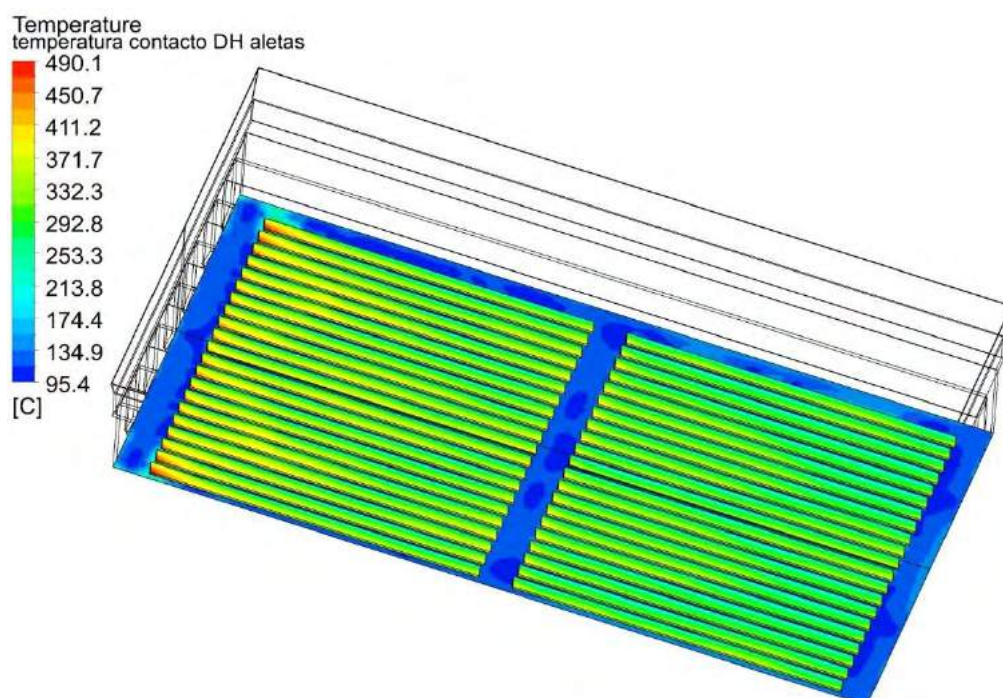
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las pailas pirotubulares aleteadas (ver figuras 113 a la 120), la distribución de temperatura de la base de la paila, en la mayor parte de su longitud, se encuentra en el rango de 92 °C a 140 °C con picos de temperatura en las secciones de entrada de los pirotubos de 225 °C para la trapezoidal (ver figura 113) y 215 °C para la rectangular redondeada (ver figura 115). Además, las aletas de ambas pailas también presentan una distribución de temperaturas similar en la mayor parte de su longitud que se encuentra en el rango de 300 °C a 380 °C, con picos de temperatura en la sección frontal de las uniones entre las aletas y la base de la paila de 465 °C para la trapezoidal (ver figura 114) y 480 °C para la rectangular redondeada (ver figura 120).

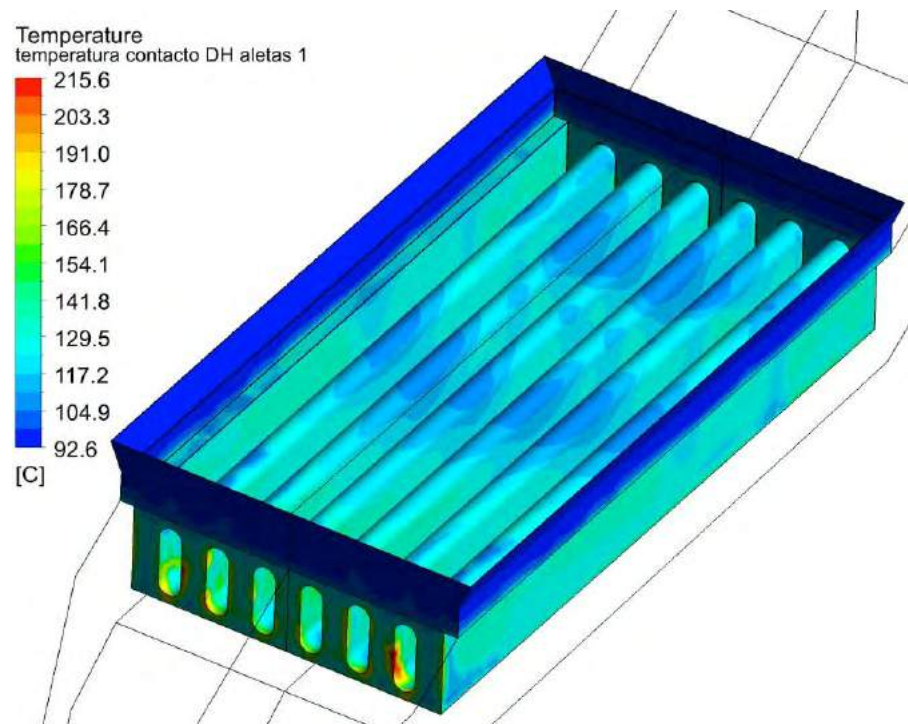
En la figura 117 se puede observar la gráfica de temperatura de la isolínea ubicada a lo largo de la base de la paila pirotubular aleteada rectangular redondeada (ver figura 116). Como se puede observar en la figura 117, la temperatura a lo largo de la paila varía desde 135 °C hasta 113 °C aproximadamente en la mitad de la longitud de la paila para luego aumentar hasta 120 °C al final.



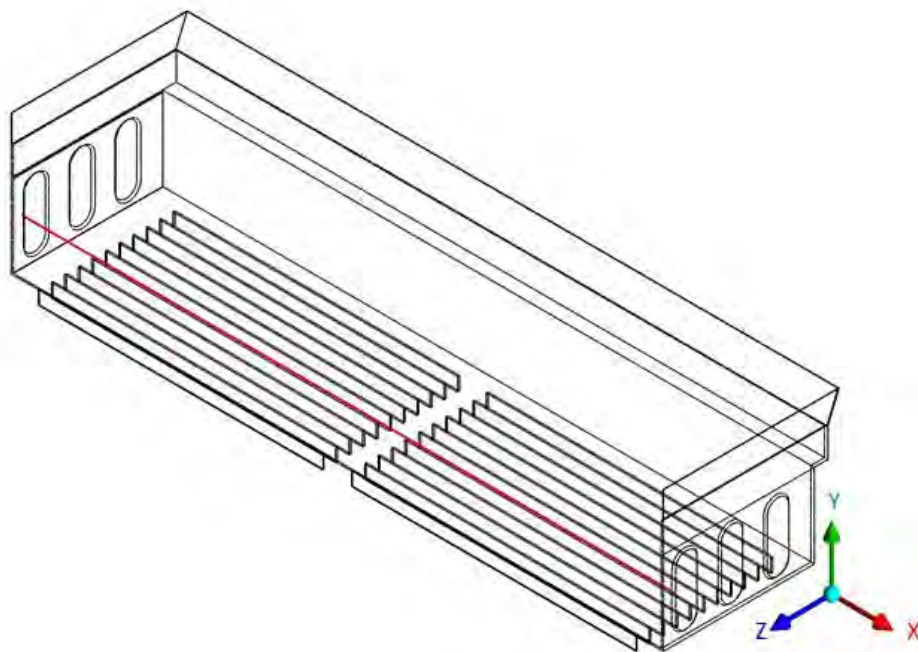
**Figura 113. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.**  
Fuente: Elaboración propia.



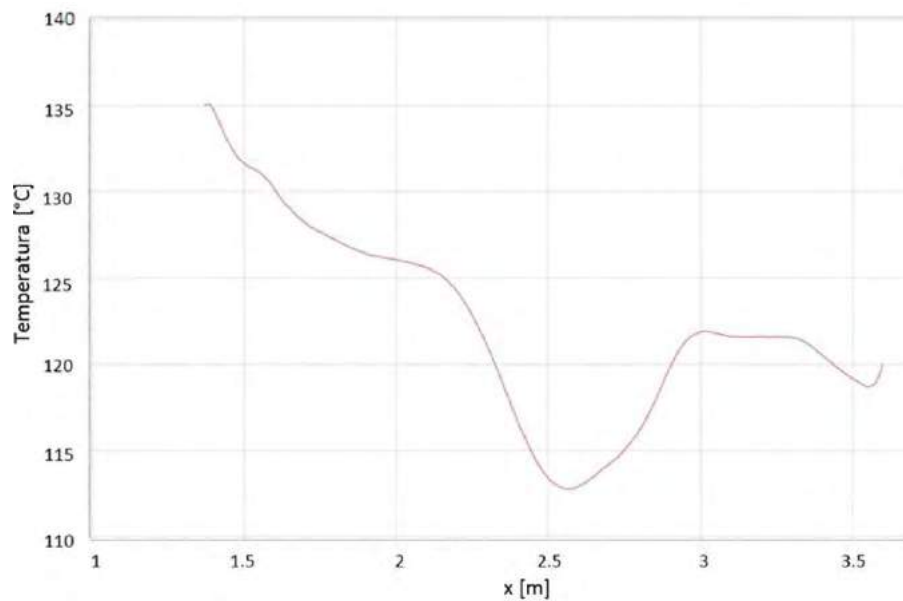
**Figura 114. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Campo de temperaturas de la superficie de las aletas en contacto con los gases producto de combustión.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 115. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Campo de temperaturas de la superficie de la paila en contacto con los gases producto de combustión.**  
Fuente: Elaboración propia.



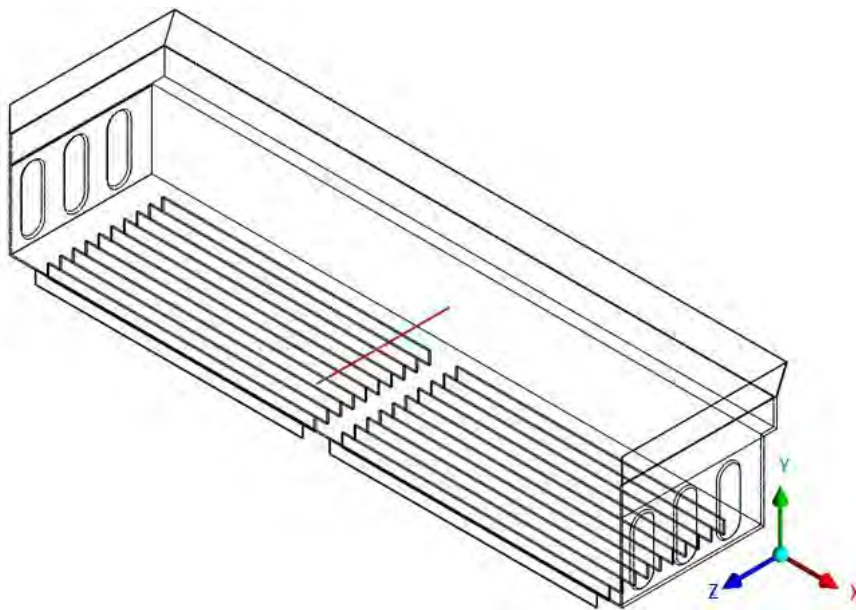
**Figura 116. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Ubicación de isolínea de temperatura a lo largo de la base la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 117. Dominio 5: Pila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Temperatura a lo largo de la base de la pila.**

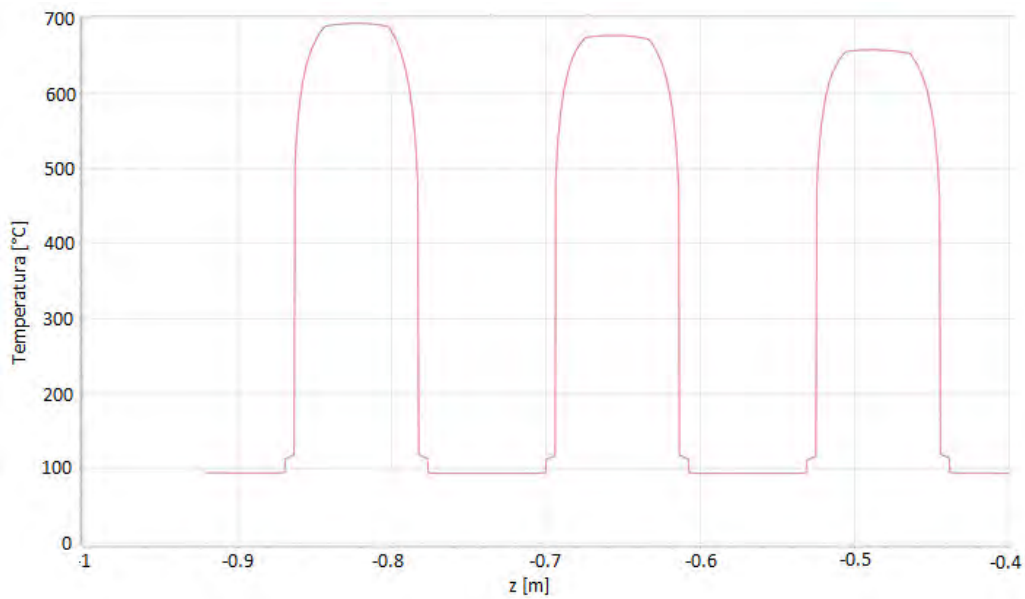
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 119 se puede apreciar la distribución de temperaturas a lo ancho de la base de la pila para la ubicación que se muestra en la figura 109. La isolínea de la figura 118 atraviesa los gases de combustión, la pila y el jugo de caña de azúcar. Los gases de combustión tienen una temperatura de 700 °C, la cual disminuye rápidamente al entrar en contacto con los pirotubos hasta 120 °C. Finalmente, la temperatura de los pirotubos al entrar en contacto con el jugo de caña disminuye hasta 100 °C aproximadamente.



**Figura 118. Dominio 5: Pila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Ubicación de isolínea de temperatura a lo ancho de la base de la pila.**

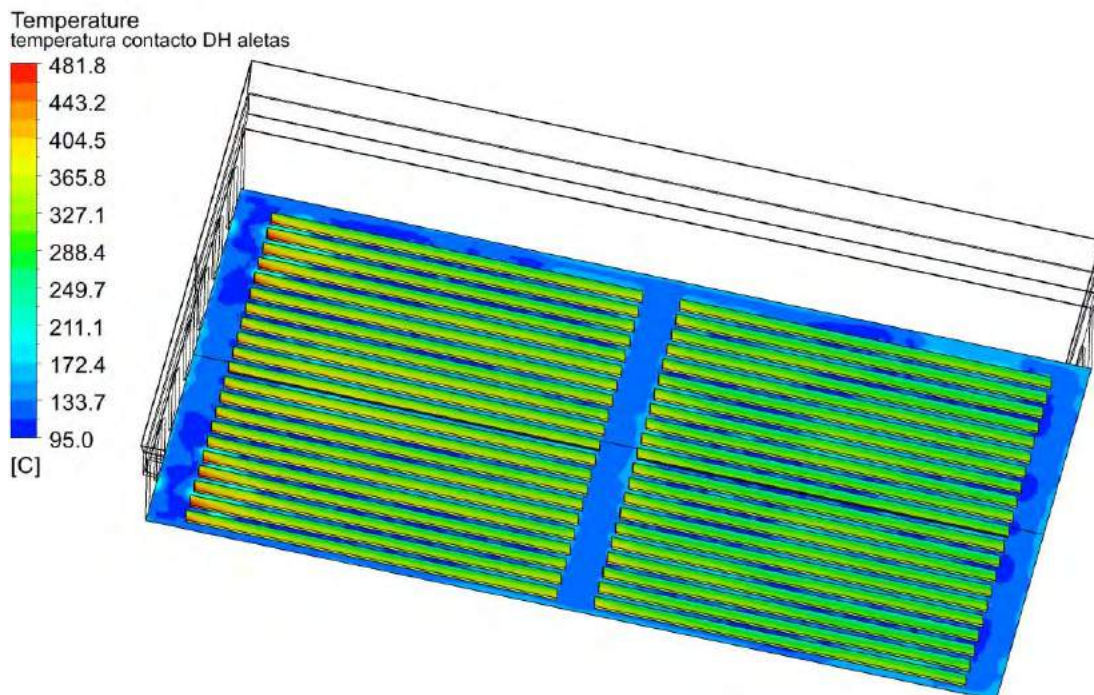
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 119. . Dominio 5: Pila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Temperatura a lo ancho de la base de la pila.**

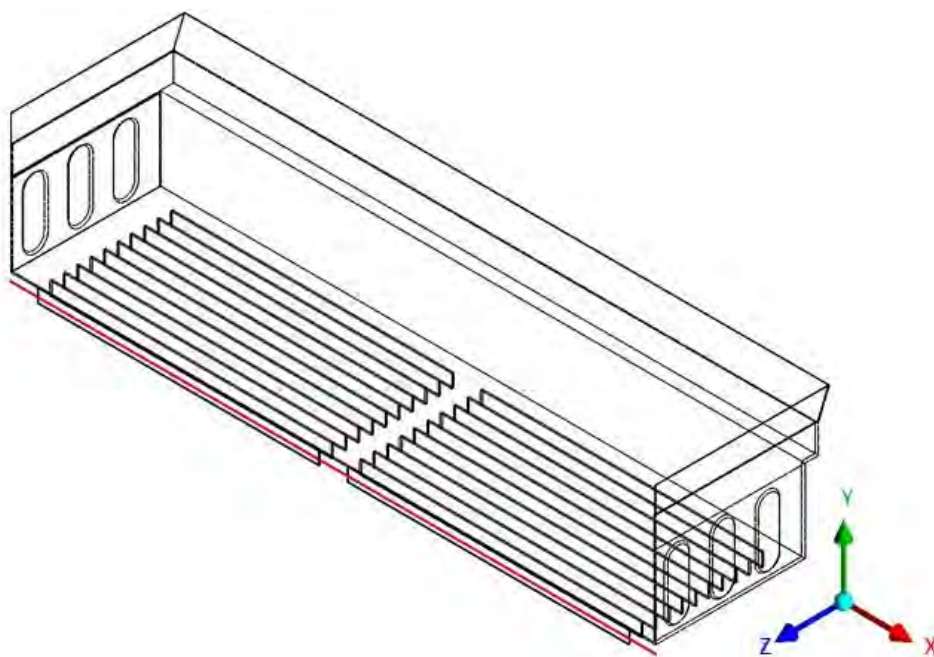
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 122 se puede observar la gráfica de temperatura de la isolínea ubicada a lo largo de las aletas de la pila pirotubular aleteada rectangular redondeada (ver figura 116). Como se puede observar en la figura 122, la temperatura a lo largo de la primera aleta disminuye desde 390 °C hasta 350 °C, mientras que la temperatura de la segunda aleta disminuye desde 370 °C hasta 305 °C.

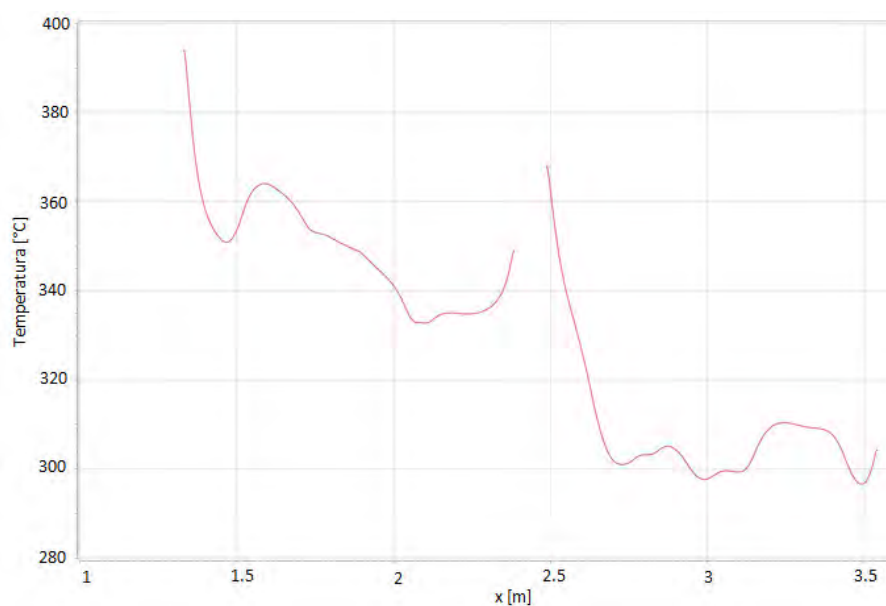


**Figura 120. Dominio 5: Pila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Campo de temperaturas de la superficie de las aletas en contacto con los gases producto de combustión.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 121. . Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Ubicación de isolínea de temperatura a lo largo de las aletas.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 122. . Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Temperatura a lo largo de las aletas.**  
Fuente: Elaboración propia.

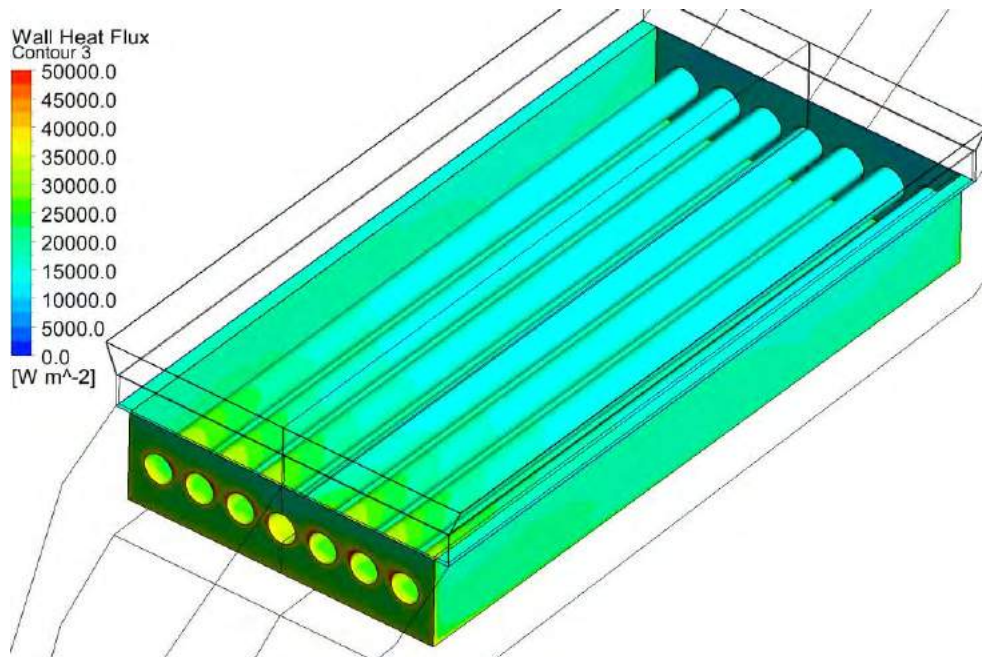
Como consecuencia de la alta temperatura de los gases de combustión y el pequeño espesor de las aletas, el perfil de temperatura a lo ancho de las aletas es prácticamente constante.

### 4.2.3 Flujo de calor en la superficie de la paila

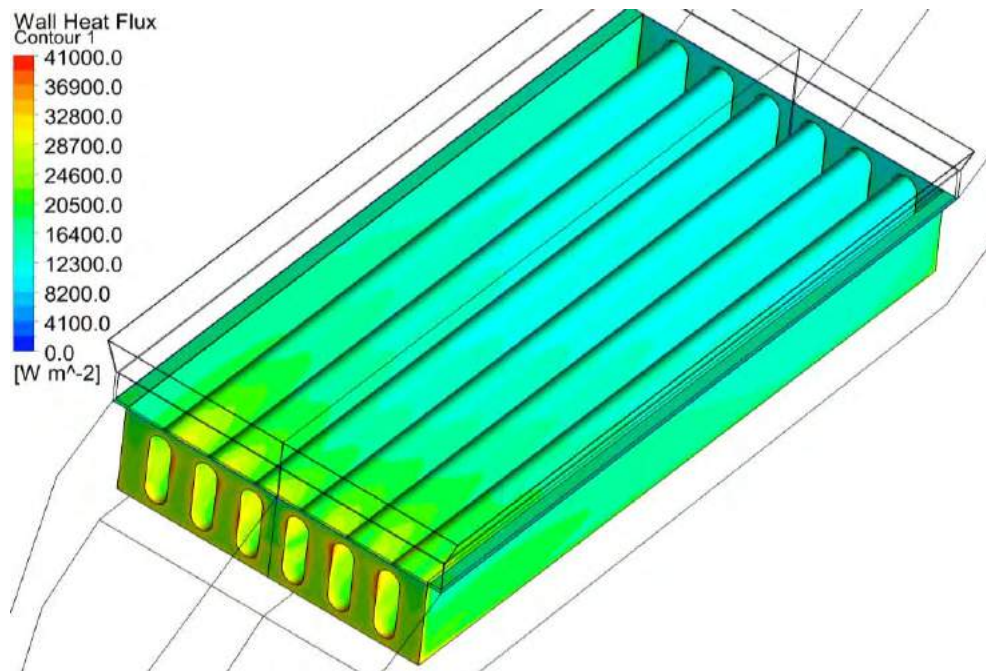
En las figuras 123 a la 129 se muestra el flujo de calor por unidad de área en las superficies de cada una de las pailas estudiadas. Al igual que el campo de temperaturas, conocer la distribución del flujo de calor en la superficie de las pailas nos indica qué zonas tendrían los mayores esfuerzos térmicos.

Como consecuencia de la geometría del ducto, los gases calientes impactan directamente con la superficie frontal de la base de la paila (para el caso de las pailas pirotubulares) y también con la superficie frontal de las aletas (para el caso de las pailas pirotubulares aleteadas), razón por la cual esta zona posee un elevado flujo de calor por unidad de área, alcanzando su valor máximo en las secciones de entrada de los pirotubos y uniones de la paila con las aletas. Este flujo se mantiene casi constante hasta un cuarto de la longitud de la paila para luego disminuir gradualmente hasta alcanzar su valor mínimo en la sección posterior de la misma. Esta disminución del flujo de calor es consecuencia de la disminución de temperatura de los gases de combustión a medida que ceden calor a la paila.

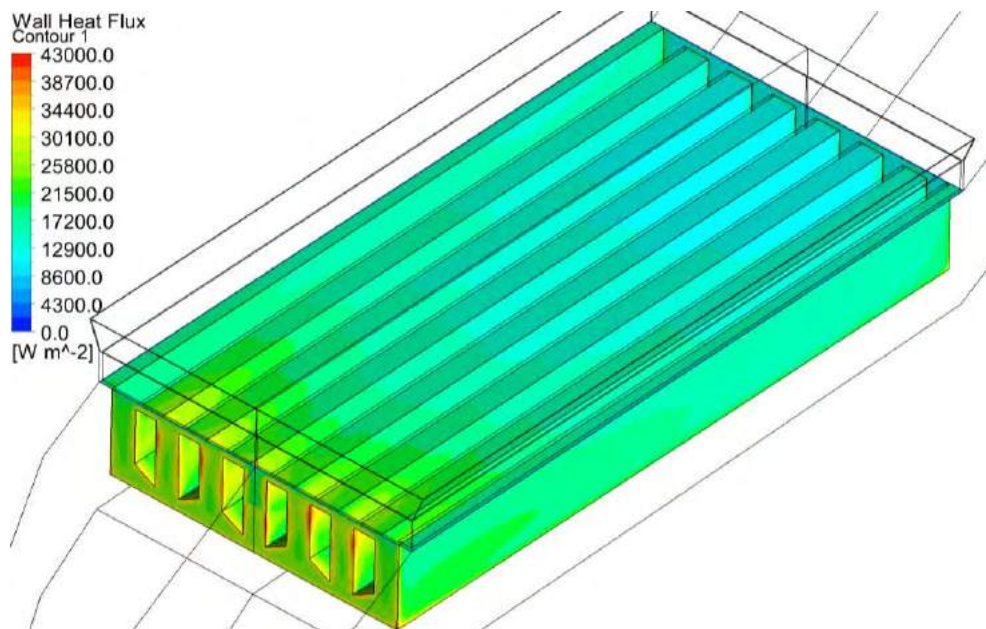
La distribución del flujo de calor por unidad de área es similar en todas las pailas (tanto pirotubulares como pirotubulares aleteadas), no es un parámetro de interés para la selección de pailas. Por tal motivo, para realizar una correcta comparación y selección se debe tener en cuenta el área de transferencia de calor de cada una de ellas y así poder determinar la potencia total entregada a cada paila. Mientras mayor sea la potencia entregada a la paila, mayor será su eficiencia térmica.



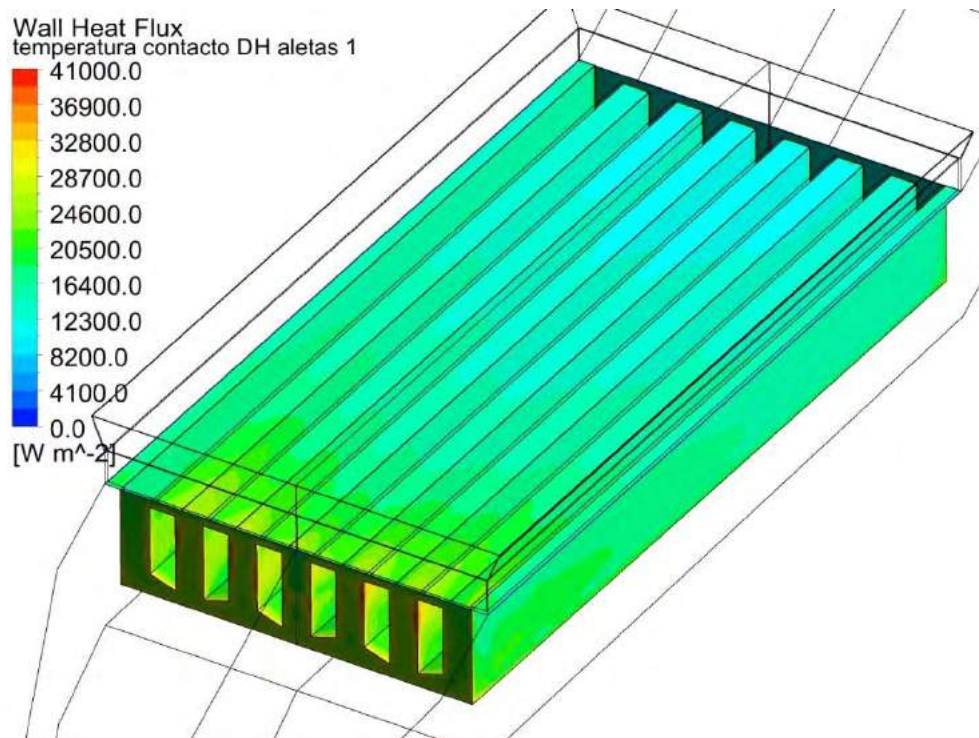
**Figura 123. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Flujo de calor en la superficie de la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.



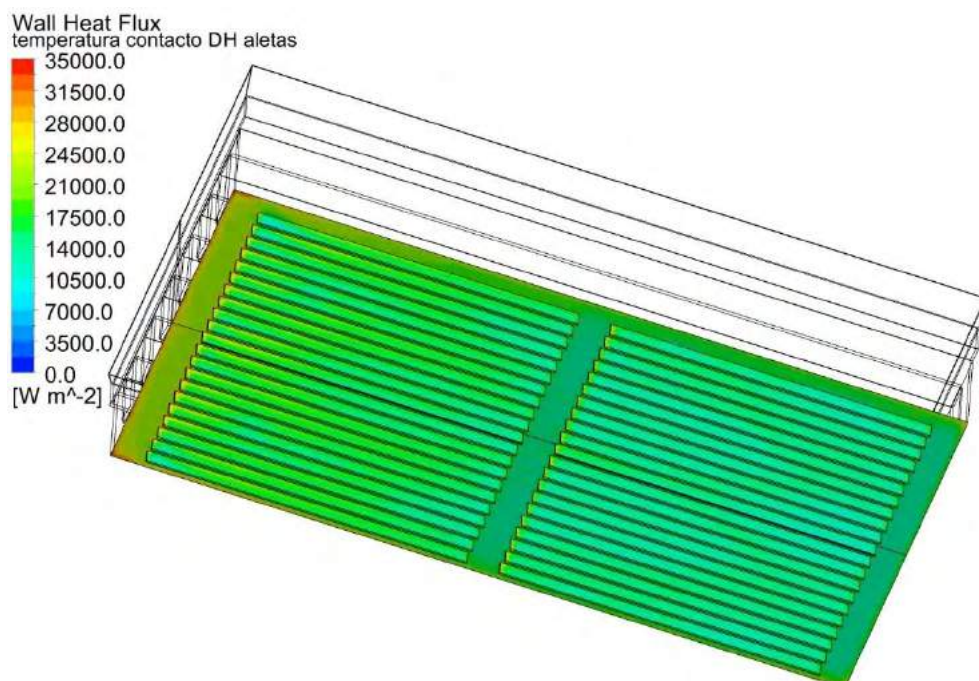
**Figura 124. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Flujo de calor en la superficie de la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.



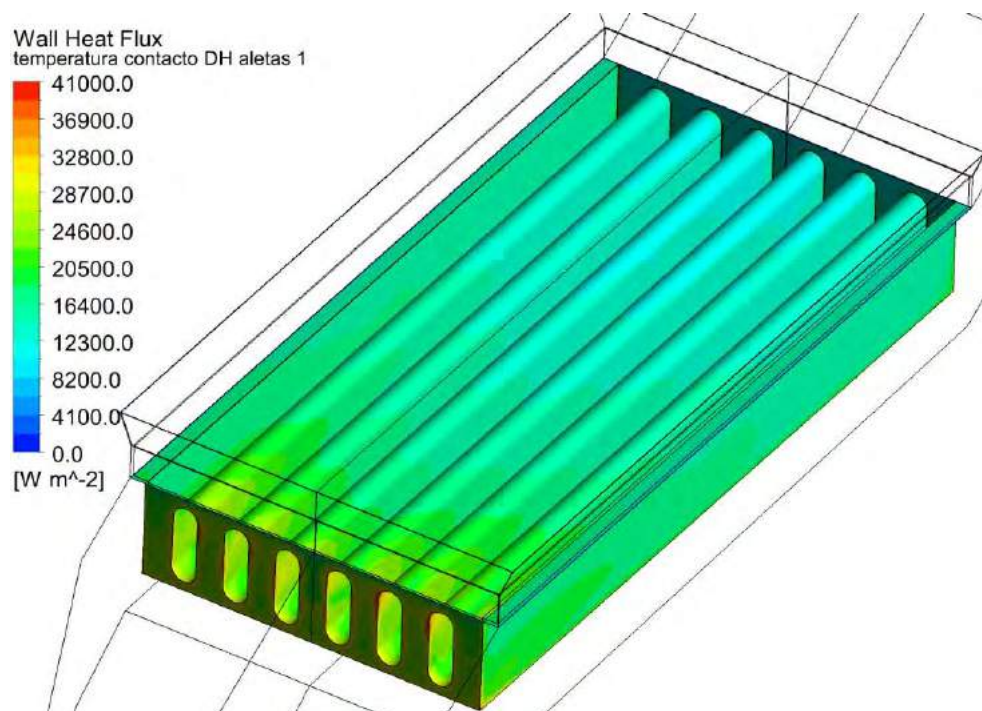
**Figura 125. Dominio 3: Paila pirotubular trapezoidal. Flujo de calor en la superficie de la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 126. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Flujo de calor en la superficie de la paila.**  
Fuente: Elaboración propia.

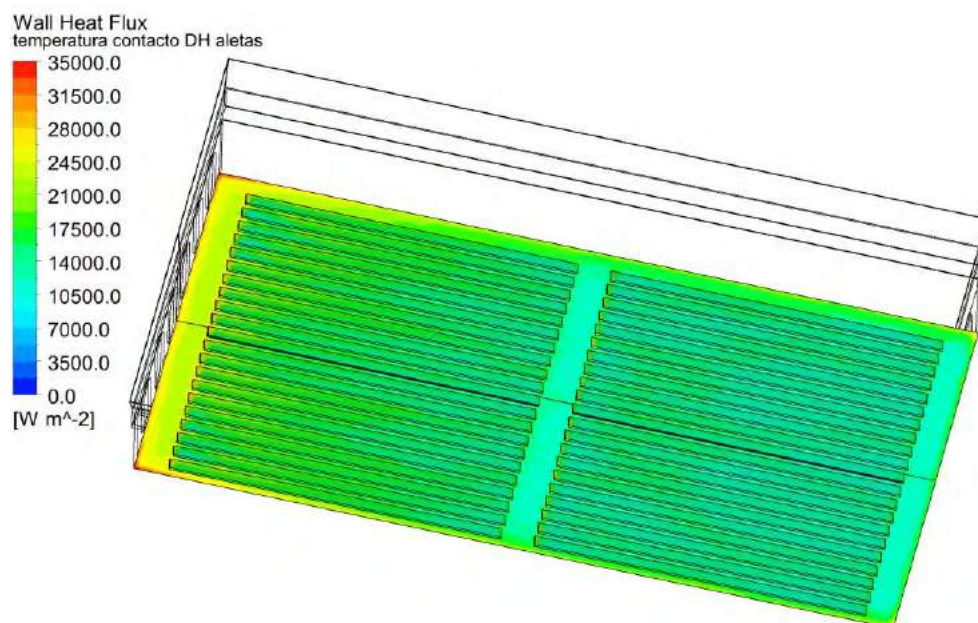


**Figura 127. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Flujo de calor en la superficie de las aletas.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 128. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Flujo de calor en la superficie de la paila.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 129. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Flujo de calor en la superficie de las aletas.**

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Resultados del análisis estructural

Luego de obtener los resultados de la simulación fluidodinámica y ser validado el modelo estructural de manera cualitativa, se detallan los resultados de la simulación estructural de las cinco pailas estudiadas en la presente tesis.

Los parámetros de interés del análisis estructural para la selección de las pailas son: el esfuerzo equivalente (Von Mises) y la deformación direccional. Además se debe mencionar que en el caso del esfuerzo equivalente puede existir un esfuerzo máximo excesivamente grande como resultado del cambio de sección en algunas partes de la paila. Sin embargo, estos esfuerzos son puntuales por lo que serán omitidos en el análisis de resultados.

Se debe tener en cuenta que las propiedades mecánicas de los materiales empleados, en especial el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último, dependen en gran medida de la temperatura del material (como se explicó en el Capítulo II). Por este motivo, los resultados de esfuerzo equivalente deben ser analizados en conjunto con los resultados de campo de temperaturas en la superficie de la paila analizados en la sección anterior.

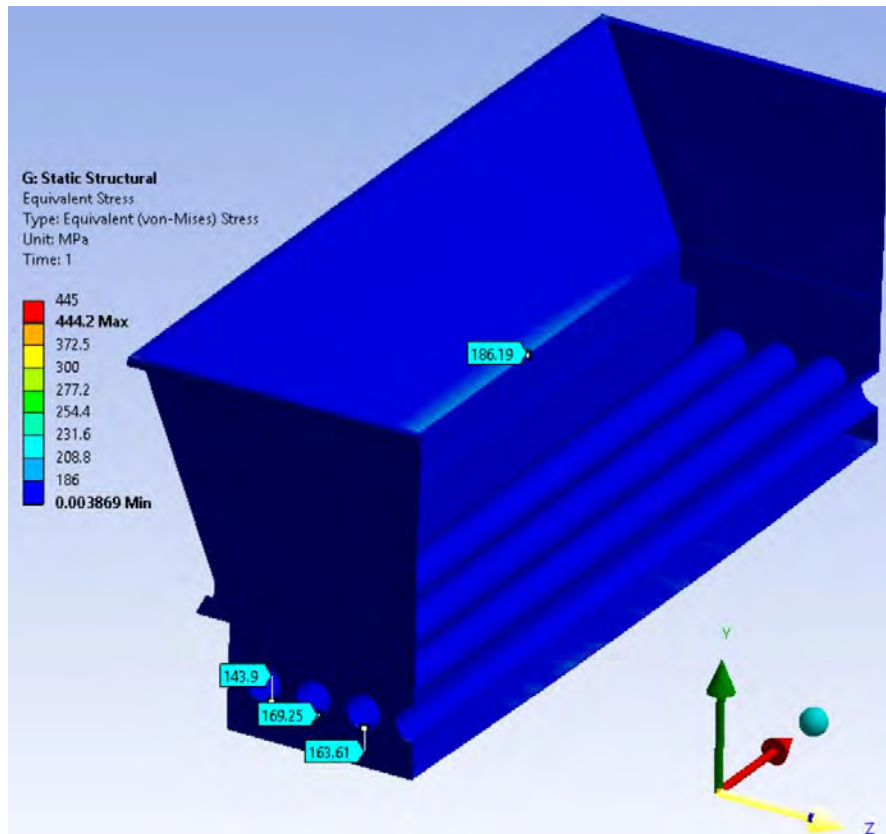
#### 4.3.1 Esfuerzo equivalente

El esfuerzo equivalente nos permite decidir si el material utilizado se deforma elásticamente, permanentemente o en el peor de los casos falla, y de esta manera decidir si es necesario aumentar o reducir el espesor de las placas que conforman la paila.

Para el diseño de las pailas se deben tener en cuenta cuáles son las áreas críticas en dónde se debe tratar de obtener los menores esfuerzos posibles. En este caso, son: la base de la paila, los soportes y los pirotubos los que representan la sección crítica. Si la base de la paila o los pirotubos fallan, el jugo de caña de azúcar ingresaría al ducto de humos y dependiendo de la cantidad segregada, se podría detener la producción de panela por varios días. Es por esta razón que para estas secciones se ha determinado que el factor de seguridad no debe ser menor que 1.3 respecto al esfuerzo último o de ruptura del material a la temperatura máxima alcanzada.

El resto de regiones (falca y aletas) se han considerado como no críticas debido a que si fallan, la paila puede continuar su operación, variando sólo el flujo de calor que recibe la paila en una cantidad despreciable. Es por esto que para la falca y las aletas se ha determinado que el factor de seguridad en la mayor parte de la región debe ser mayor que 1, permitiéndose factores de seguridad menores a 1 en zonas puntuales.

Para el Dominio 1, la temperatura máxima alcanzada es de 153.9 °C (ver figura 106) que corresponde a un esfuerzo de fluencia de 186 MPa y un esfuerzo último de 445 MPa. Como se puede apreciar en la figura 130, los mayores esfuerzos se encuentran en las secciones de entrada de los pirotubos y en la unión de la base de la paila con la falca.



**Figura 130. Dominio 1: Paila pirotubular circular. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.**  
 Fuente: Elaboración propia.

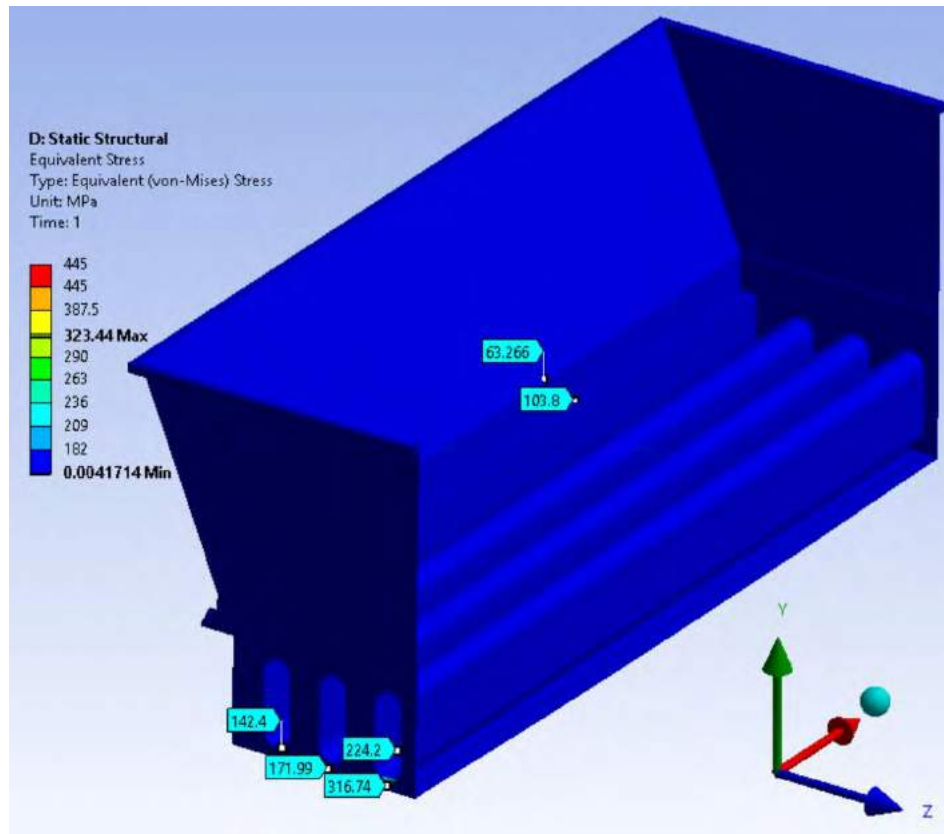
En el primer caso, se debe a las elevadas temperaturas presentes en esta región y en el segundo caso, son consecuencia del cambio de espesor entre las placas metálicas que conforman la falca y las de la base de la paila.

El menor factor de seguridad para la paila pirotubular circular es:

$$FS_{mín\_D1} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{máx}} = \frac{445 \text{ MPa}}{181 \text{ MPa}} = 2.39$$

Este valor es mayor que el límite establecido, e inclusive los esfuerzos son menores al esfuerzo de fluencia del acero inoxidable A304, por lo tanto, la paila sólo sufre una deformación elástica.

Para el Dominio 2, la máxima temperatura alcanzada es de 181.3 °C (ver figura 111) que corresponde a un esfuerzo de fluencia de 182 MPa y un esfuerzo último de 445 MPa. Al igual que el dominio anterior, los mayores esfuerzos térmicos se concentran en las secciones de entrada de los pirotubos y en la unión de la base de la paila con la falca (ver figura 131).



**Figura 131. Dominio 2: Paila pirotubular rectangular redondeada. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.**

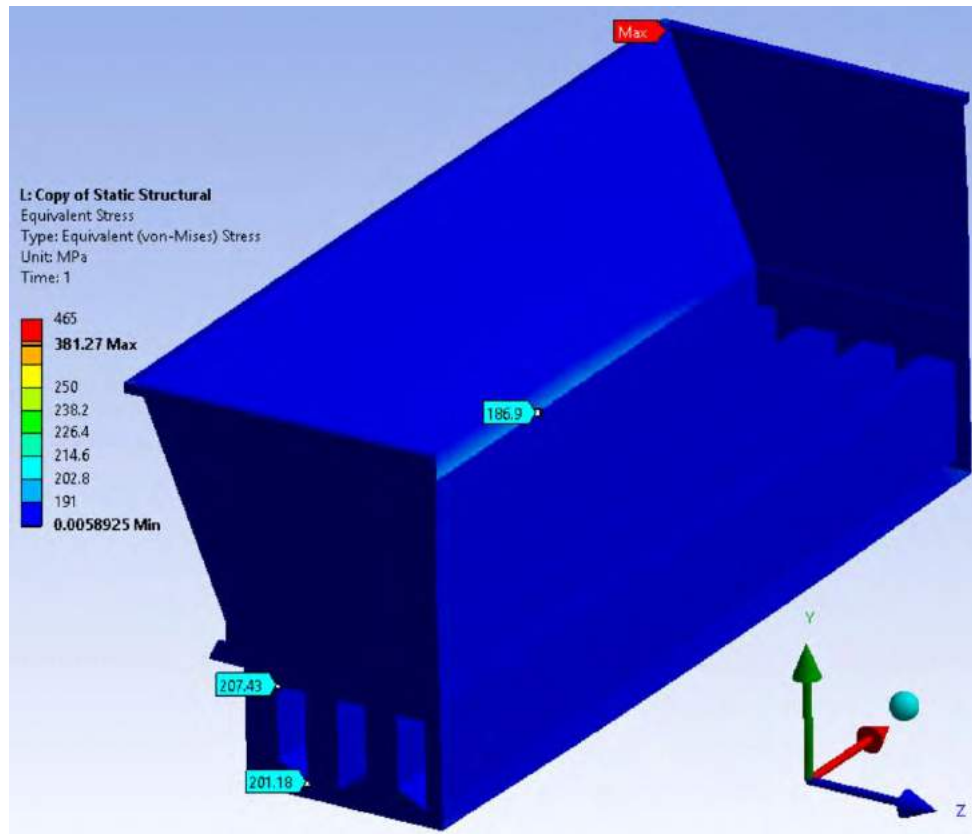
Fuente: Elaboración propia.

El menor factor de seguridad para la paila pirotubular rectangular redondeada es:

$$FS_{\min_{D2}} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{\max}} = \frac{445 \text{ MPa}}{318 \text{ MPa}} = 1.4$$

Cuyo valor es mayor que el límite establecido. Sin embargo, existen esfuerzos mayores que el esfuerzo de fluencia del acero inoxidable A304 en las secciones de entrada de los dos pirotubos centrales y en consecuencia, la paila presenta una deformación plástica.

Para el Dominio 3, la máxima temperatura alcanzada es de 149.9 °C (ver figura 112) que corresponde a un esfuerzo de fluencia de 191 MPa y un esfuerzo último de 465 MPa. Como se puede apreciar en la figura 132, en este caso los mayores esfuerzos térmicos se concentran en la sección de entrada de los pirotubos cercanos a las paredes laterales de la base de la paila y en la unión de la base de la paila con la falca.



**Figura 132. Dominio 3: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.**

Fuente: Elaboración propia.

El menor factor de seguridad para la paila pirotubular trapezoidal es:

$$FS_{mín\_D3} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{máx}} = \frac{465 \text{ MPa}}{207 \text{ MPa}} = 2.23$$

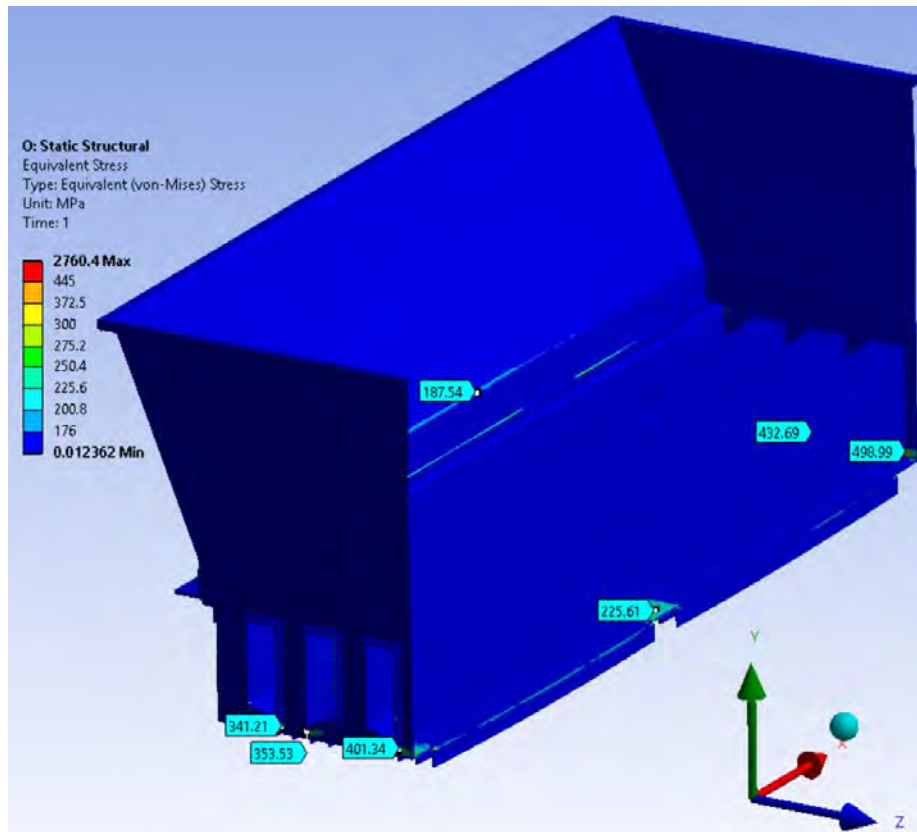
Cuyo valor es mayor que el límite establecido. Sin embargo, existen esfuerzos mayores que el esfuerzo de fluencia en las secciones de entrada de los dos pirotubos laterales y en consecuencia la paila presenta una deformación plástica en dichas regiones.

Para el Dominio 4, la máxima temperatura alcanzada en la base es de 220.4 °C (ver figura 113) que corresponde a un esfuerzo de fluencia de 176 MPa y un esfuerzo último de 445 MPa. Debido a las altas temperaturas alcanzadas, los esfuerzos térmicos que soporta la paila son mayores que en el caso de las pailas pirotubulares no aleteadas. Como se puede apreciar en la figura 133, los mayores esfuerzos se concentran en las esquina inferiores de las secciones de entrada y salida de los pirotubos, en la unión base-falca y en la base inferior de la paila.

El menor factor de seguridad para la base de la paila trapezoidal con aletas es:

$$FS_{\text{mín}_D4} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{\text{máx}}} = \frac{445 \text{ MPa}}{498 \text{ MPa}} = 0.89$$

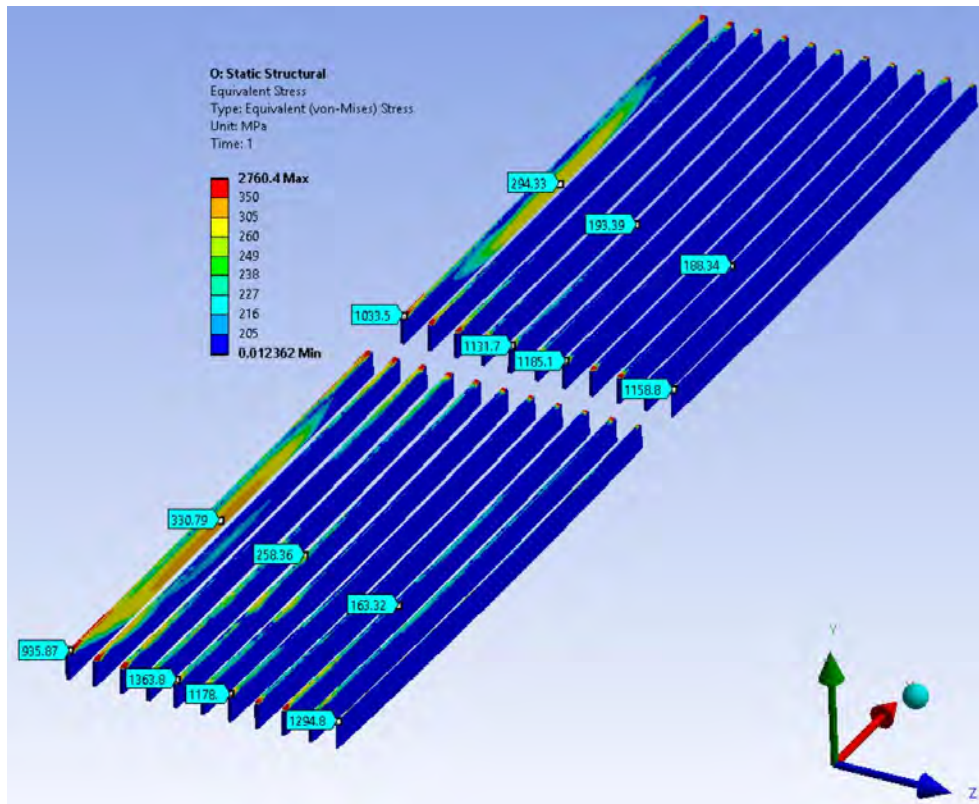
Cuyo valor es menor que el límite establecido e inclusive es menor a 1, por lo que la paila fallará. Cabe mencionar que es posible disminuir el valor de este esfuerzo aumentando el espesor de la placa inferior posterior de la base de la paila.



**Figura 133. Dominio 4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.**

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las aletas del Dominio 4, la temperatura máxima alcanzada es de 490.1 °C (ver figura 114), que corresponde a un esfuerzo de fluencia de 205 MPa y un esfuerzo último de 350 MPa para el acero estructural A36. Como se observa en la figura 134, los máximos esfuerzos se concentran en las secciones frontales y posteriores de las uniones aletas-paila y son mucho mayores que el esfuerzo último. Sin embargo, estos esfuerzos son puntuales y su falla sólo significaría una ruptura mínima de las aletas, por lo que pueden ser despreciados. En general, la mayor parte de las aletas se encuentran sometidas a esfuerzos menores al esfuerzo de fluencia y por lo tanto, no fallarán, sólo se deforman elásticamente.



**Figura 134. Dominio4: Paila pirotubular aleteada trapezoidal Distribución de esfuerzos térmicos en las aletas.**

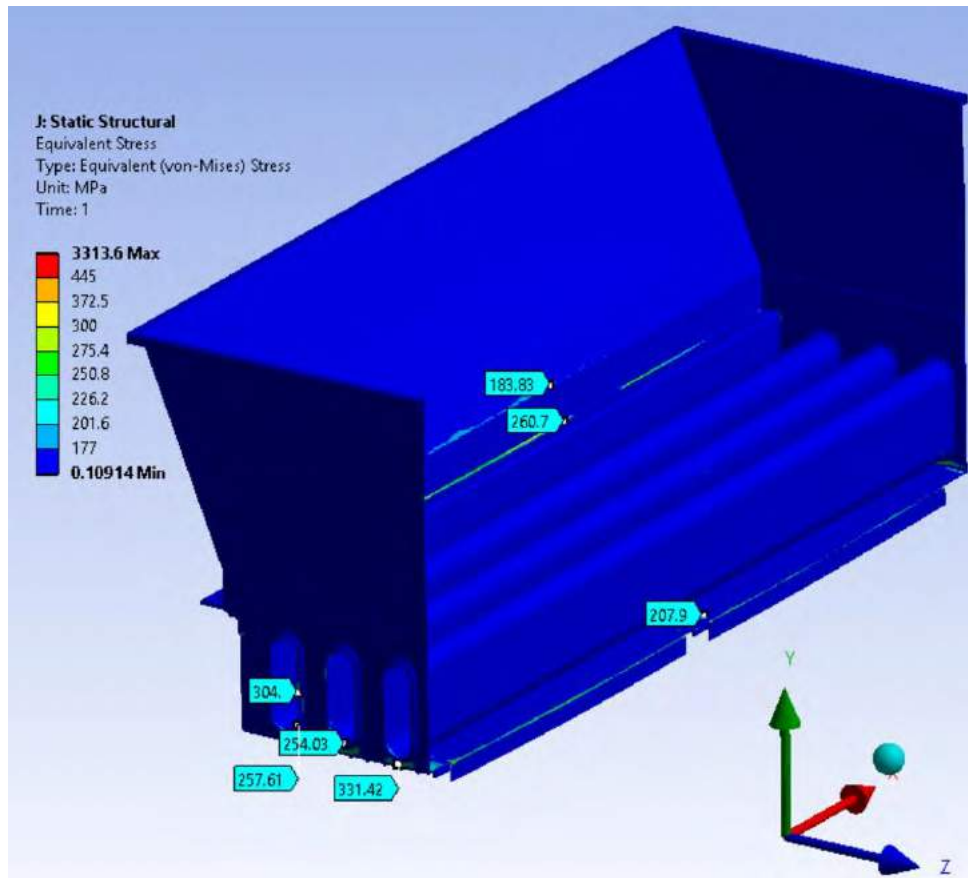
Fuente: Elaboración propia.

Para el Dominio 5, la máxima temperatura alcanzada en la base es de 215.6 °C (ver figura 115) que corresponde a un esfuerzo de fluencia de 177 MPa y un esfuerzo último de 445 MPa. Debido a las altas temperaturas alcanzadas, los esfuerzos térmicos que soporta la paila son mayores que en el caso de las pailas pirotubulares no aleteadas. Como se puede apreciar en la figura 135, los mayores esfuerzos se concentran en la sección de entrada de los pirotubos, en la unión base-falca y en la base inferior de la paila.

El menor factor de seguridad para la base de la paila pirotubular rectangular redondeada con aletas es:

$$FS_{mín\_D5} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{máx}} = \frac{445 \text{ MPa}}{286 \text{ MPa}} = 1.34$$

Cuyo valor es mayor que el límite establecido. Sin embargo, los esfuerzos que soporta la paila en ciertas regiones son mayores al esfuerzo de fluencia del acero inoxidable A304 y en consecuencia se produce una deformación plástica.



**Figura 135. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Distribución de esfuerzos térmicos en la base y falca.**

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las aletas del dominio 5, la temperatura máxima alcanzada es de 481.8 °C (ver figura 120), que corresponde a un esfuerzo de fluencia de 205 MPa y un esfuerzo último de 350 MPa para el acero estructural A36. Como se observa en la figura 136, los esfuerzos en las secciones frontales y posteriores de las uniones aletas-paila son mucho mayores que el esfuerzo último. Sin embargo, estos esfuerzos son puntuales y su falla sólo significaría una ruptura mínima de las aletas en esta sección, por lo que pueden ser despreciados. En general, la mayor parte de las aletas se encuentran sometidas a esfuerzos menores al de fluencia y por lo tanto, no fallarán, sólo se deforman elásticamente.

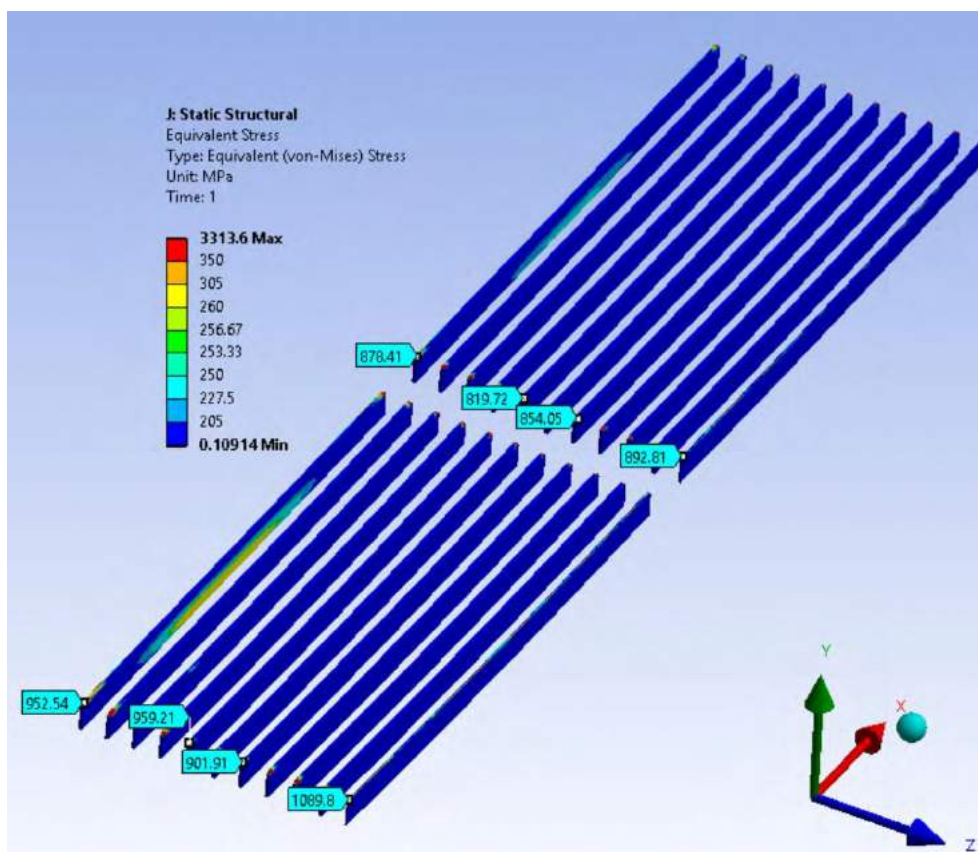


Figura 136. Dominio 5: Paila pirotubular aleteada rectangular redondeada. Distribución de esfuerzos térmicos en las aletas.

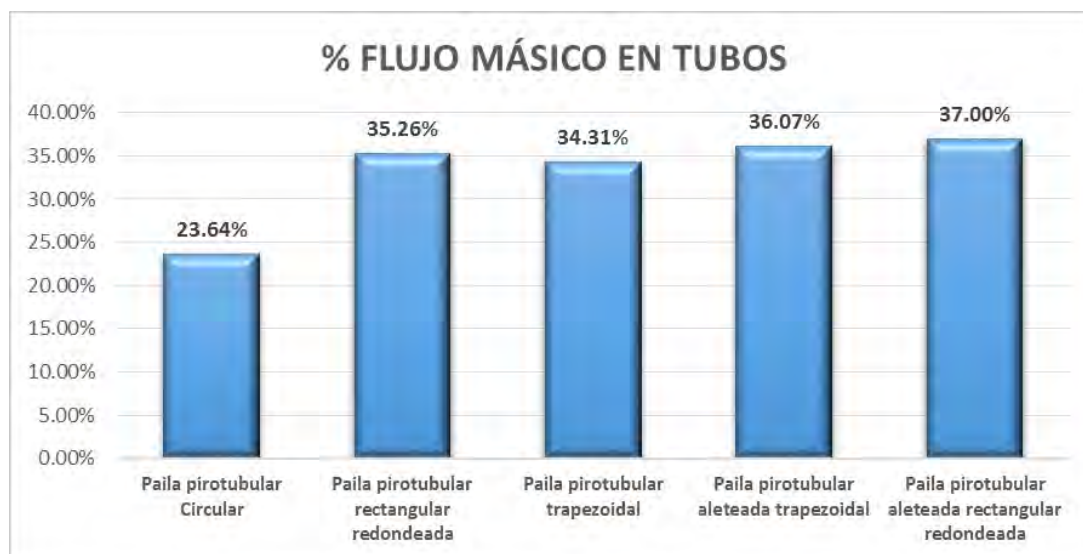
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Comparación y selección

A continuación, se realiza una comparación de los parámetros de interés fluidodinámico, térmico y estructural con el fin de poder seleccionar la paila pirotubular que presente el mejor comportamiento. Si bien una paila puede tener un buen comportamiento térmico y fluidodinámico, de nada sirve si falla estructuralmente.

Los parámetros de interés térmico y fluidodinámicos obtenidos directamente mediante la simulación CFD son el porcentaje de flujo másico que pasa por los pirotubos, la temperatura a la salida de los gases de combustión y la potencia térmica cedida a la paila.

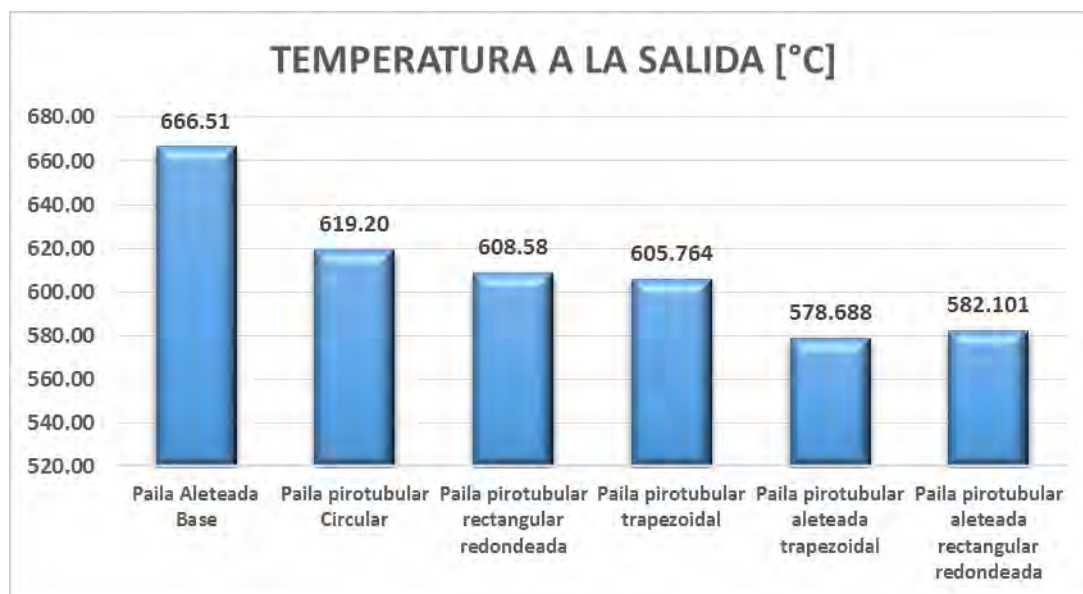
El flujo másico total de los gases de combustión que fluye a través del ducto de humos es de  $0.536 \text{ kg/m}^3$ . Como se puede observar en la figura 137, del flujo total, sólo cierto porcentaje fluye a través de los pirotubos de cada paila. El Dominio 1 presenta el menor porcentaje de flujo, mientras que el mayor valor corresponde al Dominio 5. Esto se debe a que el área transversal de los pirotubos trapezoidales es mucho mayor que la de los pirotubos circulares. Una mayor área transversal y en consecuencia un mayor flujo en los pirotubos corresponde a una mayor transferencia de calor hacia la paila como se verá más adelante.



**Figura 137. Porcentaje de flujo mássico en los pirotubos.**

Fuente: Elaboración propia.

Otro parámetro de interés es la temperatura media de los gases de combustión en la salida de cada dominio (ver figura 138). Una menor temperatura a la salida indica que la energía térmica proveniente de los gases de combustión ha sido mejor aprovechada como consecuencia de una mejor transferencia de calor, la cual se relaciona con el área total de transferencia de calor.



**Figura 138. Temperatura media de los gases productos de combustión a la salida.**

Fuente: Elaboración propia.

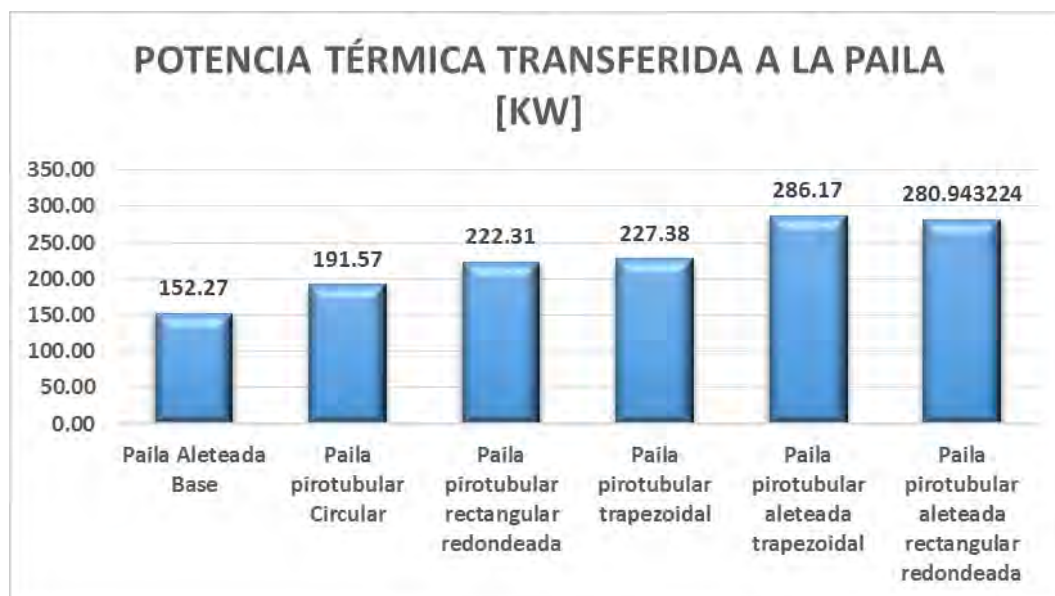
En este sentido, no sólo los pirotubos juegan un papel importante sino que se añade el efecto de las aletas. Por esta razón, las pailas piroaleteadas tienen una menor temperatura a la salida que las pirotubulares. De las dos pailas piroaleteadas (Dominio 4 y Dominio 5), la que presenta un menor valor es la trapezoidal (Dominio 4). Sin

embargo, la diferencia entre ambas es pequeña y tiene el mismo valor que en sus equivalentes sin aletas.

La potencia térmica transferida a la paila proveniente de los gases de combustión tiene una estrecha relación con el parámetro anterior. Mientras mayor potencia ceden los gases de combustión a la paila, menor será su temperatura media a la salida del dominio.

Este parámetro también se relaciona directamente con el área de transferencia de calor y con el flujo másico que circula a través de la paila. Mientras mayor sea el área total de transferencia de calor, mayor será la potencia térmica cedida a la paila. Por este mismo motivo, se cumple además, que mientras mayor sea el flujo que circula a través de los pirotubos, mayor será la potencia cedida a la paila. Esto último, se debe a que el área de transferencia de los pirotubos es mayor que el 50% del total en todos los dominios.

Como es de esperarse las pailas piroaleteadas tienen una mayor área de transferencia y por lo tanto, permiten intercambiar una mayor potencia térmica en comparación a las pirotubulares. Como se puede observar en la figura 139, la mayor potencia térmica corresponde al Dominio 4 con 286 kW seguida del Dominio 5 con 280 kW.

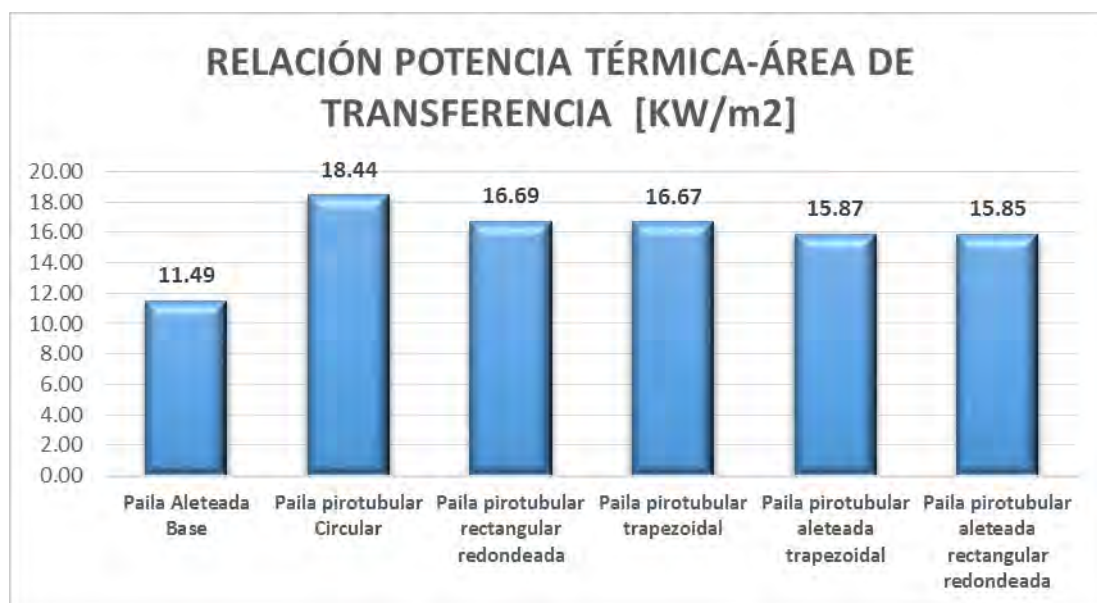


**Figura 139.** Potencia térmica cedida a las pailas pirotubulares.

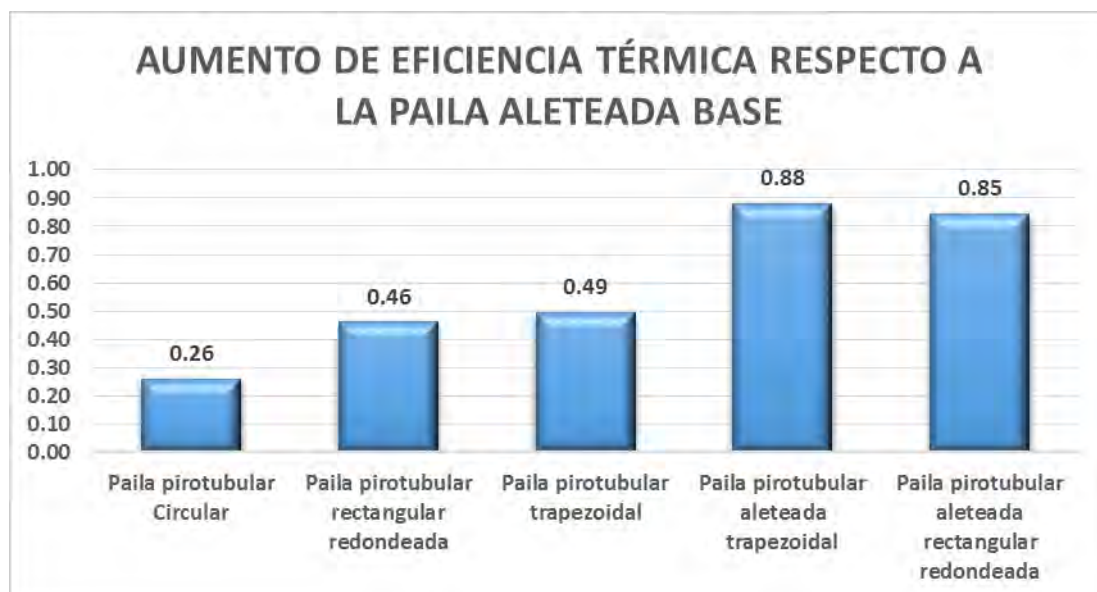
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 140, se puede apreciar la relación de la potencia térmica cedida a la paila proveniente de los gases de combustión respecto al área de transferencia de cada paila. Este parámetro indica qué geometría de pirotubo permite una mejor transferencia de calor por metro cuadrado de área.

Si bien es cierto, los pirotubos con geometría circular (Dominio 1) tienen el mayor valor, debido a su geometría, el área transversal que pueden ocupar es mucho menor en relación con los pirotubos de geometría trapezoidal o rectangular redondeada y por lo tanto, los pirotubos tienen menor área de transferencia. Por otra parte, el menor valor corresponde a la paila aleteada base de la referencia [1], lo que muestra la mayor efectividad de los pirotubos sobre las aletas como medio de transferencia de calor.



**Figura 140. Relación potencia térmica respecto al área de transferencia.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 141. Aumento de eficiencia respecto a la paila aleteada base.**  
Fuente: Elaboración propia.

Al comparar la eficiencia de cada paila con respecto a la paila aleteada base de la referencia [1], se puede determinar cuánto es el aumento de cada dominio analizado, entendiéndose como eficiencia a la razón entre la potencia térmica real transferida a cada paila y la potencia térmica ideal transferida a cada paila. Como se observa en la figura 141, los dominios 4 y 5 presentan los valores más altos, siendo el dominio 4 el más eficiente.

En cuanto al análisis estructural, el parámetro de interés es el factor de seguridad. En caso de tener un valor mayor a uno, nos indica que tan robusta es la paila; caso contrario, nos indica que la paila se ha roto o ha fallado estructuralmente. Como se observa en la figura 142, las pailas pirotubulares (Dominios 1, 2 y 3) tienen un mejor comportamiento estructural, es decir, presentan menos esfuerzos térmicos en comparación con las pailas piroaleteadas (Dominios 4 y 5). Esto se debe a que estas últimas soportan mayores temperaturas como consecuencia del mayor flujo de calor por las aletas. Además, se observa que la paila piroaleteada trapezoidal (Dominio 4) tiene un factor de seguridad menor a 1, es decir, falla estructuralmente.



**Figura 142. Factor de seguridad mínimo de cada dominio.**

Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados y parámetros anteriores, se concluye que la paila con mejor comportamiento térmico, fluidodinámico y estructural es la paila piroaleteada rectangular redondeada (Dominio 5).



## Conclusiones

La presente tesis de pregrado denominada “Estudio fluidodinámico y estructural de pailas paneleras pirotubulares”, tiene como objetivo principal incrementar la eficiencia del módulo panelero de Santa Rosa de Chonta, analizado en la tesis doctoral de la referencia [1], mediante la implementación de una paila pirotubular que reemplace la paila evaporadora actual [1]. Para ello se han utilizado herramientas y técnicas de dinámica de fluidos computacional y elementos finitos con el fin de predecir el comportamiento térmico, fluidodinámico y estructural de cada paila, y así poder seleccionar la más eficiente. A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se ha determinado mediante simulación numérica, la tasa de transferencia de calor y la distribución de esfuerzos de tres tipos de pailas pirotubulares y dos piroaleteadas con el fin de reemplazar la paila evaporadora de la hornilla panelera de la referencia [1] y aumentar su eficiencia térmica.
- Se ha comprobado que los pirotubos son un medio más eficiente de transferencia de calor en las pailas en comparación a las aletas. Además, las temperaturas superficiales alcanzadas son menores y por lo tanto, se generan menos esfuerzos térmicos.
- De las geometrías de pirotubos estudiadas, los pirotubos circulares son los más eficientes ya que utilizan menor área para una misma cantidad de transferencia de calor. Sin embargo, debido a su geometría, no se aprovecha de manera eficiente el área disponible para los pirotubos y en consecuencia se tiene una menor área de transferencia. Por este motivo, se prefiere el uso de pirotubos con geometría trapezoidal o rectangular redondeada.
- Los pirotubos de geometría trapezoidal tienen la mayor eficiencia térmica, sin embargo, presentan esfuerzos térmicos por encima del esfuerzo último del material empleado. Por este motivo, se prefieren los pirotubos de geometría rectangular redondeada, los cuales tienen una eficiencia térmica muy cercana, aunque menor, pero presentan un mejor comportamiento estructural al generarse menores esfuerzos térmicos.

- Es posible aumentar la eficiencia de las pailas pirotubulares aleteadas rectangular redondeadas mediante la parametrización de la cantidad y dimensiones de los pirotubos, teniendo en cuenta siempre el compromiso entre la eficiencia térmica y el comportamiento estructural.

## Bibliografía

- [1] La Madrid Olivares, Raúl. **Modelación numérica del proceso de transferencia de calor en intercambiadores de calor abiertos utilizados en la industria panelera.** Tesis para optar por el título de Doctor en Control y Automatización. Universidad de Piura – 2015.
- [2] Jaswant Singh, Solomon S and Dilip Kumar. **Manufacturing Jaggery, a Product of Sugarcane, As Health Food.** Indian Institute of Sugarcane Research, Lucknow, India.
- [3] Hugo R. García B, Luis C. Albarracín, Adriana Toscano Latorre, Natalia J. Santana, I.A. Orlando Insuasty. **Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera.** Ministerio de Agricultura y desarrollo rural – Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). 2007.
- [4] Osorio Cadavid, Guillermo. **Buenas prácticas agrícolas BPA y buenas prácticas de manufactura BPM en la producción de caña y panela.**
- [5] Quezada Moreno, Walter F. **Guía técnica de agroindustria panelera.** Ibarra-Ecuador 2007.
- [6] Ministerio de agricultura y desarrollo rural- Programa nacional de transferencia tecnológica agropecuaria Pronatta. **Guía para la elaboración de panela orgánica.** MOCOA, 2002
- [7] La Madrid Olivares, Raúl. **Uso eficiente de la energía producida por la combustión de biomasa.** Tesis para optar por el título de Master en Gestión y Auditorías Ambientales. Universidad de Piura – 2012.
- [8] Soler Villamizar, Juan Pablo y Gómez Tovar, Franco Hernán. **Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-Cimpa y Plana-Cimpa en hornillas paneleras.** Universidad Industrial de Santander – 2004.

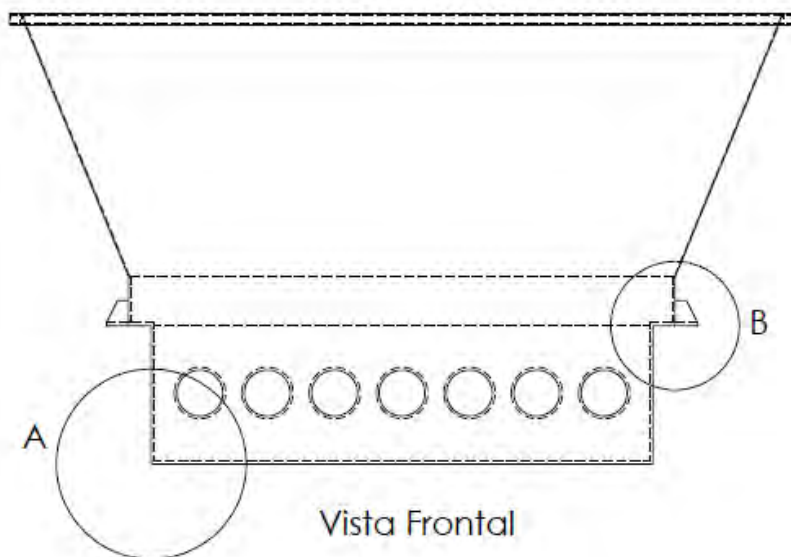
- [9] Gordillo, Gerardo y Jaramillo, Rita C. **Simulación del movimiento del jugo en un intercambiador pirotubular para la industria panelera**. Universidad de los Andes – 2000.
- [10] David C. Wilcox. **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, 1994.
- [11] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**. Longman Group Ltd 1995.
- [12] ANSYS Inc. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. Release 12.1, Noviembre 2009
- [13] Carlsson, Jögen. **Fire modeling using CFD**. Lund University, Department of fire safety engineering, Lund 1999.
- [14] Yeoh, G. H.; Yuen, K. K.. **Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering - Theory, Modelling and Practice**. Academic Press, 1st edition, 2009.
- [15] Cengel Y. A. (2007). **Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico (3a ed.)**. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana.
- [16] Modest, M.. **Radiative Heat Transfer**. Academic Press, 2 edition, 2003.
- [17] Modest, M.. **The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer**. Journal of Heat Transfer Vol. 113, August 1991.
- [18] Hottel, H. C., and Sarofim, A. F., 1967. **Radiative Heat Transfer**. McGraw-Hill, New York.
- [19] Jeans, J. H. **The equations of radiative transfer of energy**. Monthly Notices Royal Astronomical Society, vol. 78,
- [20] Kourganoff, V. **Basic Methods in Transfer Problems**. Dover Publications, New York, 1963.
- [21] Davison, B. **Neutron Transport Theory**. Oxford University Press, London, 1958.
- [22] Murray, R. L. **Nuclear Reactor Physics**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1957.
- [23] Jovani, L. Galarça, M. Ramos França, Fr. **New coefficients of the weighted-sum-of-gray-gases model using hitemp 2010 database**. Proceedings of ENCIT 2012 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. 2012.
- [24] Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnston Jr. **Mecánica de Materiales**. McGraw Hill, 5ta edición.
- [25] Russel C. Hibbeler. **Mecánica de Materiales**. Prentice Hall, 8va edición.

- [26] Adrew Pytel; Ferdinand L. Singer. **Resistencia de Materiales**. Oxford University Press, primera edición, 1994.
- [27] Robert L. Mott. **Resistencia de Materiales Aplicada**. Pearson Prentice Hall, 3era edición.
- [28] Charles G. Salmon, John E. Johnson and Faris A. Malhas. **Steel Structures: Design and Behavior**. Pearson Prentice Hall, 5<sup>th</sup> edition, 2009.
- [29] David P. Rowlands. **The Mechanical Properties of Stainless Steel: How these are determined, and the factors which influence their values**. Stainless Steel Information Series N° 3, Southern Africa Stainless Steel Development Association.

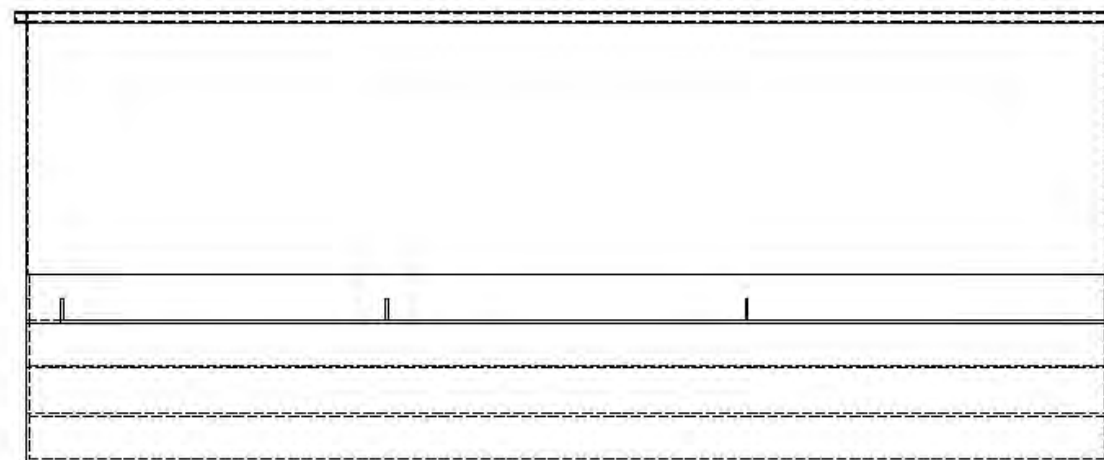


**Anexo A**  
**Planos de diseño de pailas pirotubulares en estudio**

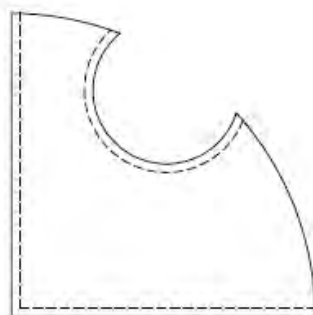




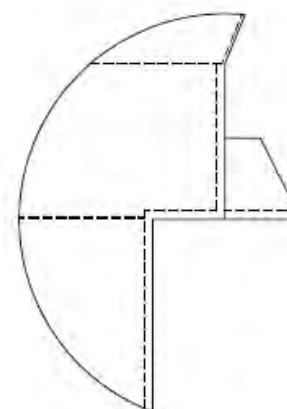
Vista Frontal



Vista Lateral



DETALLE A  
ESCALA 1 : 5



DETALLE B  
ESCALA 1 : 5

Nota:

El diseño y las dimensiones son propiedad intelectual del Departamento de Energía de la Universidad de Piura.

Para cualquier información contactar con el Dr. Ing. Rafael Saavedra.

Diseño  
Dr. Ing. Rafael Saavedra  
Dr. Ing. Elder Mendoza

Sección Energía  
Universidad de Piura

Hoja 1

**Dominio 1**

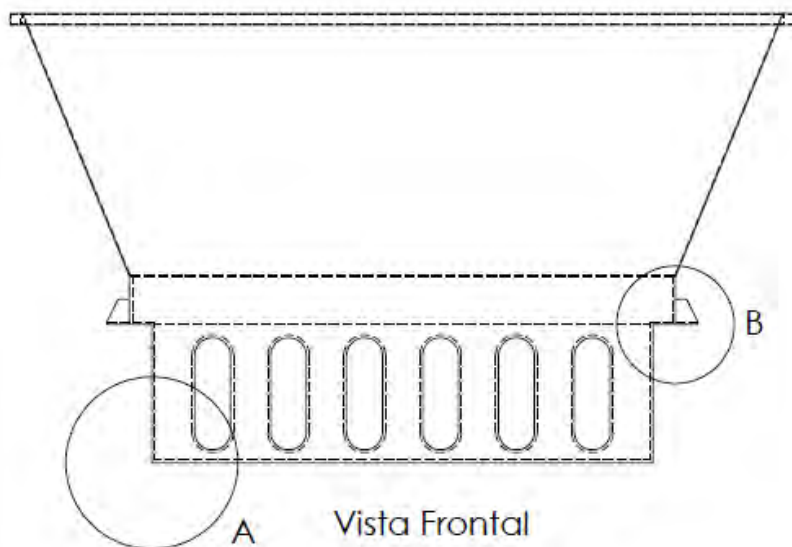
**Pirotubular Circular**

Medidas en mm

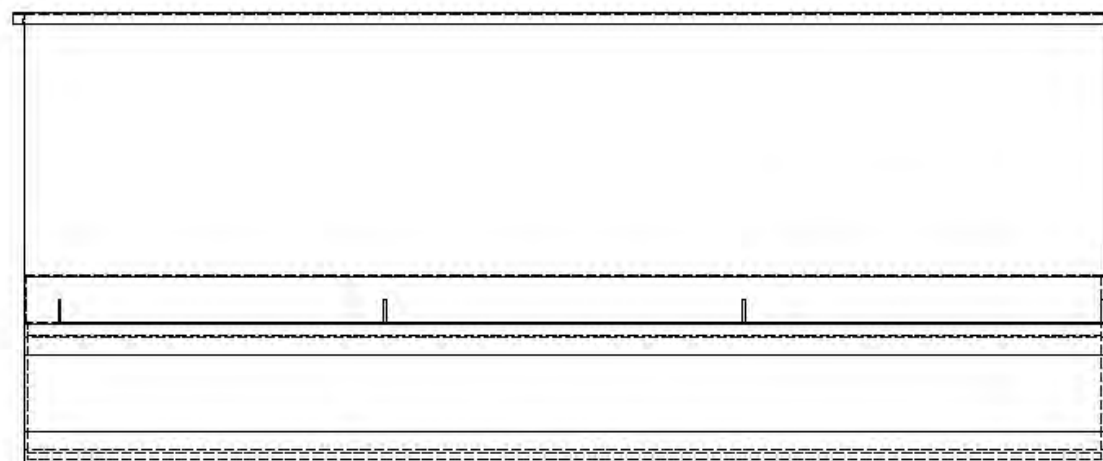
Dibujo  
Gian Carlo Espinoza

Fecha: Enero 2016

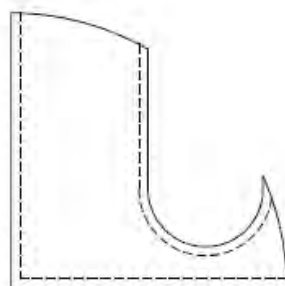




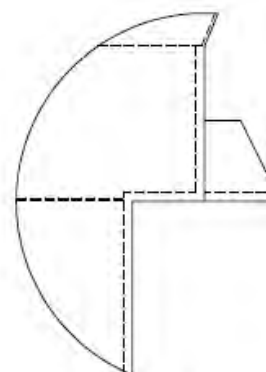
Vista Frontal



Vista Lateral



DETALLE A  
ESCALA 1 : 5



DETALLE B  
ESCALA 1 : 5

**Nota:**

El diseño y las dimensiones son propiedad intelectual del Departamento de Energía de la Universidad de Piura.

Para cualquier información contactar con el Dr. Ing. Rafael Saavedra.

Diseño  
Dr. Ing. Rafael Saavedra  
Dr. Ing. Elder Mendoza

Sección Energía  
Universidad de Piura

Hoja 1

**Dominio 2**

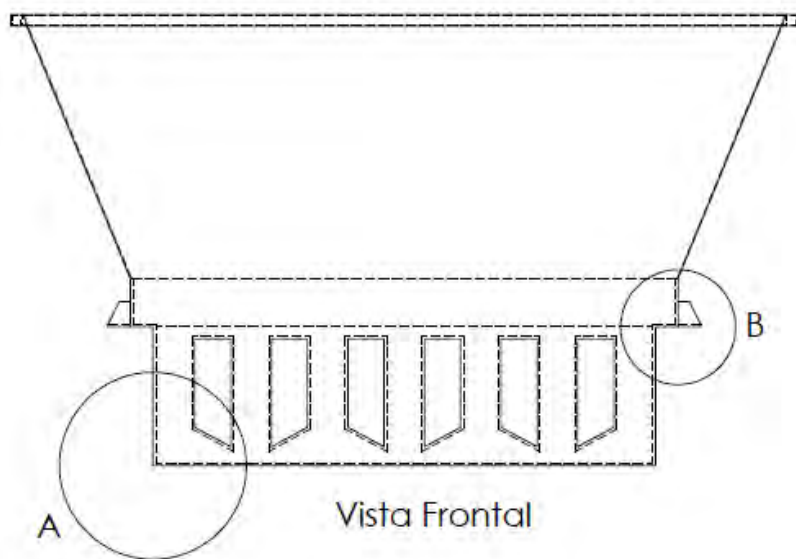
**Pirotubular Rectangular  
Redondeada**

Medidas en mm

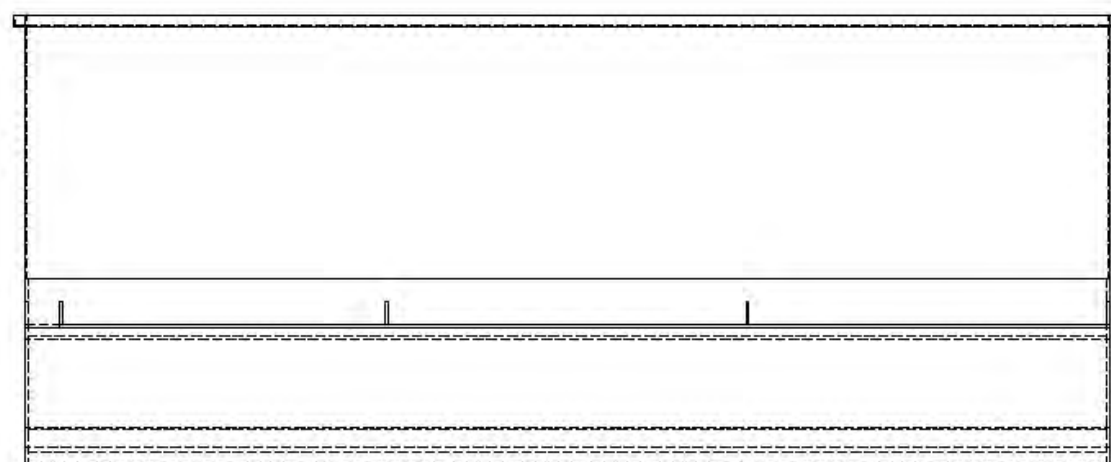
Dibujo  
Gian Carlo Espinoza

Fecha: Enero 2016

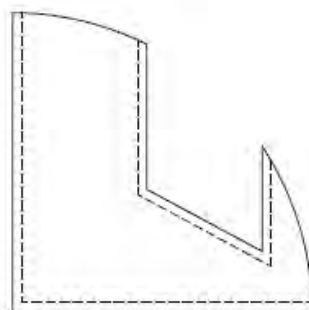




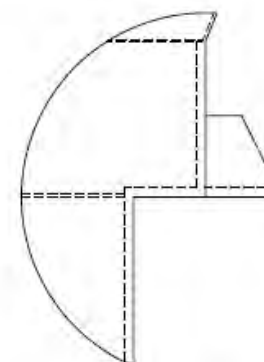
Vista Frontal



Vista Lateral



DETALLE A  
ESCALA 1 : 5



DETALLE B  
ESCALA 1 : 5

Nota:

El diseño y las dimensiones son propiedad intelectual del Departamento de Energía de la Universidad de Piura.

Para cualquier información contactar con el Dr. Ing. Rafael Saavedra.

Diseño  
Dr. Ing. Rafael Saavedra

Sección Energía  
Universidad de Piura

Hoja 1

Dominio 3

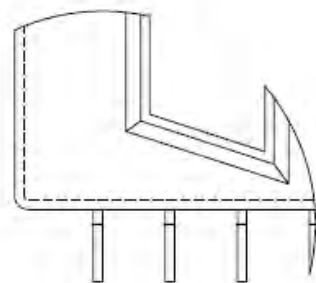
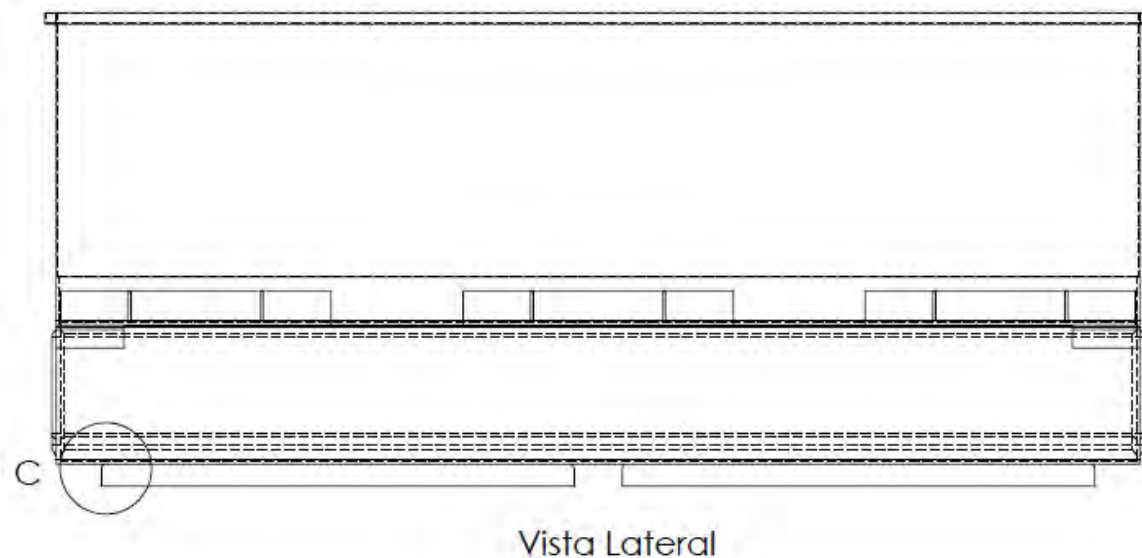
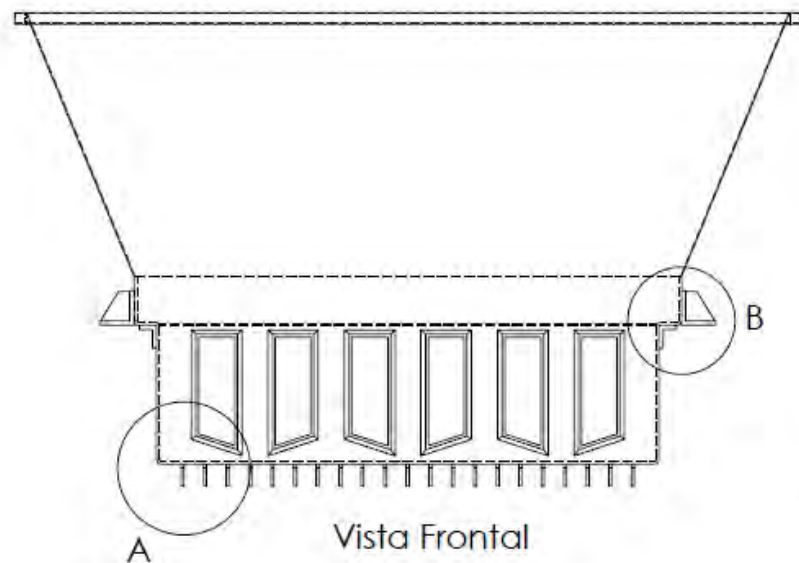
Pirotubular Trapezoidal

Medidas en mm

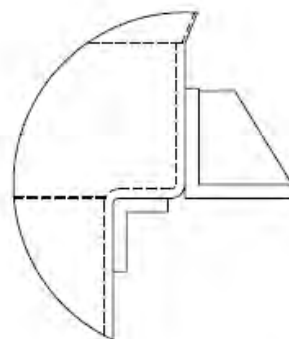
Dibujo  
Gian Carlo Espinoza

Fecha: Enero 2016

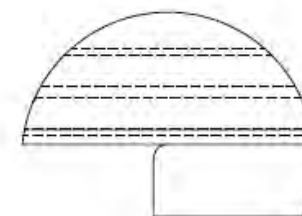




DETALLE A  
ESCALA 1 : 5



DETALLE B  
ESCALA 1 : 5



DETALLE C  
ESCALA 1 : 5

Nota:

El diseño y las dimensiones son propiedad intelectual del Departamento de Energía de la Universidad de Piura.

Para cualquier información contactar con el Dr. Ing. Rafael Saavedra.

Diseño  
Dr. Ing. Rafael Saavedra  
Dr. Ing. Elder Mendoza

Sección Energía  
Universidad de Piura

Hoja 1

**Dominio 4**

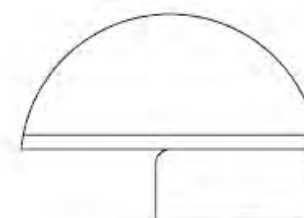
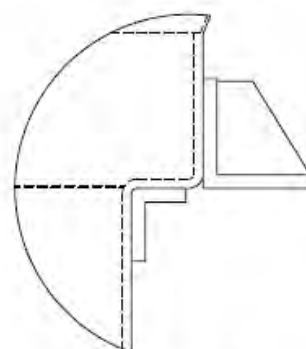
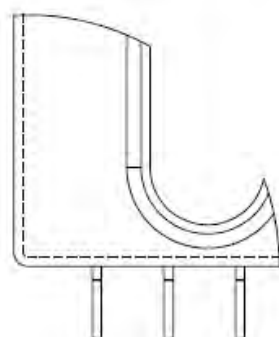
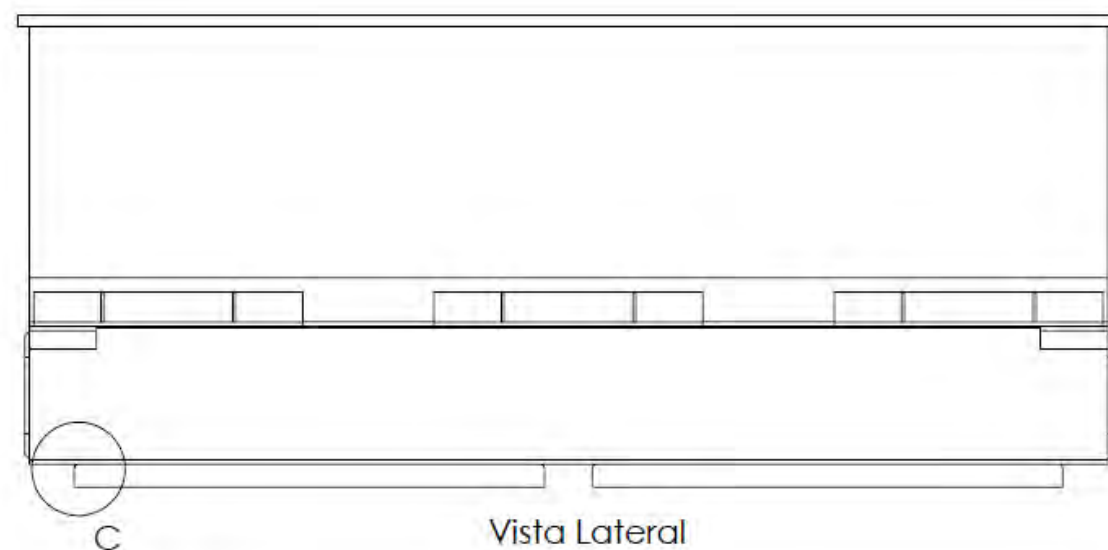
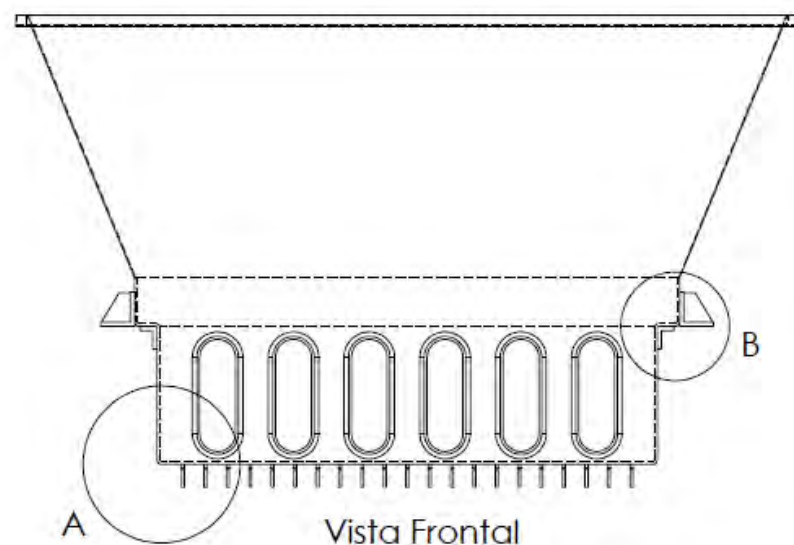
**Piroaleteada Trapezoidal**

Medidas en mm

Dibujo  
Gian Carlo Espinoza

Fecha: Enero 2016





Nota:

El diseño y las dimensiones son propiedad intelectual del Departamento de Energía de la Universidad de Piura.

Para cualquier información contactar con el Dr. Ing. Rafael Saavedra.

Diseño  
Dr. Ing. Rafael Saavedra  
Dr. Ing. Elder Mendoza

Sección Energía  
Universidad de Piura

Hoja 1

**Dominio 5**

**Piroaleteada Rectangular  
Redondeada**

Medidas en mm

Dibujo  
Gian Carlo Espinoza

Fecha: Enero 2016



## Anexo B

### Propiedades del acero estructural A36 y acero inoxidable A304

**Tabla B1. Propiedades de transporte del acero estructural A36.**

| Propiedad                           | Temperatura [K] |      |      |     |      |      |
|-------------------------------------|-----------------|------|------|-----|------|------|
|                                     | 100             | 200  | 400  | 600 | 800  | 1000 |
| Conductividad<br>térmica<br>[W/m·K] | 49.8            | 49.8 | 49.8 | 44  | 37.4 | 29.3 |
| Calor<br>específico<br>[J/kg·K]     | 501             | 501  | 501  | 582 | 699  | 971  |

Fuente: Transferencia de calor y masa [13].

**Tabla B2. Propiedades de transporte del acero inoxidable A304.**

| Propiedad                           | Temperatura [K] |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|
|                                     | 100             | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| Conductividad<br>térmica<br>[W/m·K] | 9.2             | 12.6 | 16.6 | 19.8 | 22.6 | 25.4 |
| Calor<br>específico<br>[J/kg·K]     | 272             | 402  | 515  | 557  | 582  | 611  |

Fuente: Transferencia de calor y masa [15].