

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN BASADO EN LA
COMBUSTIÓN DE CASCARILLA DE PALMISTE, PARA GALPONES DEL
SECTOR AVÍCOLA.**

**LUCAS ADRIAN ARDILA RUEDA
NICOLAS PATIÑO LAGOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2022

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN BASADO EN LA
COMBUSTIÓN DE CASCARILLA DE PALMISTE, PARA GALPONES DEL
SECTOR AVÍCOLA.**

**LUCAS ADRIAN ARDILA RUEDA
NICOLAS PATIÑO LAGOS**

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico

ISNARDO GONZALEZ JAIMES

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2022

DEDICATORIA

Principalmente a mis padres Noel Ardila y Nancy Rueda, quienes con esfuerzo y sacrificio me impulsaron a salir adelante para culminar con mis estudios, siendo un pilar fundamental en mi desarrollo moral, social y profesional.

Con todo el aprecio a mi hermano mayor Camilo Ardila, el cual me enseñó carácter y valentía para cumplir con todos mis propósitos, sin importar cuantos obstáculos se presenten.

A mis amigos y compañeros que aportaron conocimiento y esfuerzo para ir superando cada derrota y celebrando cada victoria.

Lucas Adrian Ardila Rueda

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, por brindarme sabiduría, esperanza y por dotarme de mi familia que me apoya incondicionalmente.

A mis padres Carlos Patiño y Marisol Lagos, por brindarme la enseñanza ética y moral, por la confianza, esfuerzo y dedicación para otorgarme la posibilidad de ser un profesional. Por el amor y los buenos consejos para ser mejor persona. A mi hermano Luis Patiño y mi abuelo Luis Lagos mis fuentes de inspiración, por sus consejos y ejemplos de profesional, quienes me impulsaron a culminar mis estudios.

A mis amigos, quienes me apoyaron en todo momento, aprendiendo de triunfos y derrotas, aprendiendo a trabajar en equipo y superar cualquier problema.

Nicolas Patiño Lagos

AGRADECIMIENTOS

A la empresa INDUSTRIAS ARCHILA S.A.S.

A nuestro director de proyecto Isnardo Gonzalez Jaimes, Profesor de la escuela de ingeniería mecánica, por su confianza, por asesorarnos de la mejor manera y tener la mejor disposición para aconsejarnos y brindarnos sus conocimientos.

A nuestras familias, amigos y todas las personas que fueron parte de este proceso, brindando apoyo para la realización de este proyecto, como también para la formación ética y profesional durante la carrera.

Lucas Adrian Ardila Rueda

Nicolas Patiño Lagos

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	22
1.3 OBJETIVOS.....	24
1.3.1 Objetivo General.....	24
1.3.2 Objetivos específicos	24
2. MARCO TEÓRICO DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN.....	25
2.1 GENERALIDADES	25
2.2 COMPOSICIÓN Y FUNCIONAMIENTO.	26
2.2.1 Quemadores según la fase de combustible utilizada.	27
2.2.1.1 Quemador de lecho fluidizado.	27
2.2.1.2 Quemador de lecho fijo.....	28
2.3 COMPONENTES DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN.	30
2.3.1 Cámara de combustión. Va enseguida	30
2.3.2 Intercambiadores de calor.....	38
2.3.3 Sistema de ventilación.	44
2.4 GENERALIDADES DEL ACONDICIONAMIENTO AMBIENTAL PARA EL CRIADERO DE POLLOS.	48
3. DISEÑO CONCEPTUAL.....	49
3.1 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARTICULARES.....	49
3.1.1 Calefacción para galpones.....	49
3.1.2 Intercambiador de Calor.....	53
3.1.3 Cámara de combustión.....	57
3.1.4 Sistema de ventilación	61
3.2 DESCRIPCIÓN PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	65
3.2.1 Solución del sistema de calefacción.....	65
3.2.2 Solución del subsistema de intercambiadores de calor.....	66
3.2.3 Solución del subsistema de cámara de combustión.....	66
3.2.4 Solución del subsistema de ventilación.....	67
4. DISEÑO EN DETALLE DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN.....	69
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA.....	69

4.2 DISEÑO DEL CALEFACTOR.....	75
4.2.1 Calor de Diseño.....	75
4.3 DISEÑO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	76
4.3.1 Diseño de la parrilla.....	76
4.3.2 Eficiencia del equipo.....	77
4.3.3 Selección del ventilador de combustión.....	78
4.3.4 Análisis de Transferencia de calor	80
4.4 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	82
4.4.1 Determinación del arreglo de tubos	82
4.4.2 Determinación del blower de aire caliente.....	85
4.4.3 Efectividad del intercambiador de calor.....	87
4.5 DISEÑO FINAL DEL EQUIPO (CAD)	89
4.5.1 Parrilla y bazuca de aire.....	89
4.5.2 Cámara de combustión.....	90
4.5.3 Intercambiador de calor	92
4.5.4 Base para la cámara de combustión.....	92
4.5.5 Bastidor	93
4.5.6 Generador de aire caliente.....	95
4.6 ANÁLISIS ESTÁTICO Y TÉRMICO (CAE).....	96
4.6.1 Análisis estático.	96
4.6.2 Análisis térmico.....	98
5. PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL GENERADOR DE CALOR.....	101
5.1 CÁMARA DE COMBUSTIÓN	103
5.2 INTERCAMBIADOR DE CALOR.	105
6. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO	109
6.1 VERIFICACIONES PRELIMINARES DE FUNCIONAMIENTO.	109
6.2 PRUEBAS EN CAMPO.....	113
6.3 RESULTADOS	115
6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	119
6.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL GENERADOR DE CALOR.....	124
7. DISEÑO DEL FLUJO ECONÓMICO DEL PROYECTO.....	129
7.1 VALOR PRESENTE NETO DEL PROYECTO (VPN).....	131
7.2 TASA INTERNA DE RETORNO DEL PROYECTO (TIR).....	134

8. CONCLUSIONES 136
BIBLIOGRAFÍA.....138

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Matriz de calidad.....	52
Tabla 2. Parámetros de calidad de las alternativas de intercambiadores de calor ..	56
Tabla 3. Parámetros de calidad de las alternativas de la cámara de combustión ..	60
Tabla 4. Parámetros de calidad de las alternativas del sistema de ventilación.....	64
Tabla 5. Cálculo de los gramos de cada componente del cuesco.....	70
Tabla 6. Cálculo de moles de cada componente del cuesco.....	70
Tabla 7. Cálculo de los subíndices de la formula empírica.....	71
Tabla 8. Ecuación empírica con 50% de exceso de aire.....	72
Tabla 9. Cálculo de la relación aire combustible del cuesco.....	72
Tabla 10. Relación de la temperatura de llama adiabática.....	73
Tabla 11. Cálculo de la temperatura de llama adiabática.....	74
Tabla 12. Temperatura inicial llama adiabática.....	74
Tabla 13. Calor de diseño.....	75
Tabla 14. Medidas de la parrilla.....	76
Tabla 15. Eficiencia del equipo.....	77
Tabla 16. Balance de masa.....	78
Tabla 17. Transferencia de calor en la cámara de combustión.....	81
Tabla 18. Perdidas de calor y área de combustión efectiva.....	82
Tabla 19. Determinación del arreglo de tubos.....	83
Tabla 20. Cálculo del flujo masico de los gases de combustión.....	84
Tabla 21. Propiedad (cp) del aire a 1 atmosfera de presión.....	84

Tabla 22. Cálculo del Cp de los gases de combustión.....	85
Tabla 23. Cálculo del flujo volumétrico del ventilador al galpón.....	85
Tabla 24. Cálculo del Cp del aire ambiente que pasa por los tubos.....	87
Tabla 25. Efectividad del intercambiador de calor.....	88
Tabla 26. Ficha de fabricación parrilla.....	103
Tabla 27. Ficha de fabricación bazuca de aire.....	104
Tabla 28. Ficha de fabricación de láminas laterales del generador de calor.....	104
Tabla 29. Ficha de fabricación laminas internas frontal y trasera de cámara de ... combustión y túnel de extracción de cenizas.	105
Tabla 30. Ficha de fabricación de apoyos y arreglo de tubos.....	105
Tabla 31. Ficha de fabricación de láminas separadoras de intercambiador de ... Calor.	106
Tabla 32. Ficha de fabricación de carcaza externa e interna de tubos.....	106
Tabla 33. Ficha de fabricación laminas externas frontal y trasera de cámara..... de combustión.	107
Tabla 34. Ficha de fabricación de bridas, bases y puertas del generador de calor.	107
Tabla 35. Ficha de fabricación de bisagras y entrada de chimenea.....	108
Tabla 36. Resultados prueba de velocidad aire parrilla.....	115
Tabla 37. Resultados prueba de velocidad aire al galpón.....	115
Tabla 38. Datos primer encendido calefactor, primero 30 minutos del encendido..	116
Tabla 39. Resultados primer prueba de encendido del generador de calor.....	116
Tabla 40. Resultados según la prueba de encendido del generador de calor.....	117
Tabla 41. Resultados tercera prueba de encendido generador de calor.....	117
Tabla 42. Resultados cuarta prueba de encendido generador de calor.....	118
Tabla 43. Resultados implementación de generador de calor en galpón.....	118

Tabla 44. Ficha técnica del equipo.....	123
Tabla 45. Generador de aire caliente con biomasa Vs turbo calentador	124
Tabla 46. Generador de aire caliente con biomasa vs criadoras infrarrojas	125
Tabla 47. Rango de evaluación	125
Tabla 48. Calefactor de biomasa Vs Criadoras y turbo calentadores	126
Tabla 49. Resultados de la tabla de comparación	128
Tabla 50. Costo componentes del calefactor	129
Tabla 51. Costos de construcción del calefactor	130
Tabla 52. Costos de construcción trimestral	130
Tabla 53. Precio de venta del calefactor	130
Tabla 54. Costo total de fabricación del calefactor trimestral	131
Tabla 55. Modificación del interés anual a interés mensual	132
Tabla 56. Costo mensual de construcción	132
Tabla 57. Cálculo del valor presente neto de los egresos	133
Tabla 58. Cálculo del valor presente neto de los ingresos	133
Tabla 59. Cálculo del valor presente del proyecto.....	134
Tabla 60. Cálculo de la tasa interna de retorno del proyecto.....	135

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo del proceso.....	22
Figura 2. Tecnologías principales de combustión	28
Figura 3. Tipos de flujo	29
Figura 4. Cámara de combustión de acero refractario.....	31
Figura 5. Cámara de combustión de acero.....	32
Figura 6. Cámara de combustión con parrilla fija.....	33
Figura 7. Cámara de combustión con parrilla móvil.....	34
Figura 8. Cámara de combustión con alimentación inferior.....	35
Figura 9. Ruta de combustión de una partícula de biomasa.....	36
Figura 10. Propiedades de la combustión de biomasa.....	37
Figura 11. Cascarilla de palmiste.....	37
Figura 12. Propiedades de combustión para biomasa de palma africana.....	38
Figura 13. Intercambiador de calor de doble tubo.....	39
Figura 14. Intercambiador carcaza y tubos.....	41
Figura 15. Intercambiador de calor de flujo paralelo.....	42
Figura 16. Intercambiador de contraflujo.....	43
Figura 17. Intercambiador de flujo cruzado.....	43
Figura 18. Ventilador con hélices radiales rectas.....	45
Figura 19. Ventilador con hélices curvas hacia adelante.....	45
Figura 20. Ventilador con hélices curvas hacia atrás.....	46
Figura 21. Ventilador helicoidal.....	47
Figura 22. Ventilador axial.....	48

Figura 23. Criadora infrarroja.....	49
Figura 24. Calentador convectivo de galpón.....	50
Figura 25. Calentador Diesel eléctrico.....	51
Figura 26. Intercambiador de calor le placas.....	53
Figura 27. Intercambiador de calor de coraza y tubos.....	54
Figura 28. Intercambiador de calor de espiral.....	55
Figura 29. Quemador de parrilla fija.....	57
Figura 30. Quemador de parrilla móvil.....	58
Figura 31. Quemador con alimentación inferior por tornillo sin fin.....	59
Figura 32. Ventilador centrifugo de hélices rectas.....	61
Figura 33. Ventilador centrifugo de hélices hacia adelante.....	62
Figura 34. Ventilador de hélices hacia atrás.....	63
Figura 35. Calentador central galpón de cascarilla de palma africana.....	65
Figura 36. Intercambiador de coraza y tubos interno.....	66
Figura 37. Cámara de combustión (quemador) con alimentación de tornillo sin.... fin inferior.	67
Figura 38. Ventilador centrifugo de aire (hélices hacia adelante). Dirigido hacia.... el interior del galpón y dirigido hacia el interior de la cámara de combustión	68
Figura 39. Características del análisis próximo y elemental del cuesco de palma..	69
Figura 40. Selección del ventilador de aire para combustión.....	79
Figura 41. Curva característica del ventilador de aire para combustión	80
Figura 42. Selección del ventilador centrifugo de aire caliente	86
Figura 43. Curva característica del ventilador centrifugo de aire caliente.....	86
Figura 44. Parrilla	89
Figura 45. Bazuca de aire	90

Figura 46. Cámara de combustión	90
Figura 47. Laminas disipadoras de calor	91
Figura 48. Intercambiador de calor	92
Figura 49. Base para la cámara de combustión	93
Figura 50. Ensamble calefactor, base para la cámara de combustión	93
Figura 51. Carcaza del generador de aire caliente	94
Figura 52. Base angular	94
Figura 53. Puerta del generador de aire caliente	95
Figura 54. Generador de aire caliente	95
Figura 55. Propiedades mecánicas acero ASTM A-36.....	97
Figura 56. Análisis de desplazamientos elaborado en SolidWorks	97
Figura 57. Factor de seguridad elaborado en SolidWorks	98
Figura 58. Análisis térmico elaborado por SolidWorks	99
Figura 59. Vista parrilla del análisis térmico	99
Figura 60. Vista base caldera del análisis térmico	100
Figura 61. Cortadora punzadora múltiple Durma	101
Figura 62. Cortadora Durma CN de lámina	101
Figura 63. Cilindradora	102
Figura 64. Dobladora Durma CN	102
Figura 65. Mesa de corte plasma CNC	102
Figura 66. Prueba de humo ventilador de combustión	109
Figura 67. Prueba de humo tubos traseros	109
Figura 68. Prueba salida de aire ventilador de aire caliente	110
Figura 69. Sistema de medición de temperatura	110

Figura 70. Prueba a termocupla con baso con agua y hielo	111
Figura 71. Llenado de cascarilla	111
Figura 72. Pruebas de velocidad de salida de aire ventilador de combustión	112
Figura 73. Cenizas generadas	112
Figura 74. Toma de temperatura de combustión	113
Figura 75. Galpón avícola granja Rio Claro.....	113
Figura 76. Ventiladores de galponeras	114
Figura 77. Distribución de inyección de aire y pruebas de velocidad en galpón ...	114
Figura 78. Grafica de prueba #1.....	119
Figura 79. Grafica de prueba #2.....	120
Figura 80. Grafica de prueba #3.....	121
Figura 81. Grafica de prueba #4.....	122
Figura 82. Tanque de GLP.....	127
Figura 83. Criadora infrarroja de radiación	128
Figura 84. Diagrama de flujo económico trimestral.....	131
Figura 85. Diagrama de flujo económico anual.....	132

LISTA DE ANEXOS

**(Ver anexos adjuntos y pueden visualizarlos en la Base de datos de la
Biblioteca UIS)**

Anexo A. Marco teórico del acondicionamiento ambiental para criadero de pollos.

Anexo B. Industrias Archila S.A.S.

Anexo C. Certificación de prácticas INDARS S.A.S.

Anexo D. Ecuaciones realizadas en el software EES.

Anexo D. Presentación de planos.

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN BASADO EN LA COMBUSTIÓN DE CASCARILLA DE PALMISTE, PARA GALPONES DEL SECTOR AVÍCOLA. *

AUTORES: LUCAS ADRIAN ARDILA RUEDA
NICOLAS PATIÑO LAGOS **

PALABRAS CLAVE: Avícola, galpón, generador de calor, biomasa, sistemas de calefacción.

DESCRIPCIÓN:

El propósito de este proyecto es promover el aprovechamiento de combustibles a base de biomasa y mejorar los mecanismos de acondicionamiento para galpones de pollos en el departamento de Santander, con el propósito de dar un estímulo muy importante al desarrollo avícola e incentivar a la industria que utilice el bio-combustible generado por empresas del departamento. De esta manera se ejecutó el desarrollo de un sistema de calefacción basado en la combustión de cascarilla de palmiste, que cumplió con los requerimientos necesarios para adaptar un galpón destinado a la crianza de pollos de $150 \times 30 \text{ m}^2$ (ciento cincuenta por treinta metros cuadrados), el cual fue implementado en la granja Rio Claro, garantizando el desarrollo óptimo de las aves. Adicionalmente se compara el sistema de calefacción con los sistemas tradicionales de crianza avícola, como lo son: Criadoras infrarrojas y turbo calentadores.

Este proyecto se fundamentó en distinta información recopilada de trabajos de grado, libros, catálogos, artículos y guías relacionadas con los parámetros de diseño y capacidad adecuados para un sistema de calefacción utilizado en un galpón de crianza avícola. Asimismo, se dispone con la experiencia obtenida por la empresa INDARS S.A.S., la cual se desempeña en el sector metalmecánico en especial del diseño y la fabricación de maquinaria avícola y agroindustrial.

* Trabajo de grado

** Facultad físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director Isnardo Gonzalez.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A HEATING SYSTEM BASED ON THE COMBUSTION OF PALM SHELL (CASCARILLA DE PALMA), FOR POULTRY SHEDS OF THE POULTRY SECTOR*

AUTHORS: LUCAS ADRIAN ARDILA RUEDA
NICOLAS PATINO LAGOS **

KEY WORDS: Poultry, poultry house, heat generator, biomass, heating systems.

DESCRIPTION:

The purpose of this project is to promote the use of biomass-based fuels and improve the conditioning mechanisms for chicken sheds in the department of Santander, in order to give a very important stimulus to the poultry development and to encourage the industry to use the biofuel generated by companies of the department. In this way, the development of a heating system based on the combustion of (PALL SHELL) cascarilla de Palma was executed, which fulfilled the necessary requirements to adapt a 150 x 30 m. (one hundred and fifty by thirty square meters), which was implement at the Rio Claro farm. guaranteeing the optimal development of the birds. Additionally, the heating system is compared to traditional poultry rearing systems, such as: infrared brooder and turbo-hearts.

This project was based on different information gathered from graduated works, books, catalogs, articles, and guides related to the design parameters and adequate capacity for a heating system used capacity for a heating system used in a poultry house. It is also based on the experience gained by the company INDARS S.A.S, a company that works in the metal-mechanic sector, especially in design and manufacture of poultry and agro-industrial machinery.

* Bachelor Thesis.

** Facultad físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director Isnardo Gonzalez.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la avicultura es una actividad agrícola de importancia, ya que esta es la encargada de producir los alimentos habituales en la alimentación de los seres humanos. El departamento de Santander es un potencial generador de productos avícolas, puesto que tiene el 25% de la producción de huevo y carne de pollo a nivel nacional; sin embargo, las condiciones climáticas son un problema fundamental para el desarrollo de las aves. Por otra parte, la producción de energía térmica a partir de biomasa es uno de los grandes retos de la ingeniería que ha ido adquiriendo mayor relevancia en el transcurso del tiempo por ser una fuente de energía renovable.

Por este motivo surgió la necesidad de desarrollar un sistema de calefacción basado en la combustión de cascarilla de palmiste, que cumpla con los requerimientos necesarios para adaptar un galpón destinado a la crianza de pollos, cuyo objetivo sea el del aprovechamiento de la cascarilla de palmiste como fuente de energía térmica. A su vez también se busca impulsar el desarrollo avícola en el departamento de Santander mediante el uso de sistemas generadores de aire caliente, como también impulsando a la industria productora de biomasa para combustión.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La avicultura es la actividad agrícola que desarrolla diferentes técnicas y procedimientos para el cuidado de especies avícolas, entre las cuales encontramos pollos, gallinas, codornices, entre otras. Asimismo, es la encargada de producir víveres habituales en la alimentación del ser humano. En las últimas décadas el consumo de carnes y huevos de corral ha aumentado drásticamente, pues estos alimentos son enriquecidos en proteínas y nutrientes, según la Federación Nacional De Avicultores de Colombia (FENAVI) la producción de pollos y huevos en el 2020 fue de 1.266.562 toneladas, mientras que para el año 2019 fue de 1.240.971 toneladas, generando 25.591 toneladas más que el año pasado.¹

De acuerdo con el censo realizado por FENAVI, el departamento de Santander tiene el 25% de la producción de huevo y carne de pollo a nivel nacional, convirtiéndolo en un potencial generador de productos avícolas, sin embargo, las condiciones climáticas y el medio ambiente son un problema fundamental para el desarrollo de las aves, factores como la temperatura, la calidad del aire, la humedad y la luz son indispensables para proveer un adecuado desarrollo durante el periodo de crianza, las investigaciones han demostrado que durante la etapa de crecimiento de las aves, las dos primeras semanas son de crucial importancia, ya que demasiado frío o calor durante este periodo puede resultar en un pobre crecimiento, una mala conversión alimenticia y mayor susceptibilidad a enfermedades.

¹ FEDERACIÓN NACIONAL DE AVICULTORES DE COLOMBIA. [En línea]. Bogotá: FENAVI, Estadísticas del sector, Producción. [Consultado: 14 de abril 2021]. Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/>.

Los galpones son el mejor método para supervisar el desarrollo de los pollos, puesto que permite evidenciar su comportamiento y además facilita el control de la temperatura a la cual están sometidos, su diseño garantiza el estricto control del ambiente alrededor del polluelo. Sin embargo, en la actualidad equipar galpones es costoso y complejo, puesto que se emplean diferentes generadores de calor, como los radiadores infrarrojos a gas (altamente costosos debido a los numerosos radiadores implementados en un solo galpón) y los generadores de aire caliente mediante gas propano (tienen el inconveniente de no poder aplicarse en galpones demasiado largos), es así como surge la implementación de un sistema generador de calor capaz de resolver y eliminar los problemas de capacidad presentes en los galpones con bastante espacio, disminuir costos y reducir el impacto ambiental generado por el uso de sistemas de calefacción a base de combustibles fósiles.

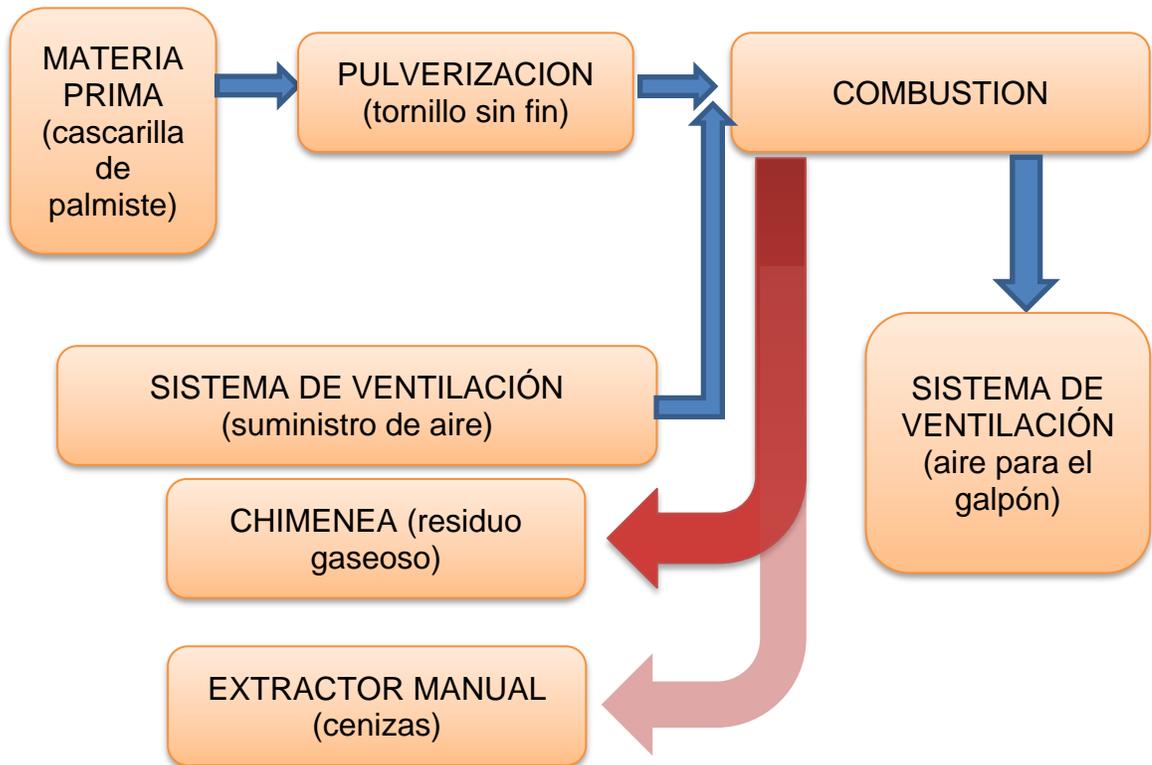
Con el objetivo de promover el aprovechamiento de combustibles a base de biomasa y mejorar los mecanismos de acondicionamiento para galpones de pollos en el departamento de Santander, se propone el desarrollo de un sistema de calefacción basado en la combustión de cascarilla de palmiste, que cumpla con los requerimientos necesarios para adaptar un galpón destinado a la crianza de pollos de $150 \times 30 \text{ m}^2$ (ciento cincuenta por treinta metros cuadrados), garantizando el desarrollo óptimo de las aves.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad una de las carnes más consumidas por la población colombiana es el pollo, por este motivo las industrias avícolas invierten mucho dinero en tecnología para criar galpones de estas aves en gran cantidad. Con el fin de contribuir con el progreso a la industria avícola colombiana, a través de la investigación y el desarrollo de nueva tecnología que mejore los procesos de calefacción de los galpones en el departamento de Santander, se pretende el desarrollo de un sistema de calefacción basado en la combustión de cascarilla de palmiste.

Esta implementación cuenta con un sistema de tuberías de intercambiador de calor, junto con un ventilador impulsor sincronizados a un tablero de control, garantizando una temperatura constante dentro del galpón.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso



Uno de los factores más importantes para invertir en esta propuesta, es el incremento en la tasa de mortalidad de los galpones avícolas en el país, así como también el limitado número de fabricantes de este producto, además surge la necesidad de contar con un producto que proporcione como fuente principal de combustión natural la cascarilla de palma africana, aprovechando los beneficios de esta materia prima, con el fin de dar un estímulo importante al desarrollo avícola del departamento de Santander.

Este proyecto aporta un beneficio, tanto para criadores de pollos que desean vender sus productos produciendo ellos mismos sus propias aves y no comprándolo a terceros, como también para toda la comunidad consumidora de esta carne, ya que estos criaderos utilizan una fuente de combustible natural, permitiendo que el proceso de incubación se haga de manera favorable obteniendo un producto de alta calidad.

Siendo este proyecto un sistema de calefacción costoso, se vio la necesidad de dividirlo en dos partes. Una parte es solucionada en este proyecto, la cual se encarga del diseño y construcción de los subsistemas: Quemador (Cámara de combustión), intercambiador de calor y sistema de ventilación (Ventiladores). La segunda parte del sistema de calefacción (parte ambiental y estructural) no se desarrolla en este proyecto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General.

Desarrollar un sistema de calefacción basado en la combustión de cascarilla de palmiste, para un galpón destinado a la crianza de pollos de $150 \times 30 \text{ m}^2$, junto a una empresa de la región, fortaleciendo el área de investigación y prácticas en la Universidad Industrial de Santander, para así ofrecer soluciones a los desafíos presentes en la industria avícola.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un modelo de calefacción que implemente combustible a base de cascarilla de palmiste, capaz de acondicionar un galpón de crianza de $150 \times 30 \text{ m}^2$.
- Construir un sistema generador de calor, cumpliendo con los requerimientos establecidos con la finalidad de proveer una temperatura adecuada al galpón.
- Comparar la capacidad del sistema de calefacción desarrollado con los sistemas tradicionales (criadoras y turbo calentadores).

2. MARCO TEÓRICO DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN

2.1 GENERALIDADES

A finales del siglo XIX y principios del XX, gracias a los avances de la genética y de la nutrición, la avicultura llegó a convertirse en una actividad ganadera en expansión. Los avicultores crían las aves por diferentes razones, desde la necesidad de alimentarse hasta procurarse una fuente de ingresos. La avicultura Proporciona proteínas animales bajo la forma de carne y huevos, los cuales se encuentran disponibles para la venta en el mercado, así mismo este sector proporciona estiércol el cual también tiene una ventaja monetaria. La carne de pollo no tiene restricciones religiosas de ningún tipo, es saludable y puede producirse en cualquier clima teniendo los cuidados pertinentes, por eso es de las carnes más consumidas.

El sector avícola ha venido evolucionando de manera favorable en los últimos años, lo que le ha permitido consolidarse dentro de la estructura actual de la economía colombiana y de manera particular en la estructura Económica del departamento de Santander. A comienzos de los años sesenta, este negocio pasó de ser una actividad eminentemente artesanal a una actividad con características industriales, de tal manera que en la actualidad absorbe cerca de 240.000 empleos, de los cuales el departamento genera cerca de 40.800 empleos directos y 78.000 indirectos distribuidos dentro de la cadena productiva de este negocio.²

² BANCO DE LA REPUBLICA. [en línea]. Bucaramanga: Banco de la república, Características del sector avícola colombiano y su reciente evolución en el departamento de Santander. [Consultado: 12 de Abril 2021]. Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/caracteristicas-del-sector-avicola-colombiano-y-su-reciente-evolucion-el-departamento-santander>>.

2.2 COMPOSICIÓN Y FUNCIONAMIENTO.

Un sistema de calefacción por biomasa es un equipo encargado de liberar bioenergía a partir de cualquier material orgánico que contenga carbono almacenado, esta energía se produce al quemar la biomasa y posteriormente es distribuida al aire mediante intercambiadores de calor con la finalidad de elevar su temperatura.

En los sistemas generadores de aire caliente, el subsistema de ventilación es el encargado de extraer el aire del galpón para calentarlo con el fin de retornarlo al mismo. Entonces el aire caliente se distribuye por todo el galpón a través de conductos de circulación.³

Los quemadores se definen como equipos empleados para realizar procesos de combustión, son los encargados de controlar el suministro adecuado de las tasas de combustible y comburente, efectuando un proceso de premezclado entre estos dos con el fin de transformar la energía química en energía calórica segura y eficiente.

Existen distintas formas de clasificar los quemadores, se basan en los siguientes criterios:

- Según la fase del combustible utilizado
- Según el tipo de comburente utilizado
- Según la forma de transmisión del calor a la carga

³EL SITIO AVÍCOLA, Sistemas de calefacción por biomasa para galpones de pollos. [en línea]. GLOBAL AG MEDIA, Sistemas de calefacción por biomasa para galpones de pollos. [Consultado: 12 de Abril 2021]. Disponible en: <https://www.elsitioavicola.com/articles/2479/sistemas-de-calefaccian-por-biomasa-para-galpones-de-pollos/>.

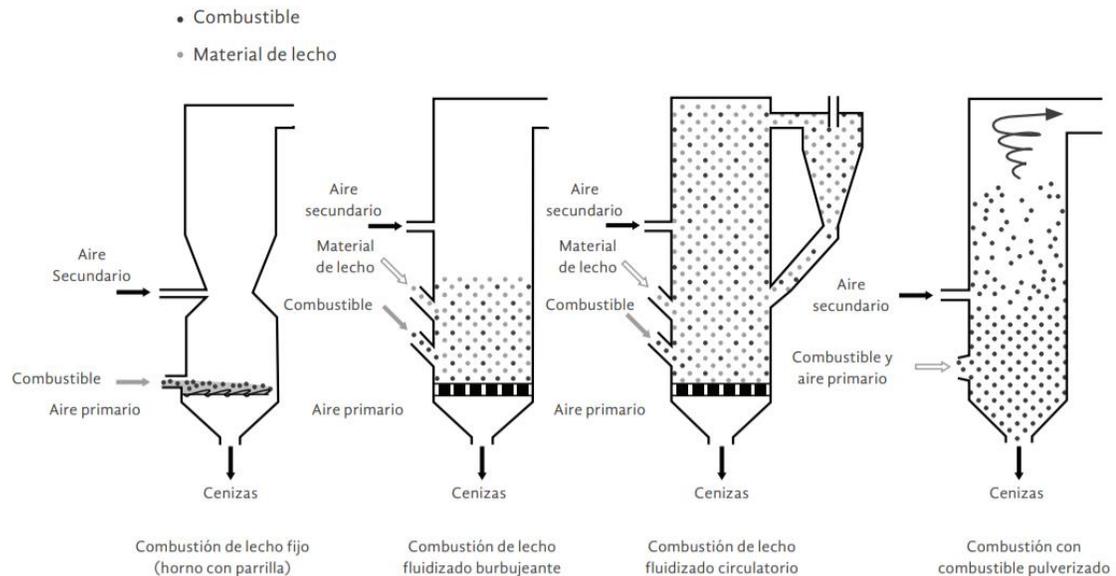
2.2.1 Quemadores según la fase de combustible utilizada. En vista de la gran gama de tipos de quemadores existentes, realizaremos subclasificaciones resaltando los tipos más comunes dentro de la clasificación según la fase del combustible utilizado.

2.2.1.1 Quemador de lecho fluidizado. Es uno de los quemadores más eficientes y viables para quemar directamente la biomasa, asimismo dispone de un sistema convencional de combustión versátil en el manejo de la caracterización y contenido de humedad del combustible. Se pueden encontrar quemadores de lecho fluidizado burbujeante, en donde los gases parten a través del lecho como burbujas, alcanzando temperaturas entre 800 y 900°C.⁴

Por otro lado, se encuentran los quemadores de lecho fluidizado circulante, los cuales incrementan su velocidad de fluidización pasando el límite de burbujeo. Estos tipos de quemadores tienen la ventaja de reducir las emisiones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre proporcionando control sobre la temperatura del lecho.

⁴ BARRERA, Juan; RAMIREZ, Nidia; GARCIA, Jesús; Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *Valor Agregado* [en línea]. Bogotá (Colombia): Revista Palmas, Octubre - diciembre 2018 vol. 39 (4) 24 – 44. [Consultado: 12 de Abril 2021]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709/12613>.

Figura 2. Tecnologías principales de combustión



Fuente:

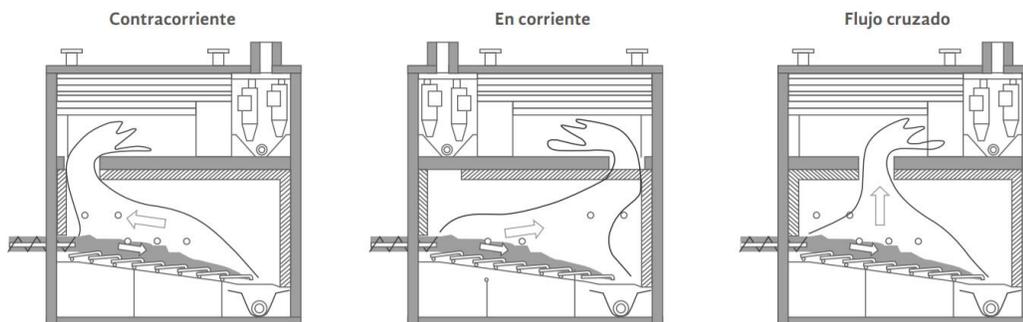
< <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709/12613>>.

2.2.1.2 Quemador de lecho fijo. El diseño de estos equipos requiere un buen diseño y control de sus partes, su parrilla garantiza una correcta distribución de la biomasa, el combustible es ubicado en la parrilla y se mueve a través de la caldera hasta llegar al punto de combustión, el aire ingresa por las entradas a presión atmosférica cumpliendo la función de oxidante en los residuos del combustible. El flujo de aire caliente requerido para después de la combustión debe ser equitativo con el objetivo de evitar el exceso de oxígeno, lo cual ocasionaría un déficit en la eficiencia térmica del sistema.

El control del suministro de aire es fundamental en la operación en donde este expuesta la biomasa, cuanto mejor sea y se garantice una óptima ejecución de la mezcla entre los gases de combustión, la eficiencia del sistema mejorará. Según el diseño y la operación existen tres sistemas de acción:

- **Flujo contracorriente:** (las flamas se encuentran en posición en contra a la del combustible), permite que la biomasa pase directamente a través de los gases de combustión, lo que le permite la evaporación y el secado. Se aplica para combustibles de bajo poder calorífico.⁵
- **Flujo paralelo:** (las flamas se encuentran en la misma dirección que el combustible), se aplica para combustibles secos o en sistemas en los que el combustible ya ha pasado por un secado primario para reducir su porcentaje de humedad.⁵
- **Flujo cruzado:** (la eliminación de los gases de combustión en medio del horno), es la mezcla entre los sistemas de contra corriente y en corriente, para lograr una combustión adecuada y se da una recirculación de los gases de combustión y cámara de combustión con agua de enfriamiento, dicho enfriamiento tiene una ventaja de reducir los volúmenes de gases de combustión que impide la acumulación de las cenizas en las paredes del quemador.⁴

Figura 3: Tipos de flujo



Fuente:

< <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709/12613>>.

⁵ BROCHERO MONTERO, Juan José Y ESTUPIÑAN HINESTROZA, Romario. Sistema de calentamiento con biomasa para uso alternativo en el secado solar de tunal Hohenheim. [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Universidad Pontificia Bolivariana, 2019 [Consultado: 12 de Abril 2021]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8540/39264.pdf?sequence=1>.

2.3 COMPONENTES DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN.

El generador de aire caliente provee óptimas condiciones al galpón, este proceso depende de la operación en conjunto de varios subsistemas, los cuales se definen a continuación:

- ✓ Cámara de combustión
- ✓ Intercambiador de calor
- ✓ Subsistema de ventilación

2.3.1 Cámara de combustión. La cámara de combustión o quemador es el sitio en el cual la biomasa se transforma en energía, esta es obtenida al incinerar el combustible orgánico triturado ubicado en la parrilla. En esta cámara se identifican 3 zonas indispensables para su correcto funcionamiento:

La primera es la zona en donde el combustible se transforma en gas por medio de una combustión parcial, la segunda, es la zona en donde se evidencia la llama e ingresa el aire secundario. Y por último la tercera zona en donde ya no se observa la llama, sin embargo, se sigue produciendo combustión con baja concentración de monóxido de carbono. Como norma general, las cámaras de combustión tienen un rango de temperatura de trabajo óptimo situado entre los 600 y 900 °C.⁶

Si la temperatura de la cámara se encuentra por debajo de la norma general, las cenizas y el monóxido de carbono aumentan de forma significativa debido a que se presenta una combustión incompleta, de igual forma, si la temperatura está por encima, el nivel de oxidación del nitrógeno del aire aumentará.

⁶ CANALES SECTORIALES. [en línea]. Barcelona: Interempresas, principios para la correcta elección de una caldera de biomasa ¿cámara de combustión metálica o de refractario?, 23/01/2014. [Consultado: 13 de Abril 2021]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/142732-principios-para-la-correcta-eleccion-de-una-caldera-de-biomasa-camara-de-combustion-metalica-o-de-refractario.html>.

Las diversas partes de la cámara de combustión generalmente están formadas de metales, no obstante, según los requerimientos estas pueden ser recubiertas de material refractario.

Figura 4. Cámara de combustión de acero refractario



Fuente: <<http://www.pellets madera.net/2015/12/calderas-de-biomasa.html>>.

El material implementado en la cámara de combustión debe ser capaz de soportar temperaturas elevadas de operación, del mismo modo, este material debe resistir las reacciones químicas que se producen por la combustión de la biomasa, como es el caso del metal, generalmente procede de la familia de aleaciones de varios aceros. Cuanta más resistencia a las altas temperaturas y a la oxidación, será más difícil y costosa su mecanización.⁷

⁷ CANALES SECTORIALES. [en línea]. Barcelona: Interempresas, principios para la correcta elección de una caldera de biomasa ¿cámara de combustión metálica o de refractario?, 23/01/2014. [Consultado: 13 de Abril 2021]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/142732-principios-para-la-correcta-eleccion-de-una-caldera-de-biomasa-camara-de-combustion-metalica-o-de-refractario.html>.

Figura 5. Cámara de combustión de acero

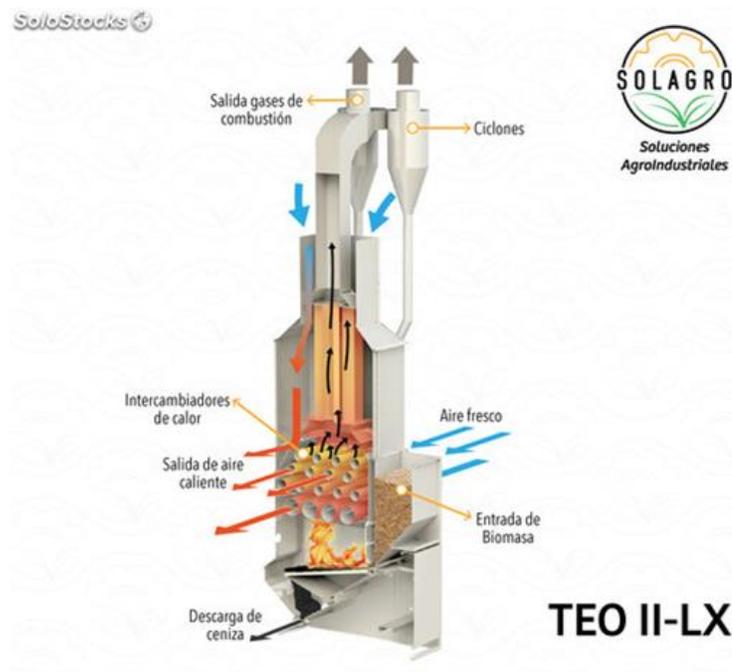


Fuente: <<https://emcombustion.es/quemadores-industriales-de-alta-tecnologia/quemadores-de-biomasa-jbp/>>.

Existen distintos tipos de cámaras de combustión para combustibles sólidos, estas se encuentran en función de las dimensiones y la aplicación del quemador, sin embargo, todas las cámaras presentan inconvenientes en la extracción de los residuos generados por la combustión. A continuación, se exponen los tipos de cámaras de combustión más comunes:

- ✓ Cámara de combustión de parrilla fija: Este sistema implementa una parrilla fija ubicada en la parte inferior de la cámara, además cuenta con una tolva, la cual se encarga de procesar la materia prima para alimentar el sistema. Este tipo de cámara de combustión se emplea en calderas de pequeñas dimensiones.

Figura 6. Cámara de combustión con parrilla fija



Fuente: < <https://www.solostocks.com.co/venta-productos/maquinaria-agricola/otra-maquinaria-agricola/horno-quemador-de-cascarilla-teo-ii-l-266100> >.

- ✓ Cámara de combustión de parrilla móvil: Este quemador está integrado por un sistema transportador de cadena, el cual dispone de una superficie plana en donde se deposita el combustible sólido, este sistema mueve dicho combustible desde el área de carga hasta el área de combustión. La combustión se controla regulando la velocidad de desplazamiento del transportador.⁸

Al final del trayecto el combustible se transforma en cenizas y la cadena que lo transporta lo vierte en una tolva de recogida.

⁸ ACADEMIA. [en línea]. ACADEMIA, Quemadores para combustibles sólidos. [Consultado: 13 de Abril 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/25502140/QUEMADORES_PARA_COMBUSTIBLES_SÓLIDOS.

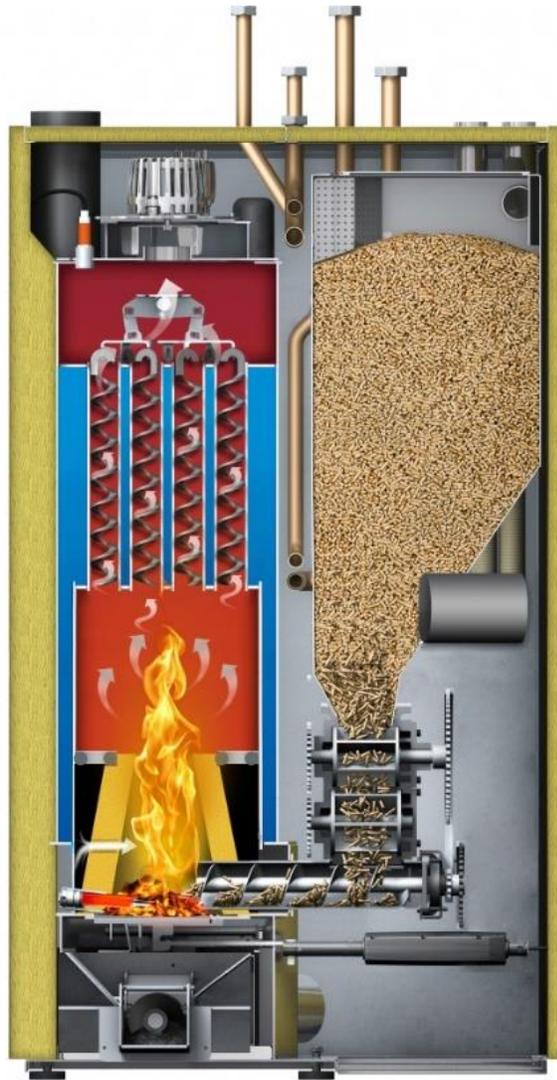
Figura 7. Cámara de combustión con parrilla móvil



Fuente: <<https://ksm-stoker.dk/wp-content/uploads/Brugervejledning-XXL-PCT400-UK.pdf>>.

- ✓ Cámara de combustión con alimentación inferior: En este sistema el combustible es triturado e impulsado por un tornillo sin fin. Al llegar a la cámara de combustión, el combustible se vierte sobre una superficie de fundición, la cual posee orificios por donde se incorpora el aire requerido para una correcta combustión.

Figura 8. Cámara de combustión con alimentación inferior



Fuente: <<https://www.hargassner.es/2018/01/22/calderas-biomasa-seguras/>>.

- **Combustión de cascarilla de palmiste.**

La combustión es un proceso de oxidación rápida en el cual el combustible se oxida y desprende calor, asimismo, implica diversos aspectos que alteran su eficiencia y utilidad, como el comburente, la energía de activación y el combustible. El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire, ya que está compuesto, prácticamente, por 21% Oxígeno (O₂) y 79% Nitrógeno (N₂).⁹

La biomasa se define como un combustible sólido, ya que tiene el mismo proceso de combustión del carbón, por tanto, se identifican las etapas de secado, de volatilización, gasificación y la oxidación de la fase gaseosa. El tiempo entre los cambios de cada reacción dependerá del tamaño del combustible y sus propiedades, así como de la temperatura y de las condiciones de combustión.¹⁰

Figura 9. Ruta de combustión de una partícula de biomasa



Fuente:

<<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709>>.

⁹ AMRANDADO. [en línea]. España: CCR, Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 3.0, Combustión y Combustibles, 27/04/2020. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://blogsaverroes.juntadeandalucia.es/amrandado/211-2/>.

¹⁰ BARRERA, Juan; RAMIREZ, Nidia; GARCIA, Jesús; Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *Valor Agregado* [en línea]. Bogotá (Colombia): Revista Palmas, Octubre - diciembre 2018, vol. 39 (4) 24 - 44. [Consultado: 12 de Abril 2021]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709/12613>.

Las propiedades de la combustión de la biomasa pueden ser agrupadas en cuatro grupos: físicas, químicas, térmicas y minerales.

Figura 10. Propiedades de la combustión de biomasa

Físicas	Químicas	Térmicas	Minerales
<ul style="list-style-type: none"> Densidad de bulbo Densidad energética 	<ul style="list-style-type: none"> Análisis último Análisis próximo Análisis de productos de pirólisis Poder calorífico Contenido de humedad 	<ul style="list-style-type: none"> Calor específico Conductividad térmica Emisividad Temperatura Grado de degradación térmica 	<ul style="list-style-type: none"> Cenizas Compuestos inorgánicos

Fuente:

<<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709>>.

La cascarilla de palmiste es un residuo que proviene de la extracción del aceite (empleado en la formulación de aceites comestibles) y de la torta de palmiste (empleado como alimento animal), dichas extracciones se adquieren a partir de la semilla de la almendra.

Figura 11. Cascarilla de palmiste



Fuente:

<http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=66754&cHash=fd20d114be6a7c60def80fd32197dfab>.

Al finalizar este proceso se obtiene el cuesco vacío, el cual es un combustible muy compacto con tamaño uniforme, posee una adecuada capacidad calórica para utilizarse como combustible en generadores de aire caliente o calderas.

Para mantenerlo encendido se requiere de una herramienta que genere gran cantidad de aire de combustión.

Las propiedades de combustión de palma africana se clasifican en cuatro grupos: el contenido de humedad, el contenido de cenizas, el contenido de material volátil y el poder calorífico superior, dichas propiedades pueden ser valorizadas dentro de los rangos promedio de combustión según su presentación.¹¹

Figura 12. Propiedades de combustión para biomasa de palma africana

Biomasa	Contenido de humedad (% b.s. ¹)	Contenido de cenizas (% b.s.)	Contenido de materia volátil (% b.s.)	Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)
Tusa	67.00 ± 1.41	4.60 ± 0.50	87.04 ± 0.42	18.88 ± 0.74
Fibra	37.09 ± 2.06	6.10 ± 0.94	84.91 ± 0.62	19.06 ± 0.32
Cuesco	12.00 ± 1.08	3.00 ± 1.27	83.45 ± 0.68	20.09 ± 0.43

Fuente:

<<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709>>.

2.3.2 Intercambiadores de calor. Los intercambiadores de calor son equipos de transferencia de calor, su objetivo es cambiar la entalpia de una corriente, es decir, es un sistema mecánico que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro.

¹¹ FORERO, Carlos A., *et al.* Estudio preliminar del potencial energético de cuesco de palma y cáscara de coco en Colombia. *Revista Ingeniería Solidaria* [en línea]. Bogotá (Colombia): Universidad Nacional de Colombia, 5 Marzo 2012, Vol. 4, nro. 14. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/340/347>.

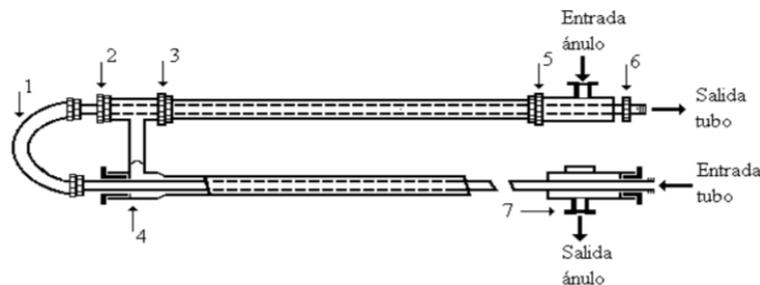
Existen diferentes tipos de intercambiadores, estos se clasifican de acuerdo a:

- ✓ El proceso de transferencia.
- ✓ Los mecanismos de transferencia de calor.
- ✓ El número de fluidos involucrados.
- ✓ La disposición de los fluidos.
- ✓ La compactación de la superficie.
- ✓ El tipo de construcción.

En los sistemas de intercambio de calor el aprovechamiento del espacio es fundamental para el óptimo desarrollo del equipo, es por eso que los intercambiadores de calor implementados deben cumplir con las necesidades de operación. De los diversos tipos de intercambiadores de calor, los más conocidos en la industria son los intercambiadores de doble tubo y los intercambiadores de tubo y carcaza, los cuales se encuentran clasificados según el tipo de construcción.

El intercambiador de calor de doble tubo tiene uno de los diseños más simples y consiste en tubos concéntricos, en donde un fluido circula por el interior del tubo, mientras que el otro fluido circula por el anillo formado entre los tubos.

Figura 13. Intercambiador de calor de doble tubo



Fuente:

<https://www.academia.edu/7767151/GUIA_DE_INTERCAMBIADORES_DE_CALOR_TIPOS_GENERALES_Y_APLICACIONES>.

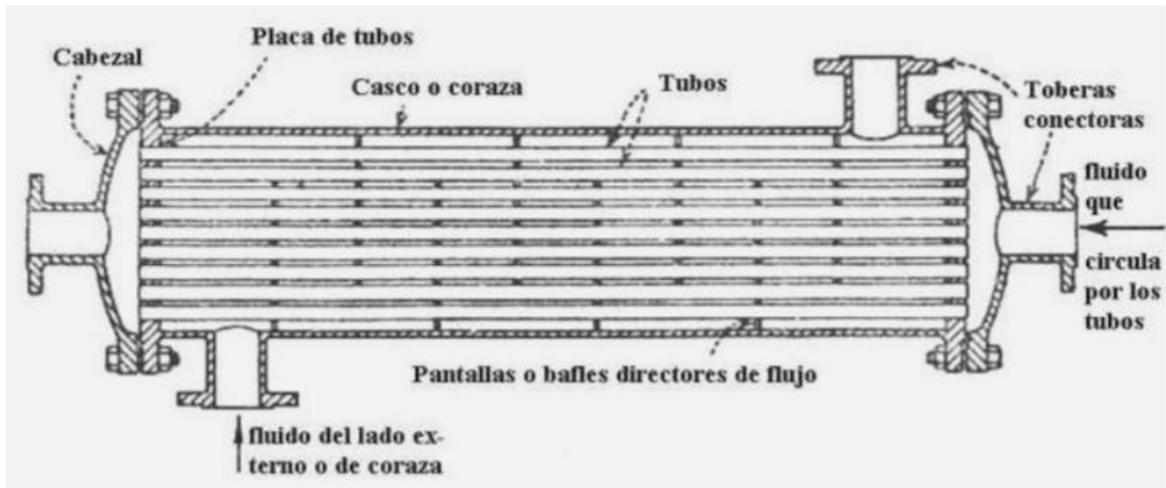
Estos equipos son sumamente útiles, ya que se pueden fabricar en cualquier taller de plomería a partir de partes estándar, obteniendo así superficies de transferencia de calor a un costo muy bajo. Generalmente se ensamblan en longitudes efectivas de 12, 15 o 20 pies, en donde la longitud efectiva se define como la distancia en cada rama sobre la que ocurre la transferencia de calor, excluyendo la conexión en “U” del tubo interno y sus prolongaciones.¹²

Estos equipos son diseñados para ser capaces de operar con altas presiones, ya que las dimensiones de los componentes de estos tienden a ser pequeñas; además, se necesita de un gran número de estas unidades conectadas en serie, puesto que su principal desventaja radica en la pequeña superficie de transferencia de calor que proporciona.

Los intercambiadores de tubo y carcasa o de tubo y coraza son los más utilizados en las refinerías y plantas químicas, ya que ofrecen flujos de calor elevados en relación con su peso y volumen, además, es versátil y puede ser diseñado para múltiples aplicaciones, siendo fácil su construcción al igual que su mantenimiento. Este tipo de equipo consiste en una carcasa cilíndrica que contiene un arreglo de tubos paralelo al eje longitudinal de la carcasa. Los tubos pueden tener o no aletas y están sujetos por laminas perforadas en cada extremo, a su vez estos atraviesan deflectores distribuidos a lo largo de la carcasa, los cuales tienen como objetivo soportar los tubos y dirigir el flujo que circula por la misma, para que la dirección del fluido sea siempre perpendicular a los tubos.

¹² ACADEMIA. [en línea]. ACADEMIA, Guía de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/7767151/GUIA_DE_INTERCAMBIADORES_DE_CALOR_TIPOS_GENERALES_Y_APLICACIONES.

Figura 14. Intercambiador carcaza y tubos



Fuente: <<http://www.radiadoresgallardo.cl/topintercambiaodres.pdf>>.

Hay dos tipos básicos de intercambiadores de tubo y carcasa: El de tipo fijo o de tubos estacionarios, que tiene los dos extremos de los tubos fijados a la carcasa y el que tiene un sólo extremo de los tubos sujeto a la carcasa. En el primer caso, se requiere de una junta de dilatación debido a la expansión diferencial que sufren los materiales que conforman el equipo. En el segundo caso los problemas originados por la expansión diferencial se pueden eliminar empleando un cabezal de tubos flotantes que se mueve libremente dentro de la carcasa o empleando tubos en forma de U en el extremo que no está sujeto.¹³

La elección de una disposición de flujo depende de la eficiencia de intercambio requerida, los esfuerzos térmicos permitidos, los niveles de temperatura de los fluidos, entre otros factores. Los intercambiadores de calor de pasos múltiples y los intercambiadores de paso único, son referencias de tipos de intercambiadores más comunes según la disposición de fluidos.

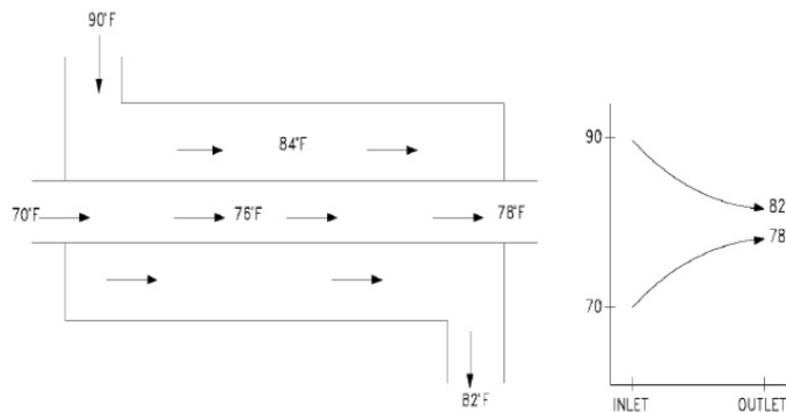
¹³ ACADEMIA. [en línea]. ACADEMIA, Guía de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/7767151/GUIA_DE_INTERCAMBIADORES_DE_CALOR_TIPOS_GENERALES_Y_APLICACIONES.

En los intercambiadores de calor de paso único el fluido se caracteriza porque el fluido solo intercambia calor una sola vez, se distinguen tres tipos básicos los cuales son:

- ✓ Flujo en Paralelo o Cocorriente.
- ✓ Flujo en Contracorriente o Contraflujo.
- ✓ Flujo en Contracorriente o Contraflujo.

En los intercambiadores de calor de flujo paralelo los dos fluidos ingresan al equipo por el mismo costado, tienen el mismo sentido de dirección de flujo y salen por el otro extremo. Termodinámicamente no es un sistema muy eficiente, sin embargo, se utiliza en operaciones cuando los materiales son muy susceptibles a la temperatura, ya que se produce una temperatura más uniforme.

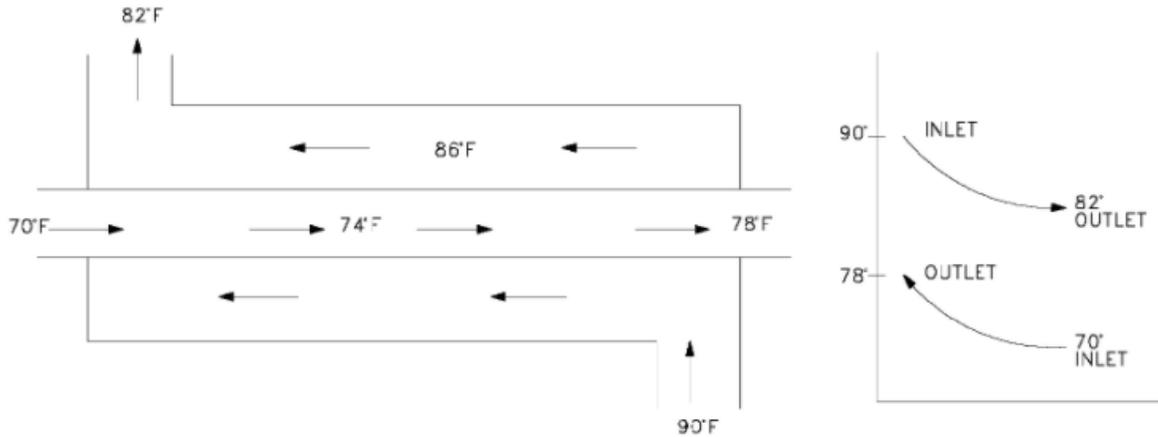
Figura 15. Intercambiador de calor de flujo paralelo



Fuente: <<https://es.slideshare.net/jhonnatan89quito/intercambiadores-de-calor-final-2>>.

En los intercambiadores con flujo en contracorriente los fluidos fluyen en direcciones opuestas el uno del otro, posee variaciones de temperatura idealizadas como unidimensionales, además, termodinámicamente es la composición superior respecto a las demás.

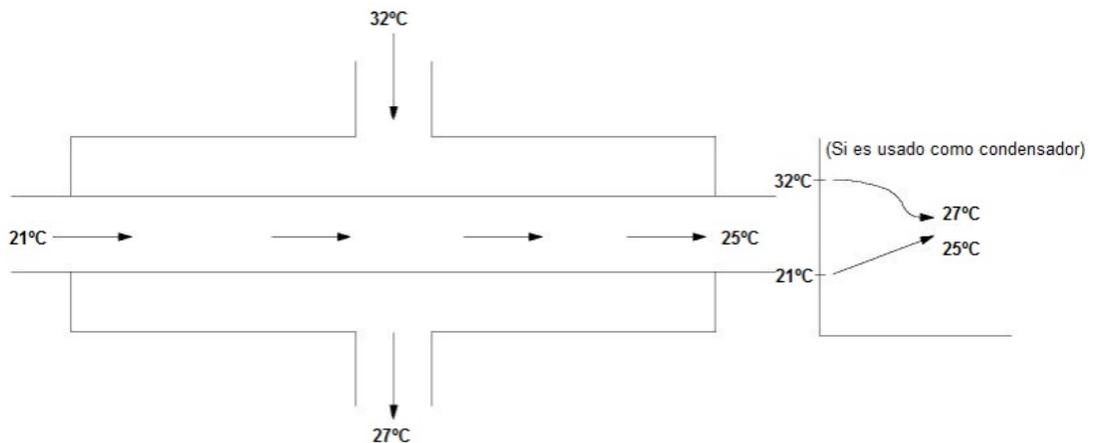
Figura 16. Intercambiador de contraflujo



Fuente: <<https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/node9.html>>.

Finalmente, en los intercambiadores de flujo cruzado los flujos son normales uno del otro. Termodinámicamente tienen una efectividad intermedia respecto a los demás. Este tipo de intercambiadores es comúnmente empleado donde uno de los fluidos presenta un cambio de fase y por tanto una mezcla bifásica (fase líquida fase gas) dentro del intercambiador, por ejemplo, los condensadores de vapor.¹⁴

Figura 17. Intercambiador de flujo cruzado



Fuente: <<https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>>.

¹⁴ INGENIERO MARINO. [en línea]. INGENIERO MARINO, Intercambiadores de Calor. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>. 2020.

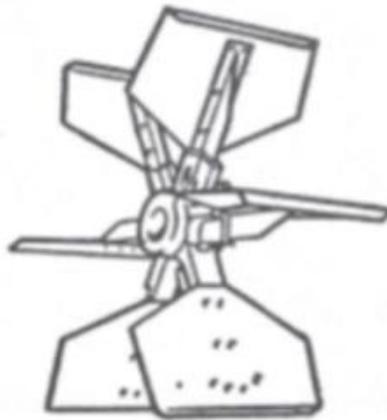
Una mejora a los intercambiadores de paso único son los intercambiadores de calor de pasos múltiples, ya que tienen como ventaja que intercambian calor más de una vez haciendo del proceso de intercambio de calor más eficiente y también es posible encontrarlo en: paralelo-cruzado, contracorriente-paralelo, contracorriente-cruzado y combinaciones de estos.

2.3.3 Sistema de ventilación. Un ventilador es una máquina de empuje de aire de forma continua por acción aerodinámica, también es conocido como un conjunto de motor y alabes que tienen como objetivo desplazar un gas (normalmente aire) de un lugar a otro. Existen tres tipos básicos de ventiladores: centrífugos, helicoidales y axiales. Los ventiladores de hélice helicoidal y axiales a menudo se clasifican en un mismo grupo, aunque sus diferencias en construcción y características son tales que requieren ser clasificados por separado.

Los ventiladores centrífugos son los más simples, puesto que el flujo de aire sale a gran velocidad en dirección radial a su eje. Estos están conformados por un impulsor que gira dentro de una carcasa en forma de espiral, su funcionamiento se debe a un motor eléctrico. Se clasifican en tres grupos según el tipo de rodete:

- ✓ Hélices radiales rectas: Estos ventiladores son los más simples y voluminosos comparados con su capacidad, poseen bajo rendimiento y son utilizados bajo presiones moderadas, así mismo, tienen la facultad de auto limpiarse, puesto que el polvo y la suciedad que se localizan en el flujo de aire no se adhieren a las paletas, esto se convierte en la mayor ventaja del mecanismo.

Figura 18. Ventilador con hélices radiales rectas



Fuente: <<https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>>.

- ✓ Hélices curvas hacia adelante: Estos ventiladores mueven gran cantidad de aire por la curvatura de las paletas, debido a que poseen una considerable cantidad de alabes con poca altura radial situadas a favor del sentido de la rotación. Este tipo de ventilador opera a baja potencia, en donde la velocidad del aire de salida es mucho mayor en comparación a los demás ventiladores. Comúnmente son utilizados en espacios donde el ruido es un factor relevante.

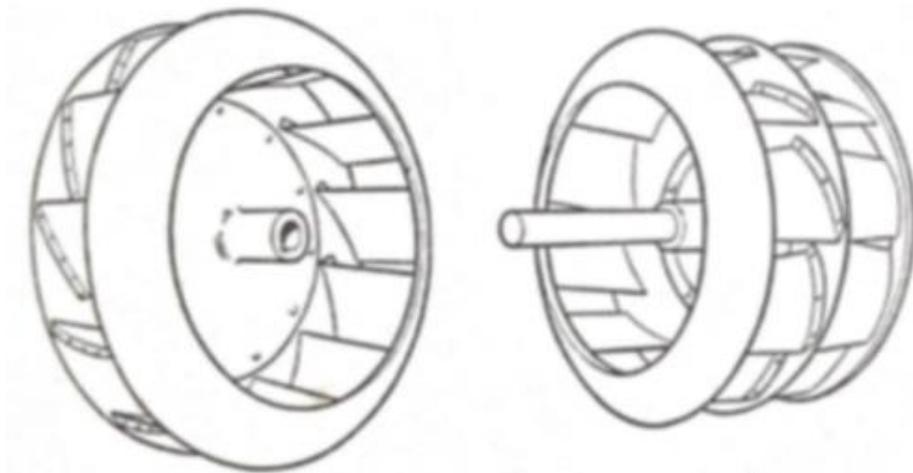
Figura 19. Ventilador con hélices curvas hacia adelante



Fuente: <<https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>>.

- ✓ Hélices curvas hacia atrás: Este tipo de ventilador es el más utilizado bajo potencias elevadas, ya que ofrece un mayor rendimiento gracias a la ubicación de las paletas (el lado convexo se mueve a favor de la rotación), en consecuencia, favorece el flujo de aire y evita pérdidas por choque o remolino. Requiere un menor mantenimiento y su vida útil es bastante prolongada.

Figura 20. Ventilador con hélices curvas hacia atrás

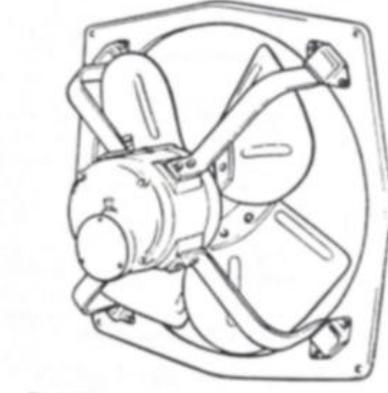


Fuente: <<https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>>.

Los ventiladores helicoidales poseen una baja resistencia al flujo de aire, sin embargo, estos proporcionan grandes volúmenes de aire, a fin de reducir la inversión económica, ya que comúnmente tienen un gran campo de aplicación, son utilizados para la ventilación general en lugares donde no se evidencian sistemas de conducción. Por otro lado, estos pueden funcionar tanto como un ventilador de extracción como un ventilador de inyección.¹⁵

¹⁵ AIRE LIMPIO GLOBAL. [en línea]. Bogotá: ALG, Tipos de ventiladores – Clasificación. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>.

Figura 21. Ventilador helicoidal



Fuente: <<https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>>.

La cantidad de aire que este ventilador desplaza va a depender de sus aspas. Un ventilador con las aspas curvadas desplazará más cantidad de aire y será más silencioso que uno de alabes planos y rectos para un mismo diámetro e igual velocidad. Los alabes estrechos y rectos, provocan más turbulencia y tienen más tendencia a vibrar, ambas cosas tienen como consecuencia el aumento del ruido.¹⁶

Los ventiladores axiales mueven el flujo de aire siguiendo una trayectoria paralela al eje de la hélice. El aire es impulsado por una hélice equipada de un número variable de alabes que se encuentran localizadas en un núcleo que transmite la energía del eje a dichos alabes. Estos ventiladores mueven una gran cantidad de aire a baja presión. Además, tienen la ventaja de llegar a obtener un rendimiento de hasta el 90%. El paso directo de aire a través permite al ventilador ser montado directamente en conductos rectos. El sistema de conducción es más simple que en el caso de los ventiladores centrífugos, los cuales requieren conexiones a 90°. Además, no ocupan espacio en el suelo.¹⁶

¹⁶AIRE LIMPIO GLOBAL. [en línea]. Bogotá: ALG, Tipos de ventiladores – Clasificación. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>.

Figura 22. Ventilador axial



Fuente: <<https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>>.

2.4 GENERALIDADES DEL ACONDICIONAMIENTO AMBIENTAL PARA EL CRIADERO DE POLLOS.

Por razón de espacio este ítem se puede consultar en el anexo A.

3. DISEÑO CONCEPTUAL

3.1 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARTICULARES

A continuación, se plantea diferentes alternativas de solución, donde se seleccionarán las mejores opciones que cumplan con los parámetros establecidos posteriormente en la tabla de calidad (QFD).

3.1.1 Calefacción para galpones.

3.1.1.1 Alternativa 1. Criadora radiante

El calor radiante es como el calor del sol y se transfiere mediante ondas de calor infrarrojas. Es muy eficiente porque no calienta el aire del galpón para calentar los objetos que se encuentran dentro del mismo. En cambio, las ondas infrarrojas calientan los objetos hacia los cuales apuntan. En el caso de la criadora radiante, las ondas de calor que emanan de la superficie brillante del calentador calientan las aves y la camada. También se produce una cantidad pequeña de calefacción por convección.¹⁷

Figura 23. Criadora infrarroja



Fuente: < <https://n9.cl/pud9z> >

¹⁷ DOCPLAYER. [en línea]. CHORE TIME, Criadoras y Calentadores, Fabricado para Funcionar. Construido para Durar, acerca de la calefacción. [Consultado: 14 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/39720698-Chore-time-le-brinda-a-sus-aves-el-calor-y-comodidad-del-sol.html>.

Ventajas del calentador infrarrojo de aves de corral.

- Sistema de control de gas integrado bajo temperatura ultra alta
- Rápido para calentar, eficiente con un calentamiento radiante
- Mejor ambiente y menor consumo de gas
- Crear una vida mejor para los animales

3.1.1.2 Alternativa 2. Calentador convectivo.

Con la calefacción por convección, la mayoría de la entrada de BTU de la criadora se transfiere al aire a través de la convección. Esto significa que la mayoría del aire en el galpón se debe calentar para obtener la temperatura deseada a la altura de las aves. Un calentador de espacio es un ejemplo de 100% calefacción por convección. El calentador sopla el aire caliente en el galpón y las aves y la camada no se calientan hasta que la mayoría del volumen de aire en el galpón ha sido calentado.¹⁸

Figura 24. Calentador convectivo de galpón



Fuente: <<https://images.app.goo.gl/CbmDiiEGaGywuu4x6>>

¹⁸ DOCPLAYER. [en línea]. CHORE TIME, Criadoras y Calentadores, Fabricado para Funcionar. Construido para Durar, acerca de la calefacción. [Consultado: 14 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/39720698-Chore-time-le-brinda-a-sus-aves-el-calor-y-comodidad-del-sol.html>.

3.1.1.3 Alternativa 3. Turbo-calentadores para galpones avícolas.

Completamente automatizados, cuentan con pre-ventilación, control de flujo de aire, encendido automático, control de temperatura y programador de llama de última generación. De agradable diseño y fuerte construcción, los turbo- calentadores cuentan con la más avanzada tecnología en combustión.¹⁹

Figura 25. Calentador Diesel eléctrico



Fuente: <<https://n9.cl/a4oa2>>

Algunas de sus principales características son:

- El compresor es de acero inoxidable, con termostato digital, tanque de combustible interior con pintura galvanizada.
- Alto desplazamiento del aire, termostato de construcción en la habitación y diagnóstico de fallas.
- Control electrónico de llama con fotocélula, cámara de combustión de acero inoxidable, depósito de aceite con indicador de nivel
- Carro incluido, fácil de mover, fácil mantenimiento, Construcción fuerte y duradera.

¹⁹ BLOGGER. [En línea]. Santiago: BLOGGER, Turbo calefactor Chile. [Consultado: 14 de Mayo 2021]. Disponible en: <http://turbocalefactor.blogspot.com/2015/08/para-que-sirve-un-turbo-calefactor.html>.

A continuación, se elabora una matriz de calidad (QFD), la cual nos permite analizar con más detalle cada una de las alternativas anteriormente mencionadas con los diferentes parámetros establecidos, calificándolas de la siguiente manera:

-1... Desfavorable

0... Poco favorable

1... Muy favorable

Para la elaboración de esta matriz se le debe dar importancia a los parámetros de capacidad y economía, debido a que en esta sección se decide por la funcionalidad del equipo en el galpón. Esto quiere decir que su puntuación va así: -2, 0 y 2. (esto se aplica de la misma manera en todas las matrices QFD). Adicionalmente se asigna un factor de ponderación a los parámetros de las matrices (1-11) para definir su importancia según el sistema a seleccionar.

Tabla 1. Matriz de calidad

CRITERIO	PARÁMETRO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
DIMENSIONES	CAPACIDAD (1)	-2	2	2
MECANISMO	ECONÓMICO (2)	2	2	-2
	VERSATILIDAD (4)	1	0	1
	MANTENIMIENTO (3)	1	1	0
COSTO DE MATERIALES	PESO MODERADO (10)	1	-1	0
	VIDA ÚTIL PROLONGADA (6)	-1	1	1
ERGONOMÍA	CONTAMINACIÓN BAJA (11)	0	1	-1
	FÁCIL ENSAMBLE (7)	1	0	0
	SEGURO (5)	1	0	1
PIEZAS NORMALIZADAS	BAJA VIBRACION (9)	0	1	1
	AJUSTABLE (8)	-1	1	1
TOTAL		3	8	4

De acuerdo a la matriz de calidad (tabla 1), se determinó que la alternativa 2 (calentador convectivo) es la que mejor cumple adecuadamente con los parámetros establecidos para el desarrollo de este proyecto.

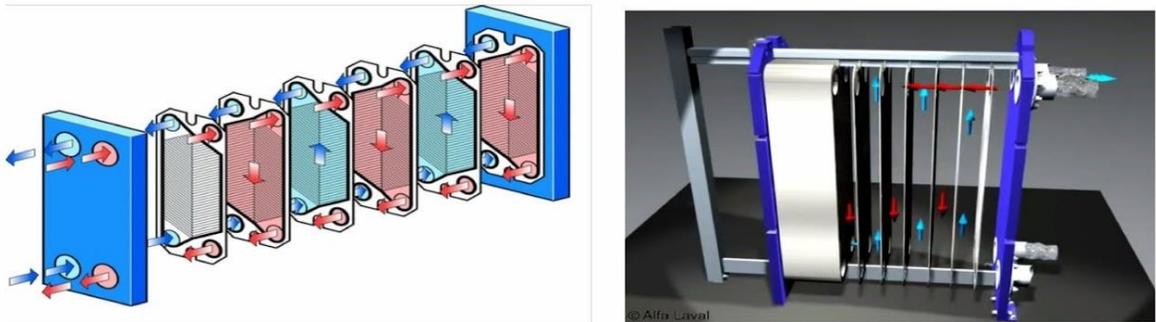
Con base a lo anterior, se presenta los subsistemas correspondientes del sistema escogido, con el motivo de identificar las diferentes alternativas para cada subsistema, identificando el más viable por medio de la matriz de calidad.

3.1.2 Intercambiador de Calor.

3.1.2.1 Alternativa 1. Intercambiador de calor de placas.

En este intercambiador de calor los fluidos se mueven a ambos lados de las placas, que generalmente son onduladas. El intercambiador de calor de placas puede tener un sistema de agua / agua, pero también aire / aire, como es el caso de ciertos sistemas de ventilación mecánica controlada (VMC).²⁰

Figura 26. Intercambiador de calor de placas



Fuente: < <https://images.app.goo.gl/JULMurW1nC9bSKq1A> >

Este intercambiador presenta las siguientes ventajas:

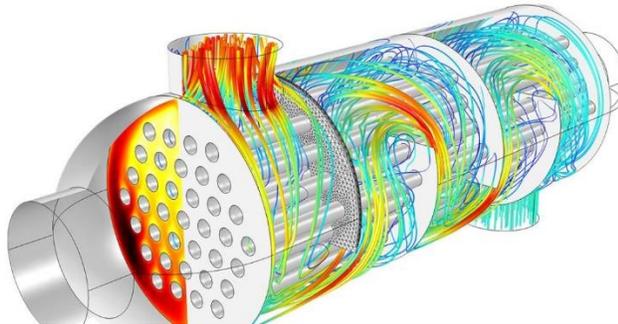
- Ocupa menor espacio que los otros intercambiadores de calor (piro tubular y espiral).
- Puede presentar mayor eficiencia debido a la elevada turbulencia generada en los canales.
- Al poseer una alta eficiencia es necesario una menor superficie de intercambio, por lo tanto, un equipo más ligero.
- Evita zonas muertas donde es posible acumular suciedad.

²⁰ COMERCIALFOISA. [En línea]. COMERCIALFOISA, Intercambiador de calor funcionamiento, tipos y eficiencia, Los diferentes tipos de intercambiadores de calor. [Consultado: 16 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://comercialfoisa.com/intercambiador-de-calor-funcionamiento-tipos-y-eficiencia/>.

3.1.2.2 Alternativa 2. Intercambiador de calor de carcaza y tubos.

El intercambiador de calor tubular consta de muchos tubos que se colocan en una carcasa (quemador). Este tipo de intercambiador es altamente resistente a la presión, sin embargo, es bastante voluminoso y no es necesariamente adecuado para instalaciones domésticas, es por estas razones que se utiliza en instalaciones potentes.²¹

Figura 27. Intercambiador de calor de coraza y tubos.



Fuente: < <https://images.app.goo.gl/wRwE1imSJwjjA4rh7> >

Dentro de las ventajas de un intercambiador de calor tubular, cabe destacar los siguientes factores:

- Bajos costos en mantenimiento.
- Altas presiones de trabajo.
- Altas temperaturas de operación.
- Procesado de fibras o partículas.
- Gran seguridad en procesos asépticos.
- Fácil inspección y desmontaje.
- Fácil de ampliar.

²¹ COMERCIALFOISA. [En línea]. COMERCIALFOISA, Intercambiador de calor funcionamiento, tipos y eficiencia, Los diferentes tipos de intercambiadores de calor. [Consultado: 16 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://comercialfoisa.com/intercambiador-de-calor-funcionamientotipos-y-eficiencia/>.

3.1.2.3 Alternativa 3. Intercambiador de calor en forma de espiral.

Su diseño consiste en un par de láminas de metal enrolladas (Figura 7) alrededor de un eje formando pasajes paralelos en espiral por entre los cuales fluye cada sustancia. El espaciamiento entre las láminas se mantiene gracias a que éstas se encuentran soldadas a una especie de para. Los canales que se forman en la espiral se encuentran cerrados en los extremos para que los fluidos no se mezclen. El fluir continuamente entre curvas induce turbulencia en los fluidos, lo cual mejora la transferencia de calor y reduce el ensuciamiento.²²

Figura 28. Intercambiador de calor de espiral



Fuente: < <https://images.app.goo.gl/E41aa1WdLqS2vtVr8> >

Algunas de las ventajas de este intercambiador de calor son:

- Intercambiador compacto y eficiente
- Fácil limpieza química por inmersión o recirculación
- Requisitos de espacios reducidos: instalación vertical²³

²² Guía de Intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones. [En línea]. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar, Marzo del 2002. [Consultado: 16 de Mayo 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/7767151/GUIA_DE_INTERCAMBIADORES_DE_CALOR_TIPOS_GENERALES_Y_APLICACIONES.

²³ BARRIQUAND. [En línea]. Saint-Claude: BARRIQUAND, El especialista del intercambiador de calor. [Consultado: 17 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.barriquand.com/es/intercambiadores-calor/intercambiador-calor-espiral/>.

A continuación, se elabora una matriz de calidad (QFD), la cual nos permite analizar con más detalle cada una de las alternativas de intercambiadores de calor anteriormente mencionadas con los diferentes parámetros establecidos, calificándolas de la siguiente manera:

-1... Desfavorable

0... Poco favorable

1... Muy favorable

Esta matriz se desarrolló teniendo en cuenta que el flujo de los intercambiadores debe ser cruzado y que se debe determinar su selección principalmente de los parámetros de capacidad, economía y mantenimiento, ya que con estas características se puede identificar el intercambiador más efectivo de este proyecto.

Tabla 2. Parámetros de calidad de las alternativas de intercambiadores de calor

CRITERIO	PARÁMETRO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
DIMENSIONES	CAPACIDAD (1)	0	2	2
	ECONÓMICO (2)	-2	2	0
MECANISMO	VERSATILIDAD (6)	1	0	0
	MANTENIMIENTO (3)	0	2	2
	PESO MODERADO (7)	1	0	0
COSTO DE MATERIALES	VIDA ÚTIL PROLONGADA (8)	1	0	0
	CONTAMINACIÓN BAJA (10)	1	1	1
ERGONOMÍA	FÁCIL ENSAMBLE (4)	0	1	0
	SEGURO (9)	1	1	1
	BAJA VIBRACION (11)	1	0	0
PIEZAS NORMALIZADAS	AJUSTABLE (5)	1	1	0
	TOTAL	5	10	6

De acuerdo a la tabla anterior, podemos deducir que para nuestro sistema de calefacción la mejor alternativa es la 2 (carcaza y tubos), debido al cumplimiento de la mayoría de los parámetros requeridos.

3.1.3 Cámara de combustión.

3.1.3.1 Alternativa 1. Cámara de combustión de parrilla fija.

Son sistemas de combustión en masa en los que el combustible, generalmente carbón o leña, se vierte sobre una parrilla desde arriba o procedente de una tolva. El aire necesario para la combustión llega desde abajo forzado o por tiro natural. El grosor que alcanza el lecho de combustible varía en función del tipo de combustible y del tipo de caldera. Este tipo de quemador se utiliza en calderas domésticas o de pequeñas dimensiones.²⁴

Figura 29. Quemador de parrilla fija



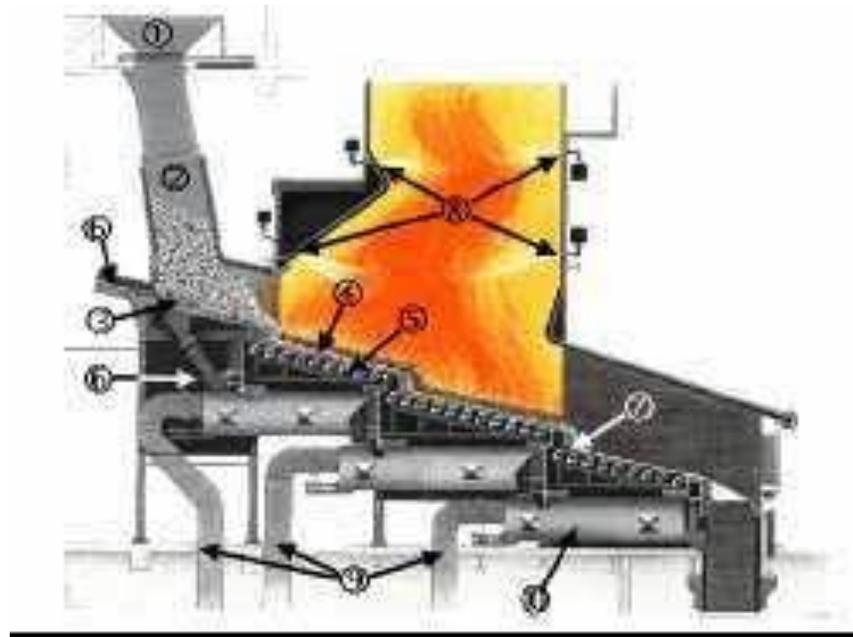
Fuente: <<https://images.app.goo.gl/gt22kpRLc2mgKxsf7>>

²⁴ ACADEMIA. [En línea]. ACADEMIA, Quemadores para combustibles sólidos. [Consultado: 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/25502140/QUEMADORES_PARA_COMBUSTIBLES_SÓLIDOS.

3.1.3.2 Alternativa 2. Cámara de combustión de parrilla móvil.

Se utiliza para calderas industriales, denominándose también hogar mecánico. Está compuesto por un sistema transportador de cadena, con una superficie plana sobre la que se vierte el combustible sólido. La cadena desplaza el combustible desde la zona de carga hasta la zona de combustión, con lo que el lecho de combustible está en continuo movimiento dentro del hogar, quemándose y cediendo calor a las superficies de absorción de la caldera.²⁵

Figura 30. Quemador de parrilla móvil



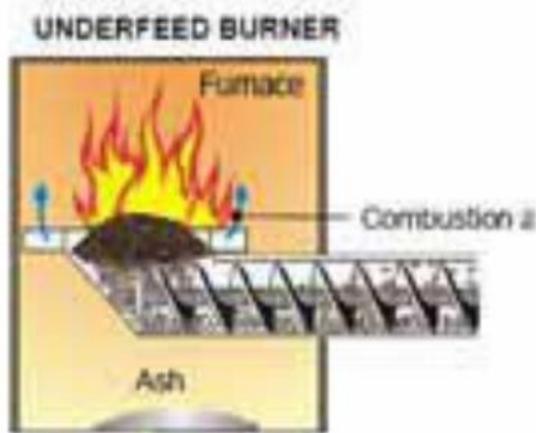
Fuente: <<https://images.app.goo.gl/t9r4T7zdSkyAv1BE7>>.

²⁵ ACADEMIA. [En línea]. ACADEMIA, Quemadores para combustibles sólidos. [Consultado: 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/25502140/QUEMADORES_PARA_COMBUSTIBLES_SÓLIDOS.

3.1.3.3 Alternativa 3. Cámara de combustión con alimentación inferior.

el combustible llega hasta el hogar impulsado por un pistón o por un tornillo sinfín. Al llegar a la parte más alta del quemador, el combustible se vierte, distribuyéndose sobre una superficie de fundición, con orificios a través de los cuales se introduce el aire necesario para la combustión.²⁶

Figura 31. Quemador con alimentación inferior por tornillo sin fin



Fuente: <<https://images.app.goo.gl/YcHFY2FU1kCdwTxU9>>.

²⁶ ACADEMIA. [En línea]. ACADEMIA, Quemadores para combustibles sólidos. [Consultado: 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/25502140/QUEMADORES_PARA_COMBUSTIBLES_SÓLIDOS.

A continuación, se elabora una matriz de calidad (QFD), la cual nos permite analizar con más detalle cada una de las alternativas de cámaras de combustión anteriormente mencionadas con los diferentes parámetros establecidos, calificándolas de la siguiente manera:

-1... Desfavorable

0... Poco favorable

1... Muy favorable

Para la selección de esta matriz se les dio importancia a los mismos parámetros del intercambiador de calor (capacidad, economía y mantenimiento), debido a que estos 2 componentes se identifican principalmente con estas características.

Tabla 3. Parámetros de calidad de las alternativas de la cámara de combustión

CRITERIO	PARÁMETRO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
DIMENSIONES	CAPACIDAD (1)	0	2	2
MECANISMO	ECONÓMICO (2)	2	0	2
	VERSATILIDAD (5)	-1	1	1
	MANTENIMIENTO (3)	2	0	2
COSTO DE MATERIALES	PESO MODERADO (10)	0	-1	0
	VIDA ÚTIL PROLONGADA (6)	0	1	0
ERGONOMÍA	CONTAMINACIÓN BAJA (9)	0	0	0
	FÁCIL ENSAMBLE (7)	1	0	1
	SEGURO (4)	-1	1	1
PIEZAS NORMALIZADAS	BAJA VIBRACION (11)	1	0	0
	AJUSTABLE (8)	1	0	0
	TOTAL	5	4	9

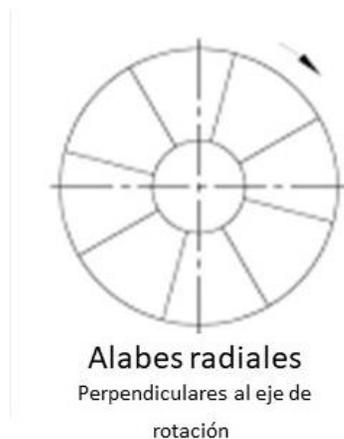
De acuerdo a la tabla anterior, podemos deducir que para nuestro sistema de calefacción la mejor alternativa es la 3 (alimentación inferior), debido al cumplimiento de la mayoría de los parámetros requeridos.

3.1.4 Sistema de ventilación. En este proyecto se usará un ventilador centrífugo, el cual tiene 3 alternativas disponibles de hélices que se deben analizar con los parámetros del sistema.

3.1.4.1 Alternativa 1. Sistema de ventilación centrífugo de hélice recta.

se trata de los más simples, antiguos, voluminosos y de bajo rendimiento. Aun así, ofrecen la ventaja de ser autolimpiables gracias a la forma de las palas, pues el polvo y suciedad no se adhieren. Gracias a esta característica, el uso más adecuado para este tipo de ventiladores es el traslado de materiales polvorientos o granulados, ya que se mantendrá limpio.²⁷

Figura 32. Ventilador centrífugo de hélices rectas



Fuente: < <https://images.app.goo.gl/BEFHkMyuGR7bBq8C9>>.

Para aplicaciones de manejo de materiales en plantas industriales. El rotor es de construcción para uso pesado y es fácil de reconstruir en campo. También se usa para aplicaciones industriales de alta presión.²⁸

²⁷ SDT AIR. [En línea]. Girona: SDT AIR, Ventiladores centrífugos: características y ventajas, Tipos de ventiladores centrífugos, 26/08/2020. [Consultado: 18 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.sdtair.com/ventiladores-centrifugos-caracteristicas-y-ventajas>.

²⁸ FACO. [En línea]. Guadalajara: EMIJH SALAS, Ventiladores centrífugos, 2016. [Consultado: 18 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.facorb.com/ventiladores-centrifugos>.

3.1.4.2 Alternativa 2. Sistema de ventilación de hélice hacia adelante.

Conocidos como multipalas, mueven más cantidad de aire por la curvatura de las palas, y éstas están colocadas a favor del sentido de rotación. Son comúnmente usados en ventiladores de medio y pequeño tamaño con potencias menores, sobre todo en espacios de uso residencial o comercial donde el ruido se ha de tener en cuenta.²⁹

Figura 33. Ventilador centrífugo de hélices hacia adelante



Fuente: < <https://images.app.goo.gl/BEFHkMyuGR7bBq8C9>>.

Para aplicaciones de ventilación general de baja presión y de aire acondicionado, hornos domésticos, unidades centrales y equipos de acondicionamiento de aire para unidades de techo.³⁰

²⁹ SDT AIR. [En línea]. Girona: SDT AIR, Ventiladores centrífugos: características y ventajas, Tipos de ventiladores centrífugos, 26/08/2020. [Consultado: 18 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.sdtair.com/ventiladores-centrifugos-caracteristicas-y-ventajas>.

³⁰ FACO. [En línea]. Guadalajara: EMIJH SALAS, Ventiladores centrífugos, 2016. [Consultado: 18 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.facorb.com/ventiladores-centrifugos>.

3.1.4.3. Alternativa 3. Sistema de ventilación de hélice hacia atrás.

Es el que ofrece mayor rendimiento porque la parte convexa de las palas se mueve a favor de la rotación, favoreciendo el flujo de aire y evitando pérdidas por choque y remolino. Por ese mismo motivo son los más utilizados y prácticamente el único en ser aplicado para potencias elevadas. Aunque el ventilador de hélices curvas hacia adelante sea capaz de mover más aire, éste es más efectivo, además de requerir menos mantenimiento y tener una vida más longeva.³¹

Figura 34. Ventilador de hélices hacia atrás



Fuente: < <https://images.app.goo.gl/BEFHkMyuGR7bBq8C9>>.

Para calefacción general y ventilación. Usados en algunas aplicaciones industriales donde las aspas aerodinámicas no son aceptadas.

Ideales para manejo de aire limpio o con pocas partículas de polvo. Trasmisión por bandas y poleas, para trabajo continuo y pesado.³²

³¹ SDT AIR. [En línea]. Girona: SDT AIR, Ventiladores centrífugos: características y ventajas, Tipos de ventiladores centrífugos, 26/08/2020. [Consultado: 18 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.sdtair.com/ventiladores-centrifugos-caracteristicas-y-ventajas>.

³² FACO. [En línea]. Guadalajara: EMIJH SALAS, Ventiladores centrífugos, 2016. [Consultado: 18 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.facorb.com/ventiladores-centrifugos>.

A continuación, se elabora una matriz de calidad (QFD), la cual nos permite analizar con más detalle cada una de las alternativas de los sistemas de ventilación anteriormente mencionadas con los diferentes parámetros establecidos, calificándolas de la siguiente manera:

-1... Desfavorable

0... Poco favorable

1... Muy favorable

Los parámetros considerables para la selección del ventilador centrífugo correcto son: la economía y la versatilidad, puesto que al momento de incorporar los ventiladores al calefactor estos factores son indispensables en el funcionamiento del equipo.

Tabla 4. Parámetros de calidad de las alternativas del sistema de ventilación

CRITERIO	PARÁMETRO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
DIMENSIONES	CAPACIDAD (3)	1	1	1
MECANISMO	ECONÓMICO (1)	0	2	0
	VERSATILIDAD (2)	0	2	2
	MANTENIMIENTO (4)	0	0	0
COSTO DE MATERIALES	PESO MODERADO (5)	1	1	1
	VIDA ÚTIL PROLONGADA(10)	0	0	0
ERGONOMÍA	CONTAMINACIÓN BAJA (11)	0	0	0
	FÁCIL ENSAMBLE (6)	1	1	1
	SEGURO (9)	1	1	1
PIEZAS NORMALIZADAS	BAJA VIBRACION (7)	0	1	1
	AJUSTABLE (8)	1	1	1
TOTAL		5	10	8

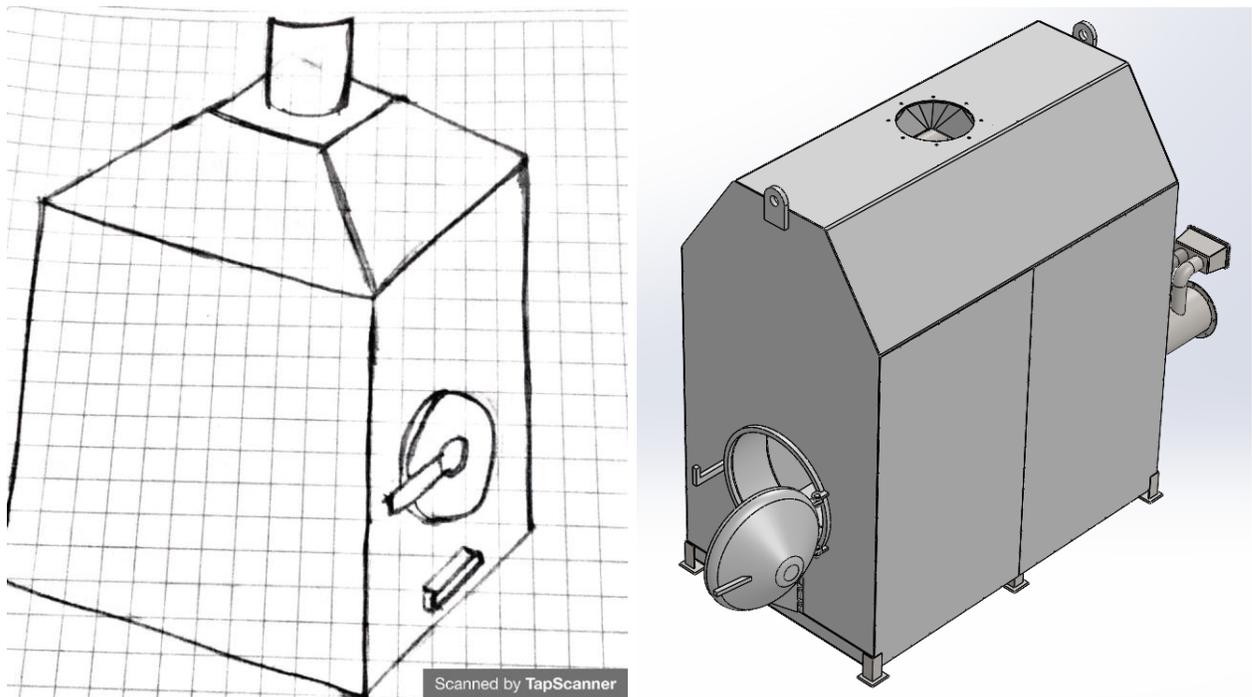
De acuerdo a la tabla anterior, podemos deducir que para nuestro sistema de calefacción la mejor alternativa es la 2 (hélices hacia adelante), debido al cumplimiento de la mayoría de los parámetros requeridos.

3.2 DESCRIPCIÓN PROPUESTA DE SOLUCIÓN

A continuación, se presenta la solución de cada subsistema correspondiente, identificando su función en el sistema general.

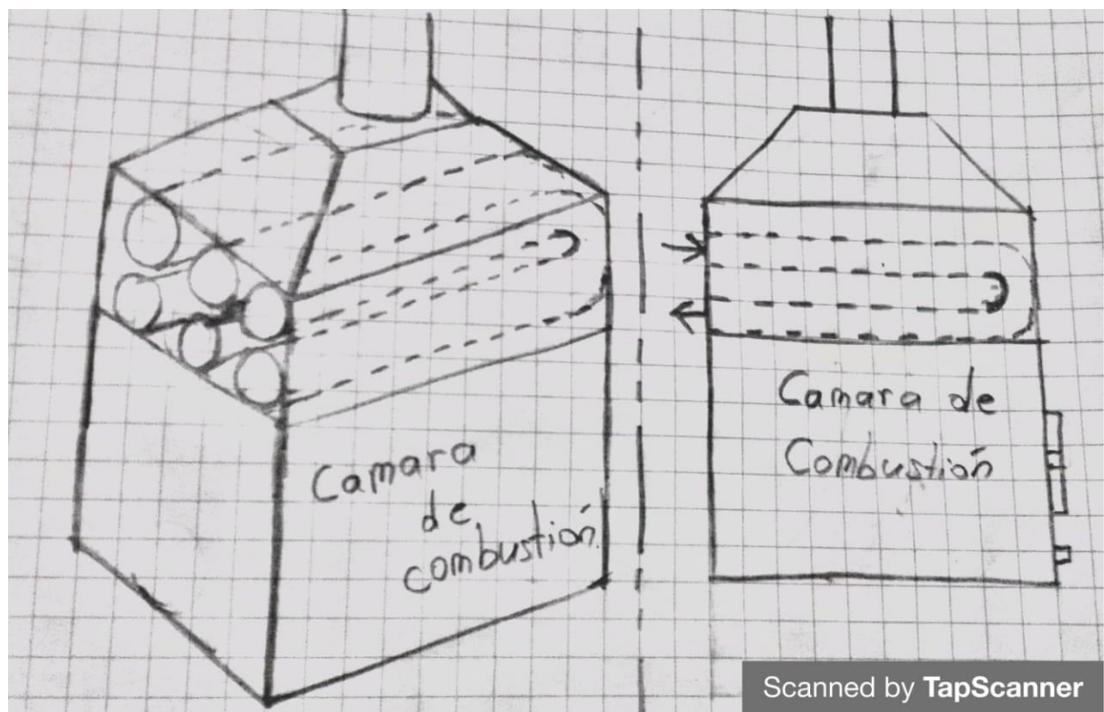
3.2.1 Solución del sistema de calefacción. Se quiere desarrollar un sistema funcional que permita un control eficaz de temperatura de un galpón avícola de 150x30 metros, destacando la importancia del uso de un biocombustible (cascarilla de palma africana).

Figura 35. Calentador central galpón de cascarilla de palma africana



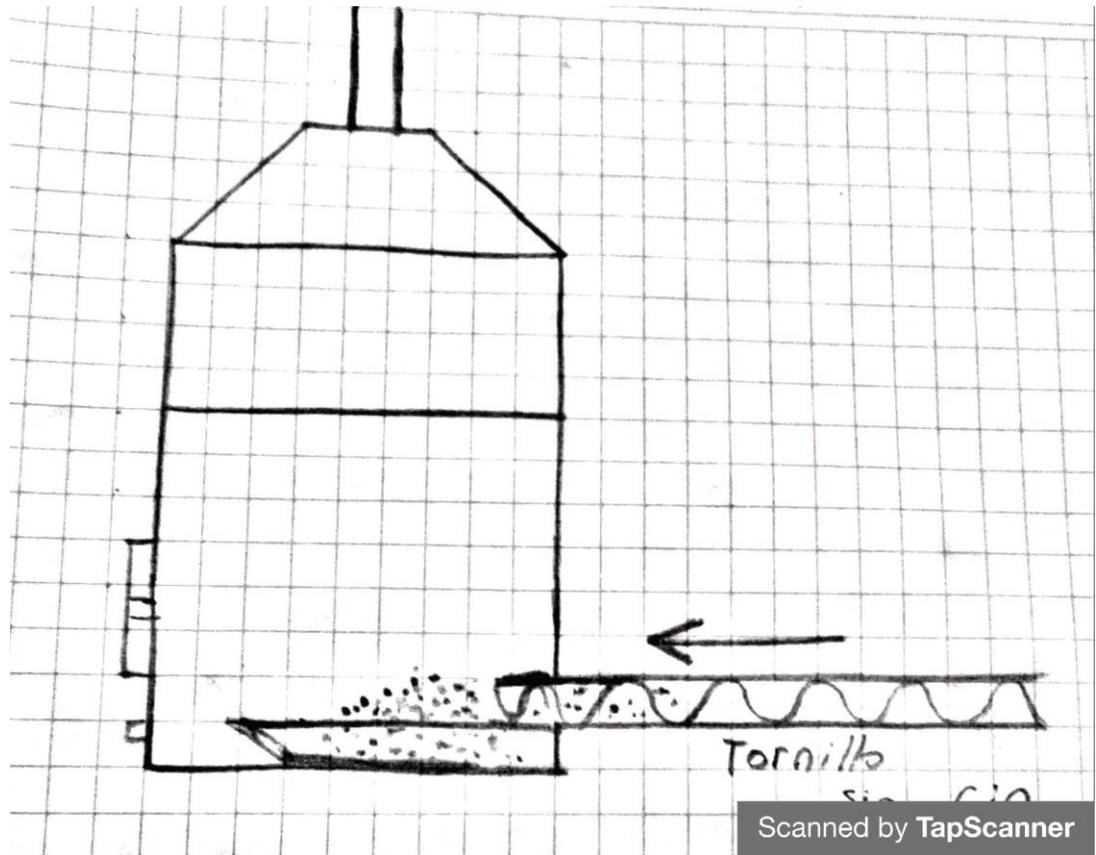
3.2.2 Solución del subsistema de intercambiadores de calor. Para este sistema se pretende utilizar un intercambiador de calor multitubular que permita el aumento de temperatura necesaria para el interior del galpón, teniendo en cuenta ocupar la máxima área posible en la parte interior-superior de la carcasa (calentador), obteniendo la mayor eficiencia de transferencia de calor y desempeño del sistema. Cabe aclarar que este subsistema obtiene aire del medio ambiente, en el cual esté ubicado geográficamente.

Figura 36. Intercambiador de coraza y tubos interno



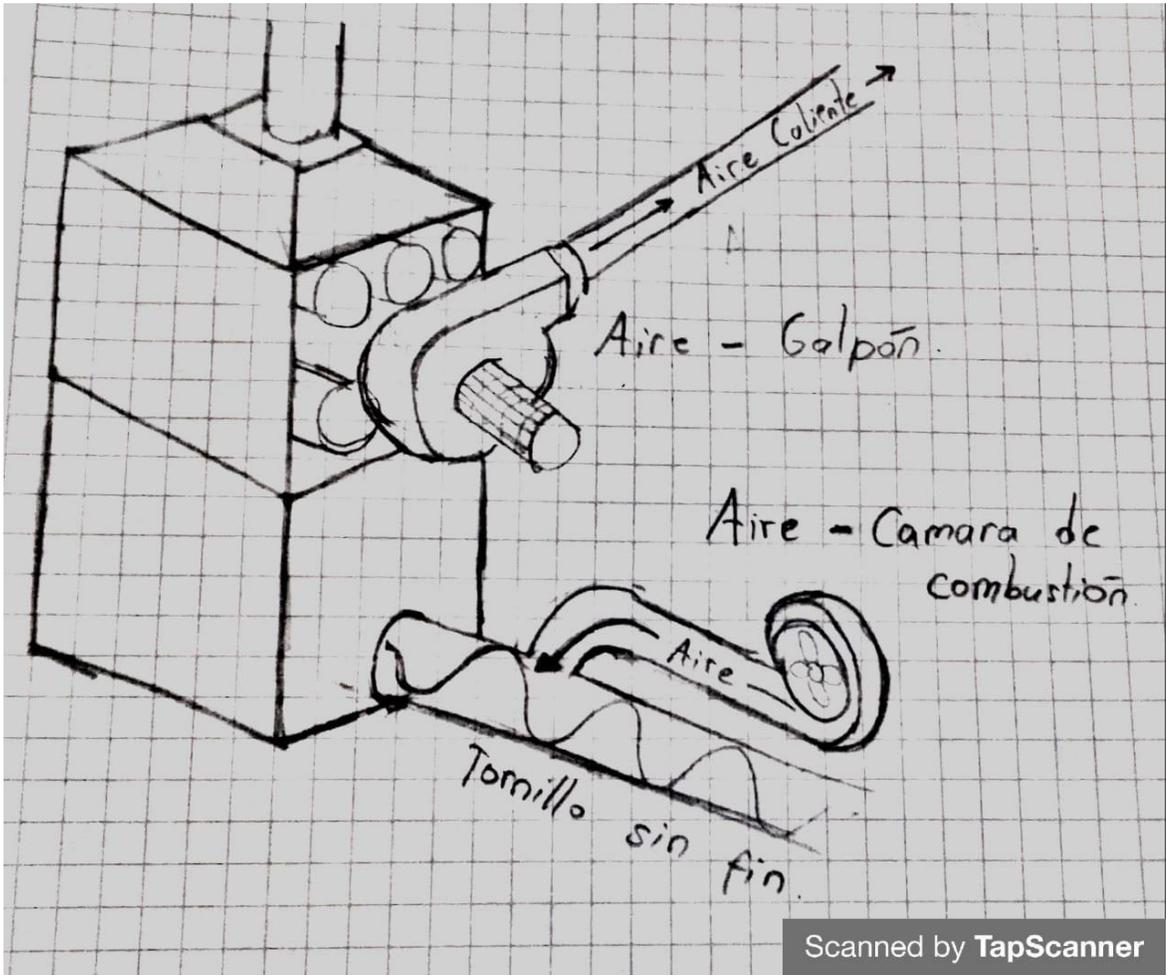
3.2.3 Solución del subsistema de cámara de combustión. Para este proyecto se implementó una cámara de combustión (quemador), que permita el fácil ingreso de biocombustible (cascarilla de palma africana), como también de la trituración de este. Para esta solución se determinó el uso de un tornillo sin fin inferior que transporte y triture el biocombustible en cuestión, facilitando y asegurando un trabajo más eficiente y seguro.

Figura 37. Cámara de combustión (quemador) con alimentación de tornillo sin fin inferior



3.2.4 Solución del subsistema de ventilación. Este sistema cuenta con dos equipos de ventilación centrífugos (hélices hacia adelante), el uno para generar aire de combustión dentro de la cámara de combustión, y el otro que se encarga de hacer circular el aire ambiente por los tubos del intercambiador de calor permitiendo la entrada de aire caliente constante al galpón.

Figura 38. Ventilador centrífugo de aire (hélices hacia adelante). Dirigido hacia el interior del galpón y dirigido hacia el interior de la cámara de combustión



4 DISEÑO EN DETALLE DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN.

Para el cálculo de los subsistemas del sistema de calefacción, es necesario tener en cuenta los requerimientos y las necesidades dadas por la empresa INDARS S.A.S. En este aspecto, se diseña un sistema de calefacción para un galpón avícola de 150x30 [m²], se desarrollan cálculos y se elaboran en tablas mostradas en este documento.

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA.

El combustible que se va a utilizar en el funcionamiento del sistema de calefacción es el cuesco de palma africana, al cual se lo puede definir como biomasa.

El cuesco de palma africana es un residuo en el proceso de extracción de aceite y torta de palmiste, el cual pretende ser utilizado como combustible, para ello se debe tener en cuenta las propiedades que posea.

Figura 39. Características del análisis próximo y elemental del cuesco de palma

Análisis Elemental (%)				Análisis Próximo (%)		
C	H	N	O	Humedad	Volátiles	Ceniza
52.8	5.7	<1	40.5	11.2	79	1.4

Fuente: Modelo para la gasificación del cuesco de palma aceitera.

Esta tabla se obtuvo de la toma de propiedades del cuesco de palma aceitera para un proceso térmico de gasificación.³³

Con los datos obtenidos de la anterior tabla se procede con el análisis del desarrollo de la ecuación empírica del cuesco de palma africana.

³³ SÁNCHEZ ALFOSNO, Raúl Antonio, *et al.* Modelo para la gasificación del cuesco de palma aceitera. *Revista de la Facultad de Ingeniería*. [en línea]. GIATME: Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, Julio - Diciembre 2017, Vol. 18, nro. 36. [Consultado: 1 de Junio 2021]. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwif870l2I3yAhVzsDEKHTVJArAQFjAAegQIBRAD&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F6333250.pdf&usg=AOvVaw0qK4KvWzaqNln4WuA8pb8H>.

Primero se calcula la composición de los elementos en base seca del cuesco (masa de cada elemento en gramos), es decir, libre de cenizas y humedad (DAF, por sus siglas en ingles), para posteriormente calcular el número de moles correspondiente a cada elemento. (Tabla 5 y 6).

Por consiguiente, se divide dichas moles sobre el número de moles del carbono, obteniendo la formula empírica del cuesco. (Tabla 7).

Tabla 5. Cálculo de los gramos de cada componente del cuesco

$\%CBS = \frac{\%C}{1 - \%Humedad - \%Cenizas}$	
%Componente en base seca	%CBS
%Componente presente en el cuesco	%C
%Humedad del cuesco	%Humedad
%Cenizas del cuesco	%Cenizas
GBS= %CBS*100	
Componente	Gramos del componente en base seca (GBS)
Carbono [C]	60,41 [g]
Hidrogeno [H₂]	6,2 [g]
Oxigeno [O₂]	46,34 [g]
Nitrogeno [N₂]	1,14 [g]

Tabla 6. Cálculo de moles de cada componente del cuesco

$MOLES_{COMP} = \frac{GBS}{Peso\ atomico_{comp}}$		
Moles de cada componente	<i>MOLES_{COMP}</i>	
Gramos del componente en base seca	GBS	
Peso atómico de cada componente	<i>Peso Atomico_{comp}</i>	
Componente	Peso atómico	Moles
Carbono [C]	12	5,034
Hidrogeno [H₂]	1,008	6,47
Oxigeno [O₂]	16	2,896
Nitrogeno [N₂]	14	0,081

Tabla 7. Cálculo de los subíndices de la formula empírica

$SUB = \frac{MOLES_{COMP}}{MOLES_C}$	
Subíndice formula empírica	SUB
Moles de cada componente	$MOLES_{COMP}$
Moles de carbono	$MOLES_C$
Componente	Subíndice formula empírica
Carbono [C]	1
Hidrogeno [H_2]	1,29
Oxigeno [O_2]	0,575
Nitrogeno [N_2]	0,01

Debido a que en el diseño del galpón se usa aire de un ventilador centrifugo, se debe modificar la formula empírica anteriormente mencionada.

Teniendo en cuenta que el aire seco está compuesto por 20.9 porciento de oxígeno, 78.1 porciento de nitrógeno, 0.9 por ciento de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, helio, neón e hidrógeno.³⁴

Se determina que la composición del aire aproximada es de 21% de oxígeno y 79% de Nitrógeno, es decir, que por cada mol de oxígeno (O_2) en el aire, hay 3.76 moles de nitrógeno (N_2), TABLA 8. (ψ).

Tomando como referencia la información obtenida con anterioridad, se procede al cálculo de la ecuación empírica teniendo en cuenta el 50 % de exceso de aire, esto es debido a que se necesita este exceso de aire para obtener combustión completa.³⁵

Se asume que el nitrógeno no interviene en la reacción y que solo se consume el oxígeno exacto que requiere la reacción para la combustión completa.

³⁴ CENGEL Yanus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, 8va edición. Mc Graw-Hill, 2015. p. 773.

³⁵ GRAHAM, Frank D. Audels engineers and mechanics, guide 5. Theo Audel & Co. editions, 1 Enero 1921. p. 1857.

Tabla 8. Ecuación empírica con 50% de exceso de aire

Ecuación empírica con 50 % de exceso de aire			
$C_x H_y O_z + \alpha \varepsilon * (O_2 + \psi * N_2) \Rightarrow X * CO_2 + \frac{1}{2} * Y * H_2 O + \varepsilon * (\alpha - 1) * O_2 + \alpha * \varepsilon * \psi * N_2$			
Aire Teorico (ε)			
$\varepsilon = X + \frac{1}{4} * Y - \frac{1}{2} * Z$			
Relacion de moles existentes en el aire (ψ)	Z	X	Y
$\psi = \frac{79}{21}$	0,575	1	1,29
Exceso de aire (α)	RESULTADOS		
50% \Rightarrow $\alpha = 1,5$	$\varepsilon = 1,035$		
Ecuación balanceada para la combustión completa			
$CH_{1,29}O_{0,575} + \frac{621}{400} * (O_2 + 3.76 * N_2) \Rightarrow CO_2 + \frac{129}{200} * H_2 O + \frac{207}{400} * O_2 + \frac{29187}{5000} * N_2$			

Una vez obtenida la ecuación empírica del cuesco de palma africana con el 50 % de exceso de aire, se procede con el cálculo de la relación de masa de aire con respecto a la masa de combustible (cuesco), con el fin de obtener el equipo de ventilación necesario para la combustión completa requerida.

Tabla 9. Cálculo de la relación aire combustible del cuesco

Relacion aire combustible (A°)	
$A^\circ = \frac{G_a * \varepsilon * \alpha}{M_f}$	
Gramos de aire por mol de oxigeno (G_a)	
$G_a = 4,76 * 28,97$	
Masa molar del combustible (M_f)	
$M_f = 12 * X + Y + 16 * Z$	
Resultados	
A°	9,43
G_a	136,6
M_f	22,49

Como se mencionó anteriormente, con la relación de aire combustible se puede analizar y seleccionar el ventilador requerido para conservar el exceso de aire anteriormente mencionado, esto se desarrollará más adelante en el documento.

Posteriormente se continua con el análisis del cálculo de la temperatura de llama adiabática del cuesco, con la siguiente ecuación.

Tabla 10. Relación de la temperatura de llama adiabática

Relación de temperatura de llama adiabática
$\sum N_p * (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - h^{298})_p = \sum N_R * (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - h^{298})_R$

Para ello se debe tener en cuenta la relación de temperatura de flama adiabática mencionada anteriormente, la cual se desarrolla con respecto a las siguientes suposiciones.

- Proceso de combustión de flujo estacionario
- Cámara de combustión adiabática. $Q=0$
- No existen interacciones de trabajo. $W=0$
- El aire y los gases de combustión son ideales.
- Los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes

Estas suposiciones se tomaron del libro de termodinámica de Cengel.³⁶

Teniendo en cuenta estas hipótesis se puede continuar con el cálculo de la temperatura de llama adiabática, que en este caso se necesitó de la ayuda de un software de cálculo (EES), debido a que la ecuación está en función de las entalpías, las cuales a la vez están en función de la temperatura.

³⁶ CENGEL Yanus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, 8va edición. Mc Graw-Hill, 2015.]. p. 792.

Tabla 11. Cálculo de la temperatura de llama adiabática

Balance de energía para la temperatura combustion simplificado		
$\sum N_p * (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - h^{298})_p = \sum N_R * (\bar{h}_f^0)_{cuesco}$		
Balance de energía para cálculo de temperatura de combustión adiabática		
$N_{comb} * h_{comb} = N_{CO_2} * h_{CO_2} + N_{H_2O} * h_{H_2O} + N_{O_2} * h_{O_2} + N_{N_2} * h_{N_2}$		
Componentes	Entalpia estandarizada [KJ/Kmol]	Moles
Combustible	-450000	1
CO ₂	-663445	1
H ₂ O	-383997	$\frac{129}{200}$
O ₂	76718	$\frac{207}{400}$
N ₂	72193	$\frac{29187}{5000}$
Resultado temperatura de llama adiabática		
$T_{llama\ adiabática} = 2405 [K]$		$T_{llama\ adiabática} = 2131 [°C]$

Para el cálculo realizado en la anterior tabla, se necesitó de la entalpia de formación del combustible a 298[K] (-450 [KJ/mol] “reacción exotérmica”). Este dato se obtuvo del libro de Spiro “Chemistry of the Enviroment”.³⁷

Según Perry, la temperatura de los gases de combustión en los hornos convencionales generalmente es de 200 a 300 [°F] (93 a 149 [°C]).³⁸

Tomando de lo anteriormente mencionado se puede obtener la temperatura inicial de llama adiabática.

Tabla 12. Temperatura inicial llama adiabática

Temperatura inicial de llama adiabática	
$T_{Inicial\ llama} = 2255 [K]$	$T_{Inicial\ llama} = 1982 [°C]$

³⁷ SPIRO, Thomas G., and WILLIAM, Stigliani. Chemistry of the Environment. 2da ed. Pearson, 2003. p. 19.

³⁸ PERRY, John H. Chemical Engineers Handbook. 7ma ed. McGraw-Hill, 1997. ISBN 0-07-115448-5.

4.2 DISEÑO DEL CALEFACTOR.

En el diseño del calefactor se deben tener presentes cada uno de los subsistemas que lo componen, ya que nos permite identificar que al momento de poner en funcionamiento el calefactor cumpla con los requerimientos necesarios para el galpón, de esta manera se pretende desarrollar y analizar cada subsistema presente en la máquina.

4.2.1 Calor de Diseño. Para el diseño del calefactor es necesario conocer el calor que este debe generar, teniendo en cuenta las condiciones de temperatura más críticas del lugar donde está ubicado el galpón avícola.

Según Erazo ³⁹, el aire caliente que debe generar el calefactor está en función del volumen del galpón, el coeficiente de dispersión en base al material del galpón y el diferencial de temperatura entre la temperatura necesaria dentro del galpón y la temperatura ambiente.

Tabla 13. Calor de diseño

Cálculo del calor de diseño		
	$Q_d = v_G * \Delta T * C_d$	
	$v_G = 150 * 30 * 2,20$	Volumen del galpón
	$\Delta T = T_{requerida_{galpon}} - T_{amb}$	Diferencial de temperatura
	$C_d = 2$	Coeficiente de dispersión
	Calor de diseño $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$	Calor de diseño [KW]
	99000	115,14

³⁹ GRAHAM, ERAZO CHÁFUEL, Diego Orlando. Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y humedad para un galpón de pollos de la avícola “la esperanza”. Trabajo de grado Ingeniero en mecatrónica. Ibarra (Ecuador): Universidad técnica del norte, Junio 2014

4.3 DISEÑO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

4.3.1 Diseño de la parrilla. Uno de los componentes más importantes para tener en cuenta en el diseño del calefactor es la parrilla, debido a que de esta depende la cantidad de aire y combustible que ingresa en la cámara de combustión.

La parrilla es el lugar donde se asienta el cuesco de palma africana, la cual debe tener unos orificios donde pueda caer la ceniza y poder retirarla para evitar pérdidas de calor por residuo.

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta es que la parrilla debe estar perforada un 50 % de su área para permitir que el aire de combustión entre adecuadamente a la cámara de combustión, además estas perforaciones permitirán que las cenizas puedan caer para su fácil extracción y sin interrumpir la operación.⁴⁰

La forma y dimensiones de la parrilla está determinada por la forma de la cámara de combustión, en este sentido, la parrilla que se va a diseñar debe ser rectangular, ya que con esta geometría se garantiza una distribución uniforme del calor y la biomasa.

Tabla 14. Medidas de la parrilla

Cálculo del Flujo de Cascarilla			
Área de la parrilla (A_p)			
Longitud	0,365 [m]	Ancho	0,3 [m]
$A_p = 0,1095 \text{ [m}^2\text{]}$			
Flujo de cascarilla de palma africana (\dot{m}_c)			
$\frac{\dot{m}_{Ref}}{A_{Ref}} = \frac{\dot{m}_c}{A_p}$			
Flujo de referencia	\dot{m}_{Ref}	62	[Kg/h]
Área de referencia	A_{Ref}	0,126	[m ²]
Flujo de cascarilla		54	[Kg/h]

⁴⁰ GRAHAM, Frank D. Audels engineers and mechanics, guide 6. Theo Audel & Co. editions, 1 Enero 1921. p. 2443.

Con las dimensiones de la parrilla se calcula el flujo de cascarilla teórico de palma africana que se debe ingresar por hora a la cámara de combustión, para esto se realiza una relación de áreas, teniendo en cuenta que para un quemador de cascarilla de palma aceitera se utilizan 62 [Kg/h] de cuesco para un área de parrilla de 0.126 [m2].⁴¹

4.3.2 Eficiencia del equipo. La eficiencia del calefactor está dada por la relación entre el calor de diseño y el calor generado por la combustión de la cascarilla de palma africana, esta relación indica la cantidad de calor aprovechado, ya que debido a presupuesto la cámara de combustión no contará con un aislante térmico.

Para evitar inconvenientes posteriores al diseño, se utilizó un factor de seguridad del 70% de la capacidad de operación, ya que no se garantiza la combustión total del cuesco de palma africana.⁴¹

Una vez obtenido la cantidad de cuesco que ingresa a la cámara, se puede calcular la cantidad de aire de combustión que entra con dicho flujo de cuesco y la relación aire combustible.

Tabla 15. Eficiencia del equipo

Eficiencia del equipo (η_{equipo})		
Calor generado por la combustión (Q_C)		$Q_C = \dot{m}_c * C_{p_{cascarilla}} * 0,7$
Poder calorífico cascarilla	19660[Kj/kg]	
Q_C	715624 [Kj/h]	198,784 [Kw]
Eficiencia del equipo		Calor aprovechable
$\eta_{equipo} = \frac{Q_d}{Q_C}$		$Q_a = Q_C * \eta_{equipo}$
η_{equipo}	Q_a	
58%	415061,92 [Kj/kg]	52 [Kg/h]
Q_a	393402,87 [btu/h]	115,295 [Kw]

⁴¹ CÉLLERI, Diego Iván. Diseño y construcción de un generador de aire caliente con residuos de palma africana. Tesis de grado Ingeniero Químico. Quito: Universidad San Francisco de Quito Politécnico. Facultad de fisicoquímicas, Septiembre 2008. p. 36.

Se obtuvo que la eficiencia del equipo es del 58%, es decir que solo ese porcentaje de energía generada por la cascarilla de palma africana se transfiere al aire en el intercambio de calor. El calor aprovechable esta función del flujo de cascarilla, por ende, se determinó la relación optima entre la eficiencia del equipo y la cantidad de cascarilla, ya que si no se regula el ingreso de cascarilla al quemador su eficiencia se verá afectada.

Es importante resaltar que el calor aprovechable debe ser igual o superior al calor de diseño con el fin de cumplir los requerimientos óptimos de operación.

4.3.3 Selección del ventilador de combustión. Una vez determinada la relación teórica aire/combustible, se procedió a calcular el volumen de aire desplazado para así determinar el caudal de aire necesario para la combustión.

Para estos cálculos desarrollados, se debe tener en cuenta la densidad del aire a la temperatura que se encuentra. Para este caso se tomará una temperatura del aire para combustión de 300 K para la máxima temperatura y de 293K para la mínima temperatura a 1 atmosfera, es decir que se trabajará con una densidad de aire de 1.1614 Kg/m³ para la máxima y de 1.1846 Kg/m³ para la mínima, esto según a la tabla A-4 de INCROPERA.⁴²

Tabla 16. Balance de masa

Selección del ventilador de combustión	
	Volumen de aire desplazado $V_{Air_{des}} = \frac{A^\circ}{\rho_{aireamb}}$
	Densidad de aire ambiente $(\rho_{aireamb})$ 1,184 [Kg/m ³]
	Caudal de aire para la combustión $\dot{m}_a = V_{Air_{des}} * \dot{m}_c$
	\dot{m}_a
	$\dot{m}_a = 414,13 \left[\frac{m^3}{h} \right]$
	$\dot{m}_a = 243,76 [CFM]$

⁴² INCROPERA Frank P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: Pearson, 1999. p. 839.

Para garantizar que la cantidad de aire sea la adecuada a la hora de la combustión, es necesario un factor de seguridad en la selección del ventilador, debido a que el ventilador de llama está conectado a una bazuca de aire que ofrece obstáculos en la circulación, como lo es la cascarilla triturada.

Para obtener el ventilador requerido se selecciona del catálogo QuickFan “Ventiladores centrífugos de media presión y simple aspiración”, el cual aporta las especificaciones técnicas de la unidad que se debe determinar para el generador de calor.⁴³

Figura 40. Selección del ventilador de aire para combustión

Características técnicas

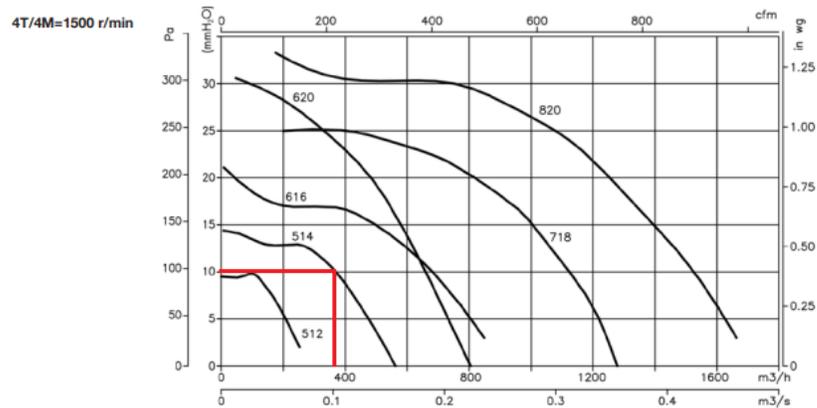
Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible (A)			Potencia instalada (kW)	Caudal máximo (m ³ /h)	Nivel presión sonora (dB (A))	Peso aprox. (Kg)	According ErP
		230V	400V	690V					
CMP-38-2M/E	2650	0,50			0,01	135	50	2	Excluded
CMP-38-2M	2600	0,50			0,01	160	50	2	Excluded
CMP-512-2T	2670	0,64	0,37		0,09	380	62	4	Excluded
CMP-512-2M	2760	0,79			0,09	380	62	4	Excluded
CMP-512-4T	1320	0,65	0,38		0,09	255	55	4	Excluded
CMP-512-4M	1370	0,83			0,09	255	55	4	Excluded
CMP-514-2T	2750	1,21	0,70		0,18	700	65	5	2015
CMP-514-2M	2780	1,42			0,18	700	65	5	2015
CMP-514-4T	1320	0,65	0,38		0,09	565	58	5	Excluded
CMP-514-4M	1370	0,83			0,09	565	58	5	Excluded
CMP-616-2T	2760	2,57	1,49		0,55	1380	69	8	2015
CMP-616-2M	2810	3,49			0,55	1380	69	10	2015
CMP-616-4T	1320	0,65	0,38		0,09	850	61	8	Excluded
CMP-616-4M	1370	0,83			0,09	850	61	8	Excluded
CMP-620-2T	2710	1,92	1,11		0,37	765	68	10	2015
CMP-620-2M	2780	2,53			0,37	765	68	10	2015
CMP-620-4T	1320	0,96	0,56		0,12	810	61	8	Excluded

Adicionalmente el catálogo proporciona las curvas características de los ventiladores, para este caso en el sistema no se tienen accesorios que generen pérdidas significativas de presión, en este orden de ideas, se verifica en las curvas del ventilador seleccionado el caudal real de aire que este arrojará, asumiéndose que se presentaran en total pérdidas del 100 [Pa]. Esto para facilitar la selección de los ventiladores.

Se debe seleccionar un ventilador que tenga un caudal mayor que el requerido, como un factor de fiabilidad durante su proceso.

⁴³ SODECA. Ventiladores centrífugos y extractore en línea para conductos. ventiladores centrífugos de media presión y simple aspiración. Barcelona: amca ediciones, 1983. p.180.

Figura 41. Curva característica del ventilador de aire para combustión



Para este caso el ventilador determinado (514) no cumple el caudal requerido, por lo tanto, se debe seleccionar el ventilador (616) o el ventilador (620), ya que estos cumplen con el caudal necesario.

4.3.4 Análisis de Transferencia de calor. Teniendo en cuenta la eficiencia del sistema, se definieron las pérdidas de calor, las cuales son del 42%, estas pérdidas se distribuyen entre chimenea y paredes del generador de calor. Según Graham del 20 al 40% de la energía total generada en hornos se pierde sin intercambiar calor por la chimenea, por lo tanto, se asumió que las pérdidas por chimenea son del 20% dejando un 22% de pérdidas por paredes.⁴⁴

En este tipo de generadores de calor se presentan dos tipos de transferencia de calor, transferencia por radiación y transferencia por convección. De acuerdo con Couper el 75% de la transferencia de calor tiene que darse por radiación, ocasionando que el 25% de calor restante sea transferido por convección.⁴⁵

⁴⁴ GRAHAM, Frank D. Audels engineers and mechanics, guide 6. Theo Audel & Co. editions, 1 Enero 1921. p. 2617.

⁴⁵ STANLEY, Wallas. Chemical process Equipment Selection and Design, 2nd edition. Lawrence (Kansas): Butterworth Heinemann, 2005. p. 208.

Para determinar el factor de forma para la transferencia de calor fue necesario buscar la emisividad del acero y la emisividad de la llama que genera la cascarilla, en este caso se relacionaron materiales similares a ella (madera con una emisividad de 0,94 y carbono con emisividad de 0,53 esto según el libro de termodinámica de Cengel). Obteniendo una relación para emisividad de la llama de 0,72. Posteriormente se calculó el área de transferencia de pérdidas de calor externas, por lo cual se realizó un pre-dimensionamiento de la cámara de combustión en base a un diseño funcional de la empresa TERMOAVES. Las dimensiones seleccionadas de la cámara se presentan en la siguiente tabla con el objetivo de determinar el área de transferencias por radiación.

Tabla 17. Transferencia de calor en la cámara de combustión

Transferencia de calor por radiación			
			
Factor de forma para transferencia de calor		Calor por radiación	
$F_{cf} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_{tr}}{A_{RCamara}} + \left(\frac{1}{\epsilon_f} - 1\right)}$		$Q_{rad} = \sigma * (T_{inicial\ llama}^4 - T_{gases}^4) * A_{tr} * F_{cf}$	
Calor por radiación		Área de transferencia de pérdidas de calor externas	
$Q_{rad} = Q_a * 0,75$		$A_{RCamara} = 2 * (L_{cam} * A_{cam}) + 2 * (A_{cam} * h_{camara}) + 2 * (A_{cam} * L_{cam})$	
Calor por convección		Emisividad del acero (ϵ_c)	Emisividad de la llama (ϵ_f)
$Q_{conv} = Q_a * 0,25$		0,32	0,72
		Largo de la cámara (L_{cam})	Ancho de la cámara (A_{cam})
Altura de la cámara (h_{cam})		1,2 [m]	0,85 [m]
1 [m]		Constante de Stefan Boltzmann	$5,67 * 10^8$ [W/($m^2 K^4$)]
Q_{rad}	86471,25 [W]	Q_{conv}	28823,75 [W]
		T_{gases}	1073 [K]
$A_{RCamara}$		6,14 [m^2]	Área de transferencia por radiación A_{tr}
			0,2 [m^2]

Adicionalmente se calculó el área total de transferencia del equipo y el área de convección efectiva. Para estos cálculos se encontró que el área de transferencia de calor para calderas es de 20 veces el área de la parrilla (Graham). Es importante recalcar que a la hora de diseñar se realice un sobre dimensionamiento del área de radiación como factor de seguridad.⁴⁶

Tabla 18. Pérdidas de calor y área de convección efectiva

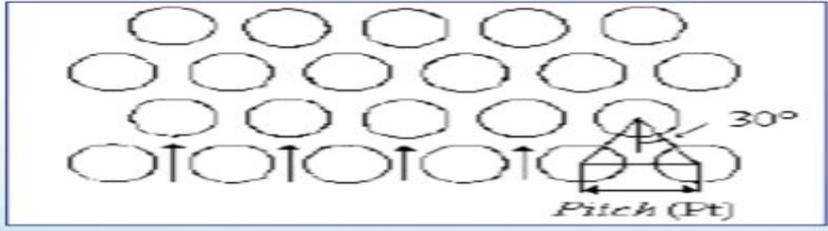
Pérdidas de calor por chimenea		Pérdidas de calor por paredes	
$Q_{per_chimenea} = Q_c * 0.20$		$Q_{per_paredes} = Q_c * 0.22$	
Área total de transferencia del equipo		Área de convección efectiva	
$A_{T_t} = A_p * 10$		$A_{convefe} = A_{T_t} - A_{tr}$	
$Q_{per_chimenea}$	$Q_{per_paredes}$	A_{T_t}	$A_{convefe}$
39,7568 [Kw]	43,7325 [Kw]	1,095 [m]	0,89 [m^2]

4.4 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

4.4.1 Determinación del arreglo de tubos. Para el diseño del sistema generador de calor fue necesario implementar un arreglo de tubos triangular, este tipo de arreglos son más económicos, eficientes y poseen mayor aprovechamiento en cualquier régimen de flujo de aire. El número de tubos en la base está determinado por el ancho de la cámara de combustión, ya que, con esto se busca el total aprovechamiento del área efectiva de la misma. Las dimensiones de los tubos se establecieron por medio de catálogos comerciales.

⁴⁶ GRAHAM, Frank D. Audels engineers and mechanics, guide 6. Theo Audel & Co. editions, 1 Enero 1921. p. 2617.

Tabla 19. Determinación del arreglo de tubos

Determinación del arreglo de tubos				
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Arreglo triangular</div> 				
Área superficial del tubo		Área superficial del arreglo de tubos		
$A_{SUP_{tubo}} = 2 * \pi * R_{tubo} * L_{tubo}$		$A_{SUP_{Atubos}} = N_t * A_{SUP_{tubo}}$		
Numero de tubos en la base				
$An_{tubos} = [X_{tubos} * (Num_{tubos_{base}} + 1) + [D_{tubo} * Num_{tubos_{base}}]$				
D_{tubo}	2,5 [in]	L_{tubo}	1,2 [m]	$Num_{tubos_{base}}$
Numero de tubos (N_t)		35		9
$A_{SUP_{tubo}}$		$A_{SUP_{Atubos}}$		Ancho de la camara (A_{cam})
0,287 [m ²]		10,045 [m ²]		0,85 [m]

Es importante tener en cuenta que la menor distancia entre los centros de los tubos para arreglos triangulares requiere un espaciado mínimo 1,25 veces el diámetro externo de los tubos según las normas TEMA (Standar of the Tubular Exchangers Manufactures Association)

Una vez obtenido la cantidad de tubos que se pretende utilizar en el intercambiador de calor, se procede a calcular la eficiencia de este, basándonos en las siguientes tablas.

Primero se debe calcular el flujo masico de gases de combustión que pasa por el intercambiador de calor, esto se puede conseguir haciendo un balance de masas dentro de la cámara de combustión.

Tabla 20. Cálculo del flujo masico de los gases de combustión

Cálculo del flujo de masa de gases			
Balance de masa			
$m_{gases} = m_c + m_{aire\ llama}$			
Cálculo de la masa de aire de llama en Kg/h			
$m_{aire\ llama} = Vol_{aire\ llama} * den_{aire@20^\circ C}$			
$Vol_{aire\ llama}$	414,13 $\left[\frac{m^3}{h}\right]$	$den_{aire@20^\circ C}$	1,204 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
Masa de aire en kg/h		Masa del cuesco en Kg/h	
$m_{aire\ llama} = 498,61 \left[\frac{Kg}{h}\right]$		$m_c = 54 \left[\frac{Kg}{h}\right]$	
Masa de gases en Kg/h		Masa de gases en Kg/s	
$m_{gases} = 552,61 \left[\frac{Kg}{h}\right]$		$m_{gases} = 0,15 \left[\frac{Kg}{s}\right]$	

Ya obtenido el flujo masico de gases, se continua con el cálculo del poder calorífico (Cp) de los mismos. Para este cálculo se debe tener en cuenta las propiedades del aire, las cuales dependen exclusivamente de la temperatura en la que se encuentra (Tabla 21).

Estas propiedades se obtuvieron de la tabla termodinámica de Cengel “Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes (aire)”.⁴⁷

Tabla 21. Propiedad (Cp) del aire a 1 atmosfera de presión

Propiedad del aire			
$T_{ambiente}$	20°C	$Cp@20^\circ C$	1004,76 [J/Kg °C]
T_{gases}	800°C	$Cp@800^\circ C$	1153 [J/Kg °C]

Posteriormente se procede a calcular el poder calorífico (Cp) de los gases y el poder calorífico (Cp) del aire que circula por los tubos del intercambiador de calor. Con esto se puede determinar el Cp mínimo entre los dos.

⁴⁷ CENGEL Yanus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, 8va edición. Mc Graw-Hill, 2015. p. 910.

Tabla 22. Cálculo del Cp de los gases de combustión

Cálculo del poder calorífico de los gases	
$Cp_{gases} = m_{gases_{Kg/s}} * Cp_{@800^{\circ}C}$	
Cp_{gases}	
$Cp_{gases} = 172,95 \left[\frac{J}{s^{\circ}C} \right]$	

4.4.2 Determinación del blower de aire caliente. Para el cálculo del poder calorífico del aire ambiente que circula por los tubos, se debe calcular el flujo volumétrico total de aire que el ventilador emite al galpón, para esto se realiza una relación de revoluciones por minuto, teniendo en cuenta que para un generador de calor para guantes de caucho con palma africana se utiliza un blower centrifugo de 1465 rpm, el cual arroja 3864 m³/h de aire caliente.⁴⁸

Tabla 23. Cálculo del flujo volumétrico del ventilador al galpón

Cálculo del flujo volumetrico de aire al galpón			
$\frac{Vol_{total}}{Rpm_{vent_{galpon}}} = \frac{Vol_{ref}}{Rpm_{vent_{ref}}}$			
Flujo volumetrico de referencia	Vol_{ref}	3864	$\left[\frac{m^3}{h} \right]$
Revoluciones por minuto de ref.	$Rpm_{vent_{ref}}$	1465	rpm
Revoluciones por minuto ventilador galpon	$Rpm_{vent_{galpon}}$	1735	rpm
Flujo volumetrico ventilador galpón [m3/h]	$Vol_{total_{m3/h}}$	4576,14	$\left[\frac{m^3}{h} \right]$
Flujo volumetrico ventilador galpón [m3/s]	$Vol_{total_{m3/s}}$	1,27	$\left[\frac{m^3}{s} \right]$

⁴⁸ CÉLLERI, Diego Iván. Diseño y construcción de un generador de aire caliente con residuos de palma africana. Tesis de grado Ingeniero Químico. Quito: Universidad San Francisco de Quito Politécnico. Facultad de fisicoquímicas, Septiembre 2008. p. 29.

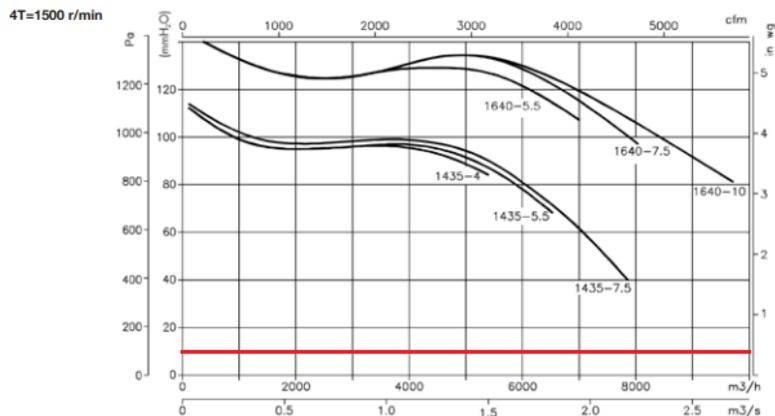
El dato de las revoluciones del ventilador para el galpón se obtuvo de la ficha técnica del blower centrífugo que se encontró en el catálogo QuickFan, el cual aporta las especificaciones técnicas del equipo que se debe determinar para el generador de calor.⁴⁹

Figura 42. Selección del ventilador centrífugo de aire caliente

Características técnicas

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible (A)			Potencia instalada (kW)	Caudal máximo m ³ /h	Nivel presión sonora dB (A)	Peso aprox. (Kg)	According ERP
		230V	400V	690V					
CMP-620-4M	1380	1,03			0,12	810	61	8	Excluded
CMP-718-2T IE3	2825	2,80	1,62		0,75	1485	70	18	2015
CMP-718-2M	2810	4,50			0,75	1485	70	13	2015
CMP-718-4T	1350	1,66	0,96		0,25	1280	63	10	2015
CMP-718-4M	1370	2,00			0,25	1280	63	10	2015
CMP-820-2T IE3	2830	4,03	2,34		1,10	1950	73	16	2015
CMP-820-2M	2820	6,51			1,10	1950	73	16	2015
CMP-820-4T	1350	1,66	0,96		0,25	1670	66	10	2015
CMP-820-4M	1370	2,00			0,25	1670	66	10	2015
CMP-922-2T-1.5 IE3	2830	4,03	2,34		1,10	1650	70	21	2015
CMP-922-2T-2 IE3	2875	5,34	3,07		1,50	2010	71	27	2015
CMP-922-2T-3 IE3	2910	7,32	4,21		2,20	2630	74	30	2015
CMP-922-4T	1380	2,92	1,69		0,55	2450	66	19	2015
CMP-1025-2T-3 IE3	2910	7,32	4,21		2,20	2100	73	33	2015
CMP-1025-2T-4 IE3	2910	10,00	5,77		3,00	2830	77	41	2015
CMP-1025-4T IE3	1455	4,07	2,34		1,10	3400	70	43	2015
CMP-1128-2T-4 IE3	2910	10,00	5,77		3,00	2220	77	45	2015
CMP-1128-2T-5.5 IE3	2900	13,00	7,50		4,00	3210	81	56	2015
CMP-1128-4T IE3	1435	7,93	4,56		2,20	4500	74	40	2015
CMP-1128-6T IE3	940	3,36	1,93		0,75	3300	60	32	2015
CMP-1231-4T-3 IE3	1435	7,93	4,56		2,20	4740	73	48	2015
CMP-1231-4T-4 IE3	1440	10,70	6,15		3,00	5910	75	54	2015
CMP-1231-4T-5.5 IE3	1450	13,90	8,00		4,00	6850	77	58	2015
CMP-1231-6T IE3	950	6,43	3,70		1,50	5115	64	53	2015
CMP-1435-4T-4 IE3	1448	10,70	6,15		3,00	5560	76	59	2015
CMP-1435-4T-5.5 IE3	1450	13,90	8,00		4,00	6360	78	64	2015
CMP-1435-4T-7.5 IE3	1465	10,30	5,97		5,50	7210	80	99	2015
CMP-1435-6T IE3	950	9,08	5,22		2,20	6400	66	63	2015
CMP-1640-4T-5.5 IE3	1450	13,90	8,00		4,00	7000	77	81	2015
CMP-1640-4T-7.5 IE3	1465	10,30	5,97		5,50	8035	80	116	2015
CMP-1640-4T-10 IE3	1465	13,90	8,06		7,50	9710	82	120	2015
CMP-1640-6T IE3	950	9,08	5,22		2,20	8100	71	80	2015
CMP-1845-4T-7.5 IE3	1465	10,30	5,97		5,50	8000	82	117	2015
CMP-1845-4T-10 IE3	1465	13,90	8,06		7,50	10000	85	121	2015
CMP-1845-6T IE3	950	9,08	5,22		2,20	7500	77	88	2015
CMP-2050-4T-10 IE3	1465	13,90	8,06		7,50	9000	83	150	2015
CMP-2050-4T-15 IE3	1470	20,90	12,10		11,00	12525	87	178	2015
CMP-2050-4T-20 IE3	1465	27,90	16,20		15,00	16500	89	189	2015
CMP-2050-6T IE3	960	15,60	8,99		4,00	11000	79	144	2015
CMP-2563-6T IE3	975	28,20	16,30		15,00	21000	86	300	2015

Figura 43. Curva característica del ventilador centrífugo de aire caliente



En esta ocasión el ventilador escogido (1435-4) cumple con la cantidad necesaria de caudal al interior del galpón, ya que las pérdidas son tan pequeñas que no influyen en el funcionamiento del ventilador.

⁴⁹ SODECA. Ventiladores centrífugos y extractores en línea para conductos. ventiladores centrífugos de media presión y simple aspiración. Barcelona: amca editions, 1983. p.181

4.4.3 Efectividad del intercambiador de calor. Luego de obtener el flujo volumétrico que aporta el ventilador al galpón, se divide dicha cantidad en el número de tubos del intercambiador de calor y se logra obtener el flujo volumétrico de un tubo.

Posteriormente se procede a calcular el poder calorífico (Cp) del aire que pasa por los tubos del intercambiador, de acuerdo con el flujo masico de aire que aporta el blower al galpón.

Tabla 24. Cálculo del Cp del aire ambiente que pasa por los tubos

Cálculo del poder calorifico del aire ambiente que pasa por los tubos			
$Cp_{amb_{tubos}} = m_{amb_{Kg/s}} * Cp_{@20^{\circ}C}$			
Cálculo de la masa de aire ambiente en Kg/s			
$m_{amb_{Kg/s}} = Vol_{tubo} * den_{@20^{\circ}C}$			
Cálculo del flujo volumetrico de un tubo			
$Vol_{tubo} = \frac{Vol_{total_{m^3/s}}}{Nt}$			
$Vol_{total_{m^3/s}}$	1,27 $[\frac{m^3}{s}]$	Nt	35
Flujo volumetrico de un tubo		Flujo masico de aire ambiente de un tubo	
$Vol_{tubo} = 0,036 [\frac{m^3}{s}]$		$m_{amb_{Kg/s}} = 0,043 [\frac{Kg}{s}]$	
$Cp_{amb_{tubos}}$			
$Cp_{amb_{tubos}} = 43,205 [\frac{J}{s^{\circ}C}]$			

Se deduce que el valor de Cp mínimo es el del aire ambiente que pasa por los tubos, el cual se utilizará para el cálculo de la efectividad del intercambiador de calor.

Tabla 25. Efectividad del intercambiador de calor

Efectividad del intercambiador de calor			
$\varepsilon = \frac{Q_{conv}}{Q_{max}}$			
Potencia maxima del intercambiador Q_{max}			
$Q_{max} = C_{min} * (T_{gases} - T_{ambiente})$			
$Cp_{min} = Cp_{amb tubo}$		$C_{amb tubo} = 43,205 \left[\frac{J}{s * ^\circ C} \right]$	
Q_{max}	33700 [w]	Q_{conv}	28823,75 [W]
Efectividad (ε)			
$\varepsilon = 0,85 = 85\%$			

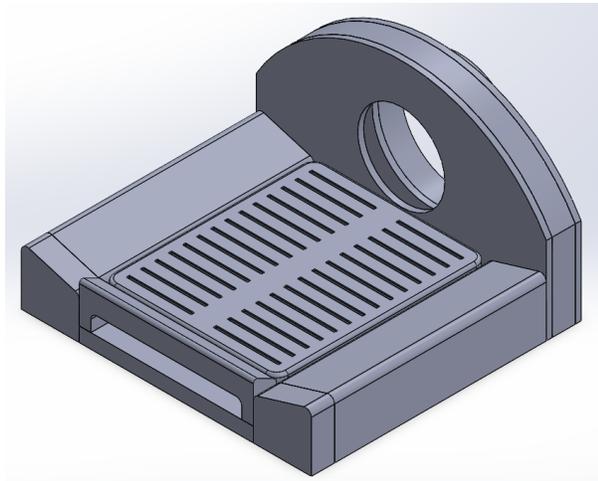
Después de obtener la efectividad del intercambiador de calor (85%), se concluye que este valor es adecuado para la cantidad de tubos que se incorporan al intercambiador de calor, ya que por costos no es posible agregarle más tubos al sistema.

4.5 DISEÑO FINAL DEL EQUIPO (CAD)

Finalmente es posible presentar un diseño asistido por el software SOLIDWORKS, mostrando cada subsistema del generador de calor a base de cascarilla de palma africana. El cual será entregado a la empresa INDARS S.A.S. debido a que tienen la responsabilidad de la construcción del generador de calor.

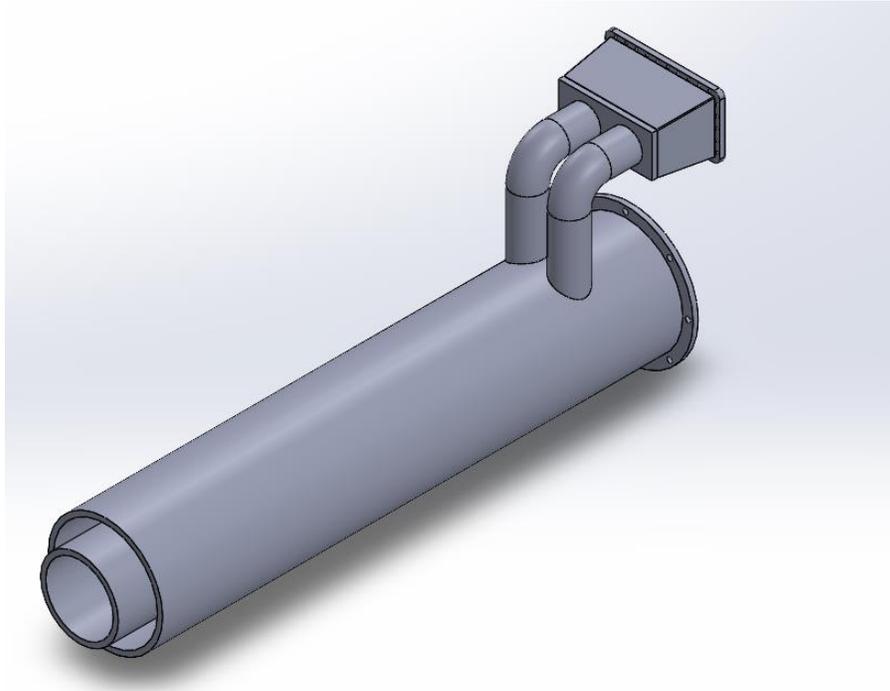
4.5.1 Parrilla y bazuca de aire.

Figura 44. Parrilla



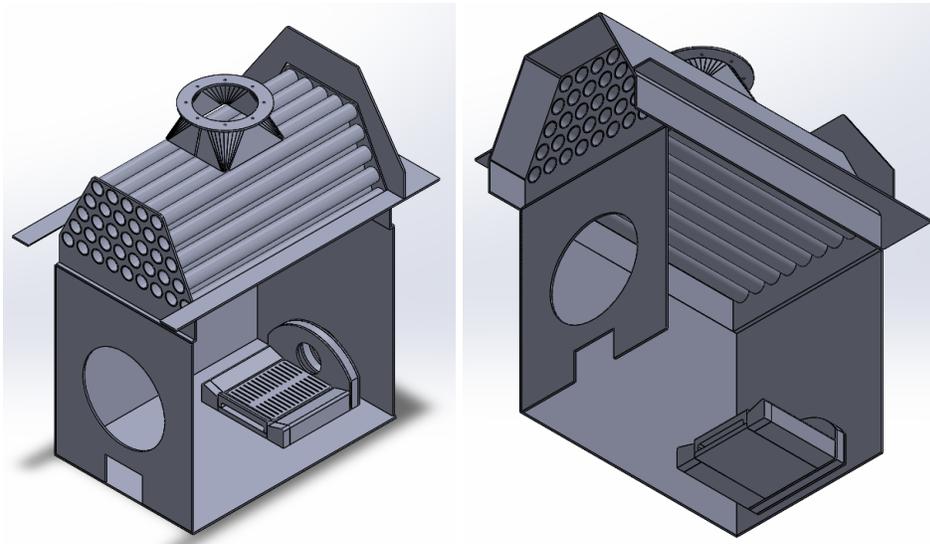
Se diseñó la parrilla con aberturas rectangulares debido que estas no tendrían inconvenientes en la granulometría de la cascarilla triturada, además se le adapta una altura respecto a la base de la cámara de combustión, con el fin de poder retirar las cenizas no necesarias en la combustión. Adicionalmente permite la alimentación de aire de combustión de los conductos inferiores proveniente de una bazuca alimentada por el ventilador de combustión la cual contiene una válvula mariposa para el control de aire.

Figura 45. Bazuca de aire



4.5.2 Cámara de combustión.

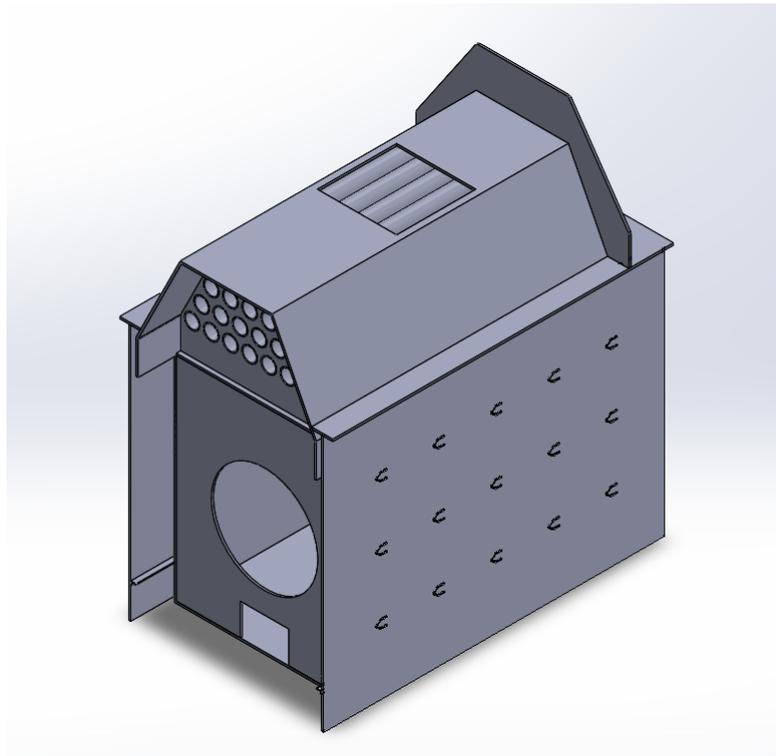
Figura 46. Cámara de combustión



Para el diseño de la cámara de combustión se inició estableciendo un área que permita la extracción de cenizas como también el acceso al interior de la cámara para el mantenimiento. Además, aporta la distribución de calor hacia los tubos del calefactor con el objetivo de hacer el intercambio de calor con el aire que va dirigido hacia el galpón. Como factor de seguridad se sobredimensiono las áreas calculadas anteriormente de manera que no afectaran los costos en la producción y de mantener un diseño funcional.

Finalmente se hace uso de dos laminas aleteadas laterales disipadoras de calor, para controlar las pérdidas y la transferencia de calor en las paredes del equipo, las cuales están ubicadas entre la cara externa de la cámara de combustión y la placa externa del calefactor.

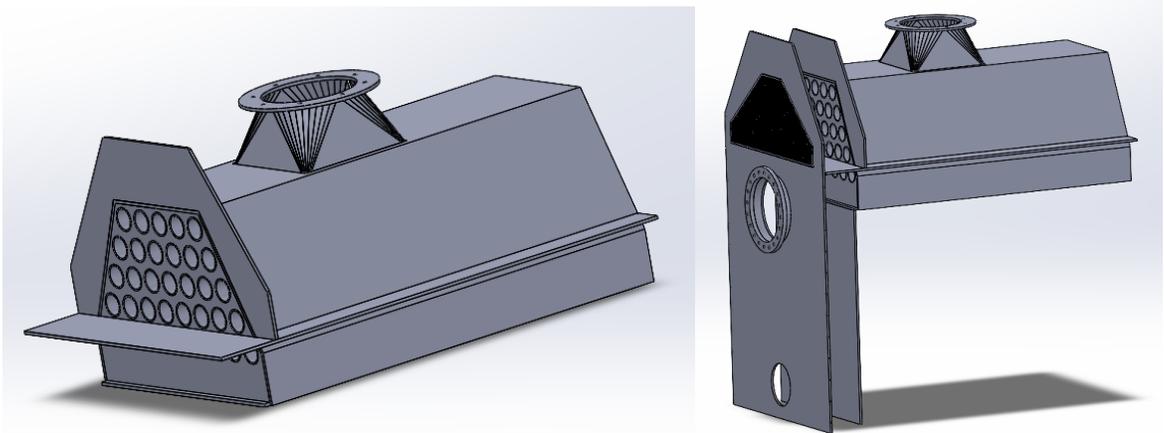
Figura 47. Laminas disipadoras de calor



4.5.3 Intercambiador de calor. Para el sistema de cámara de combustión - intercambiador de calor se basó en el diseño de un generador de calor brasilero de la empresa TERMOAVES.

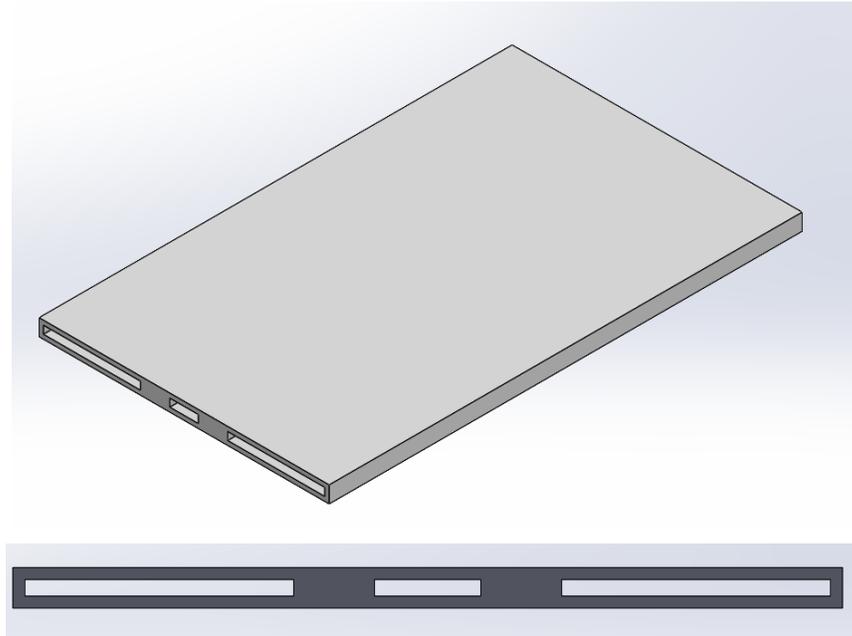
El arreglo de tubos es de forma piramidal con el fin de disminuir costos de producción y el aprovechamiento del área efectiva de la transferencia de calor, además cuenta con una salida de chimenea para los gases residuales de la combustión. Finalmente se instala un filtro (malla) para evitar que las impurezas del ambiente ingresen al sistema por la parte posterior del arreglo de tubos, los cuales tienen como función la succión del aire ambiente generada por un ventilador centrífugo, instalado en la parte trasera del generador de calor y cuyo propósito es extraer dicho aire para ser distribuido dentro del galpón.

Figura 48. Intercambiador de calor



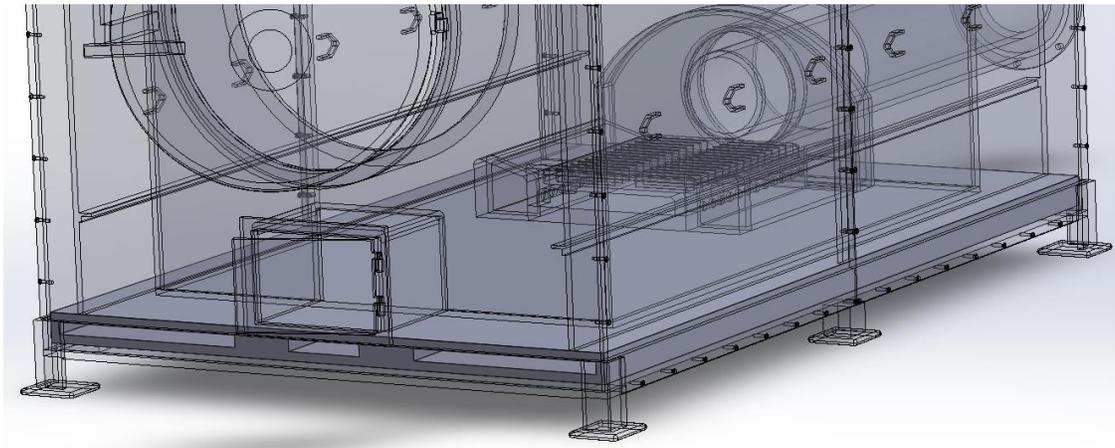
4.5.4 Base para la cámara de combustión. Durante el diseño de la cámara de combustión se vio la necesidad de incorporar una base lo suficientemente resistente para aguantar el peso de esta, e inclusive capaz de soportar a una persona dentro de ella para posibles mantenimientos.

Figura 49. Base para la cámara de combustión.



Por otra parte, la base para la cámara de combustión está diseñada de esta forma en particular por motivos económicos y por facilidad de ensamble.

Figura 50. Ensamble calefactor, base para la cámara de combustión.



4.5.5 Bastidor

En el diseño del bastidor se tuvo en cuenta la facilidad del ensamblaje para posibles mejoras futuras, como la implementación de refractarios, es por esto por lo que las placas laterales son apernadas para su sencillo montaje.

Adicionalmente en la parte superior tiene dos conexiones para gancho de sujeción para su fácil transporte, por último, la base es una base angular que se eleva en 6 puntos de apoyo permitiendo la circulación de aire ambiente por esta y que pueda ser manipulado para elevación por medio de una carretilla elevadora.

Figura 51. Carcaza del generador de aire caliente

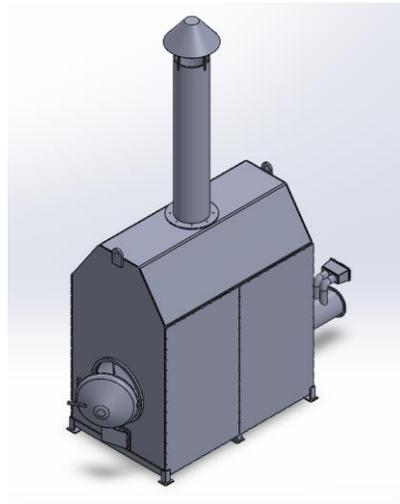
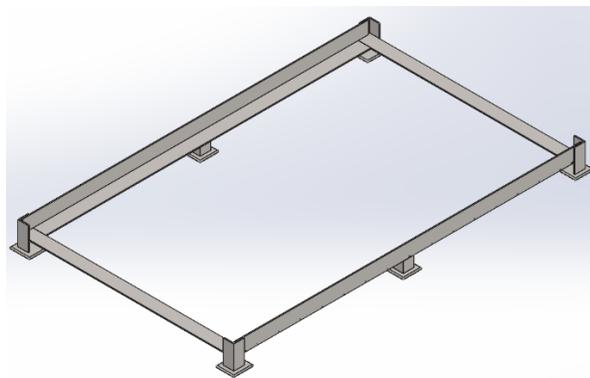
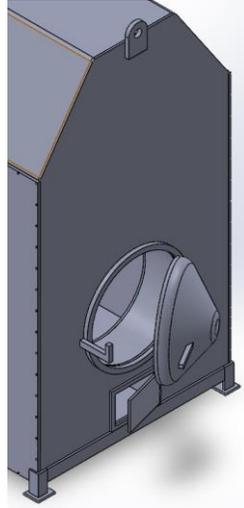


Figura 52. Base angular



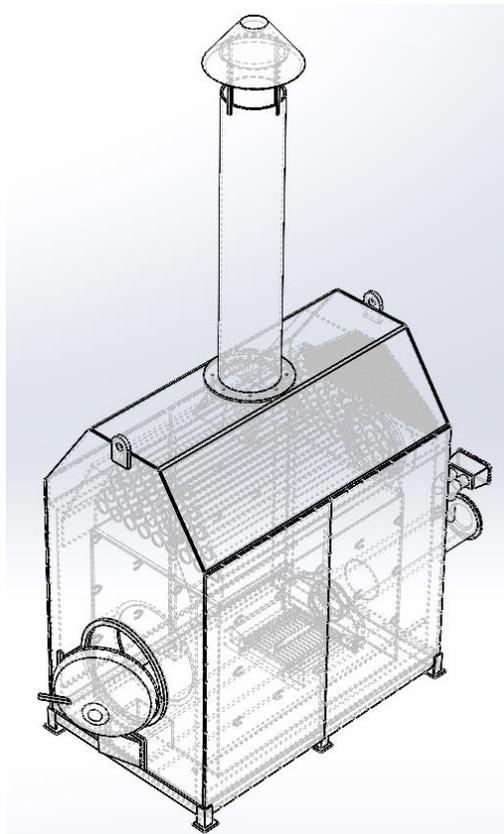
Para finalizar, el diseño de la puerta es basado de los hornos industriales los cuales permiten la manipulación de un operario y son sellados por medio de un cerrojo, al igual que la puerta de extracción de cenizas.

Figura 53. Puerta del generador de aire caliente



4.5.6 Generador de aire caliente. Una vez obtenido el diseño de los sistemas que componen el generador de aire caliente, se lleva a cabo el ensamble de estos para adquirir el diseño completo del equipo.

Figura 54. Generador de aire caliente



El generador de aire caliente esta desarrollado para mantener una temperatura adecuada para las galponeras avícolas, donde el proceso de combustión se desarrolla en una cámara que posibilita el acceso de cascarilla de palma africana triturada por la parte inferior hacia una parrilla interna. Esta operación permite que el aire interior de la cámara de combustión se caliente a una elevada temperatura, proporcionando el calor suficiente para calentar el aire que pasa por los tubos del intercambiador de calor hacia el interior del galpón.

Este diseño está orientado para funcionar en el sector avícola de la región de Santander, por este motivo se presenta un desarrollo económico y práctico capaz de contribuir a esta industria.

4.6 ANÁLISIS ESTÁTICO Y TÉRMICO (CAE)

Para la evaluación estructural y térmica fue de gran utilidad el software SolidWorks, el cual presenta las deformaciones máximas presentes en el generador de calor durante su operación, del mismo modo se somete el equipo a 2 cargas térmicas (radiación y convección).

4.6.1 Análisis estático. Para el desarrollo de la simulación, fue requerido definir el material a cada componente con el objetivo de que el programa, por medio de las densidades del material calcule el peso total del equipo según los materiales seleccionados, para este caso, uno de los materiales principales en el calefactor es el acero al carbono ASTM A-36, ya que es un material adecuado para este tipo de aplicaciones y es uno de los materiales que más maneja la empresa.

Figura 55. Propiedades mecánicas acero ASTM A-36

Propiedades Mecánicas		Notas
Resistencia a la tracción, MPa (ksi)	400-550 (58-80)	Placas de acero, formas y barras
Limite elastico (Esfuerzo de fluencia), MPa (ksi), \geq	250 (36)	Espesor \leq 200mm (8 pulg.)
	220 (32)	Espesor de placas de acero > 200mm (8 pulg.)
Elongación, %, \geq	20	Placas y barras en 200 mm (8 pulg.)
	23	Placas y barras en 50 mm (2 pulg.)
Dureza Brinell, HBW	119-162	Basado en la conversión de resistencia a la tracción
Módulo de elasticidad, GPa (ksi)	200 (29×10^3)	–
Prueba de impacto Charpy con muesca en V, J (ft-lbf), \geq	27 (20)	Formas estructurales, ubicación alternativa del núcleo
Módulo de corte, GPa (ksi)	79.3 (11.5×10^3)	–
Fy del acero A36 (Limite de fluencia), MPa (ksi), \geq	250 (36)	–

Fuente: <<https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/>>.

En la ejecución del ensayo se somete la base de la cámara de combustión y la parrilla a una carga distribuida de 65 Kg, simulando la carga máxima de cascarilla de 52 Kg/h obtenida en los cálculos y el peso que ejerce la chimenea, esto con el fin de observar las deformaciones presentes en el generador.

Figura 56. Análisis de desplazamientos elaborado en SolidWorks

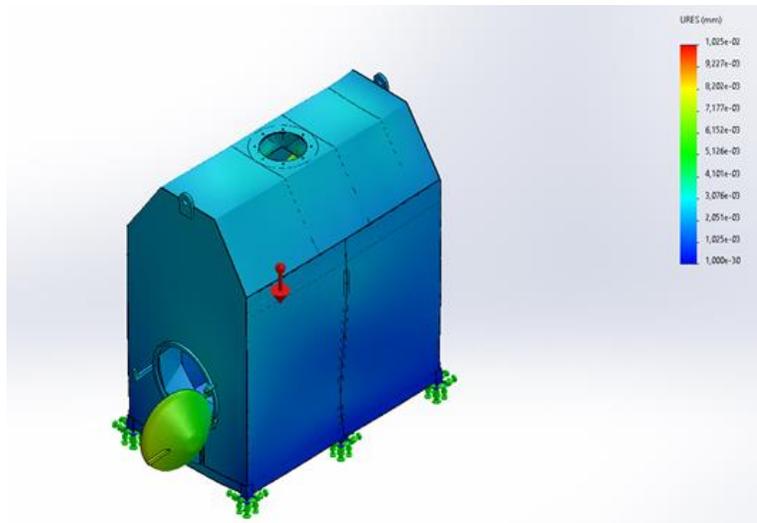
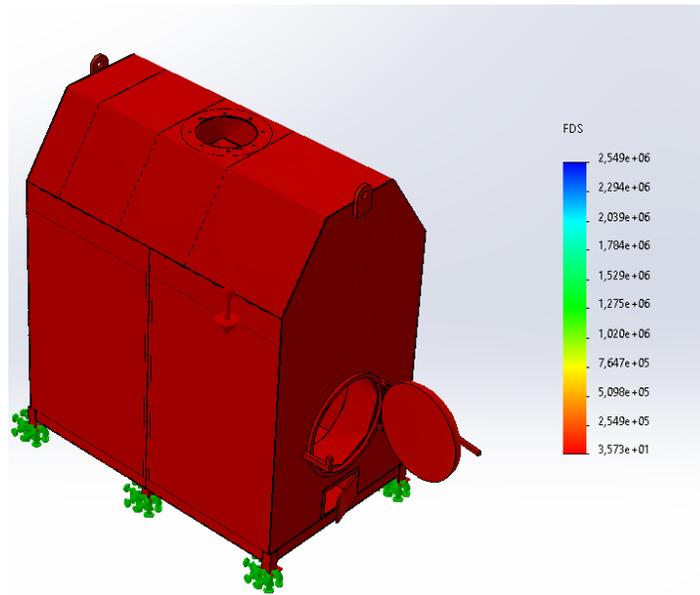


Figura 57. Factor de seguridad elaborado en SolidWorks



Una vez llevado a cabo la simulación, se pudo observar en el análisis que el desplazamiento máximo ($0.01 \text{ [mm]} < \text{diámetro de un cabello } (0.05 \text{ [mm]})$) se desarrolla en la punta de la puerta y en las bases del calefactor, confirmando su estabilidad y posibilitando efectuar el mantenimiento interno a la máquina. Esto se puede comprobar con el factor de seguridad obtenido en la simulación que es de 30.5, esto quiere decir, que el diseño del calefactor cumple con los requisitos.

En este orden de ideas se recomienda en la construcción asegurarse que la puerta del calefactor este correctamente ajustada.

4.6.2 Análisis térmico. Posteriormente de haber realizado el análisis estructural se procede con el térmico, teniendo en cuenta que el calefactor estará sometido en este estudio a 2 cargas térmicas, una carga de radiación, la cual simulará la energía generada por la llama de la combustión con temperaturas de alrededor de los 800 y 1200 [K], y una carga de convección natural, la cual es generada por el ambiente por la temperatura promedio en Bucaramanga (300 K (25°C)) para este estudio en particular.

Figura 58. Análisis térmico elaborado por SolidWorks.

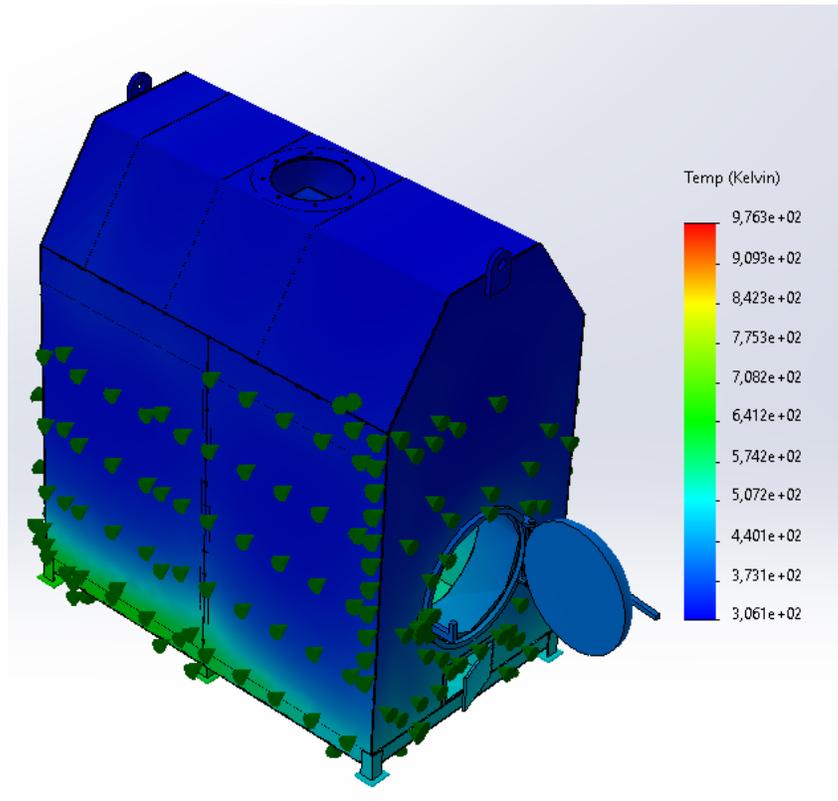


Figura 59. Vista parrilla del análisis térmico.

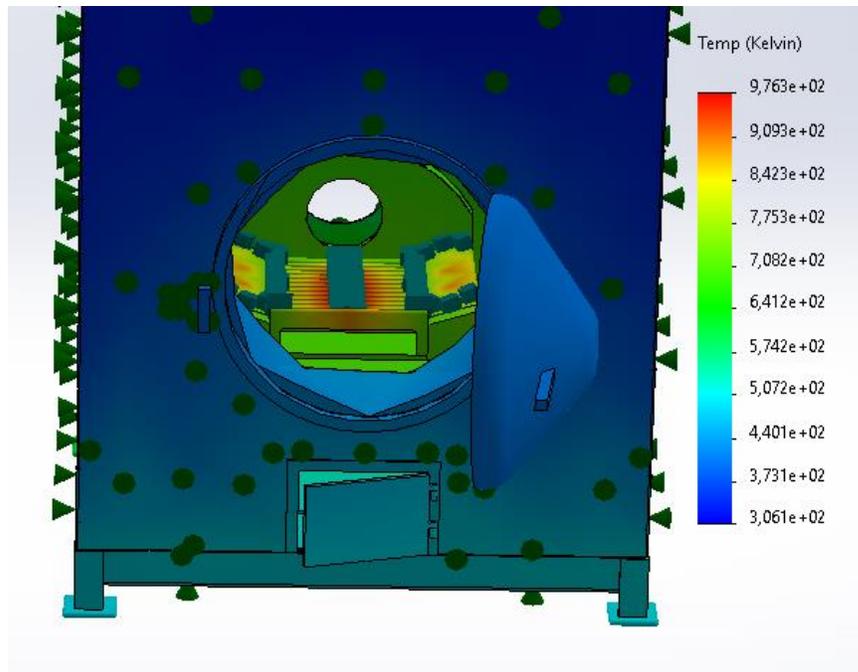
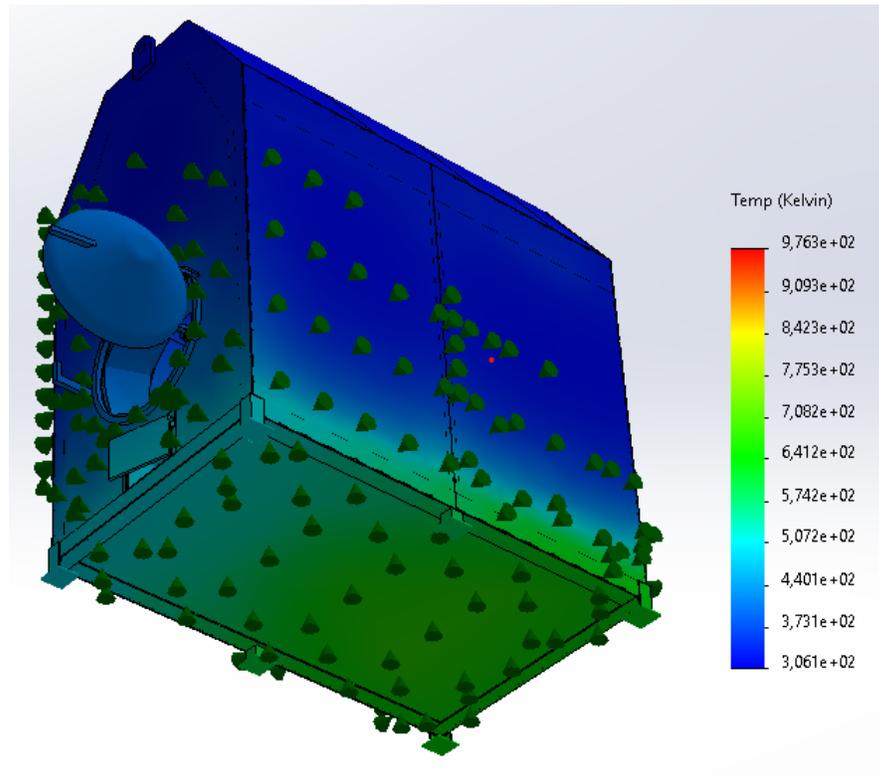


Figura 60. Vista base caldera del análisis térmico.



Seguidamente de la ejecución del estudio, es posible observar que la mayor temperatura presente en las placas del calefactor se encuentra en las láminas inferiores, demostrando que en las placas laterales no se presentan temperaturas muy altas, además en operación el equipo no debe estar encerrado, ya que el aire ambiente contribuye con la temperatura exterior del calefactor.

En este orden de ideas, el calefactor solo debe estar protegido de la radiación solar, ya que para este diseño no se tuvo en cuenta la radiación generada por el sol al equipo.

Ver los planos en detalle, en el Anexo D.

5. PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL GENERADOR DE CALOR.

Los encargados de la construcción del generador de calor, es la empresa INDARS S.A.S la cual es una empresa especialista en diseño, fabricación y montaje de maquinaria avícola y agrícola, así mismo cuenta con maquinaria para la construcción en el área de la metalmecánica, como lo son cortadoras de plasma CNC, tornos, fresadoras, limadoras, Prensa hidráulica, troqueladoras, entre otras.

Figura 61. Cortadora punzadora múltiple Durma



Figura 62. Cortadora Durma CN de lámina



Figura 63. Cilindradora



Figura 64. Dobladora Durma CN



Figura 65. Mesa de corte plasma CNC

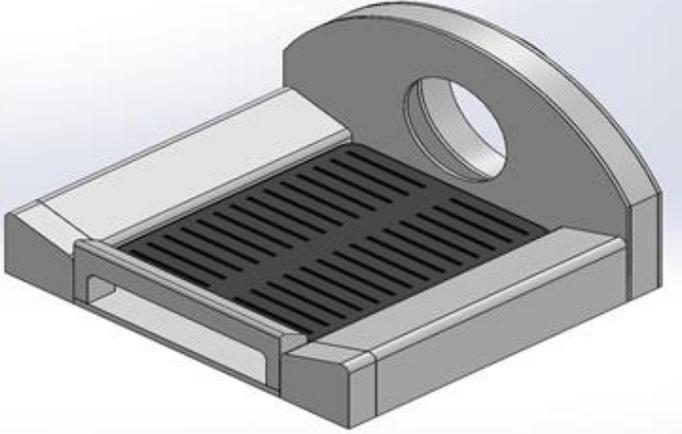
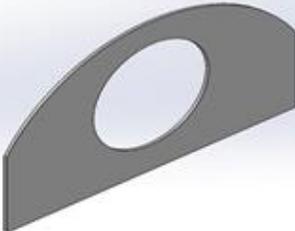
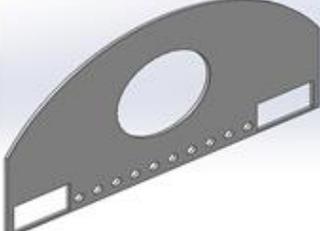
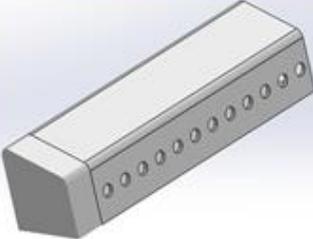
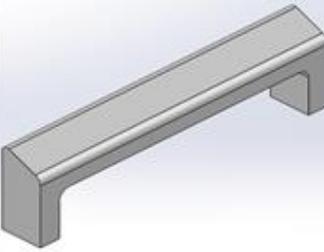
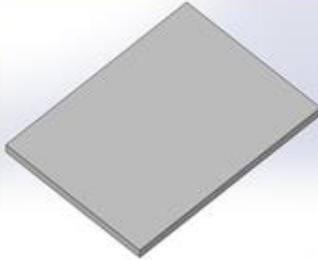


Por esta razón se presentan los procesos de fabricación de los elementos del generador de calor, con el fin de proveer el instructivo necesario para ejecutar la construcción de cada elemento que compone el generador de calor.

5.1 CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

- Parrilla.

Tabla 26. Ficha de fabricación parrilla

Ficha de fabricación parrilla		Parrilla
		
		Metodología <ol style="list-style-type: none"> 1) Elaboración del molde 2) Fundición de la parrilla 3) Desmoldado 4) Pulido 5) Limpieza
Acceso cascarilla	Acceso parrilla	Aro entrada cascarilla
		
Metodología <ol style="list-style-type: none"> 1) Corte de Lamina Principal 2) Corte en semicírculo en parte superior 3) Corte circular 	Metodología <ol style="list-style-type: none"> 1) Corte de Lamina Principal 2) Corte en semicírculo en parte superior 3) Corte circular 4) Corte Rectangular 5) Taladrado 	Metodología <ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Pulido
Barras laterales parrilla	Tapón frontal parrilla	Base parrilla
		
Metodología <ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Taladrado 5) Pulido 	Metodología <ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Taladrado 5) Pulido 	Metodología <ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Taladrado 5) Pulido

- Bazuca de aire.

Tabla 27. Ficha de fabricación Bazuca de aire

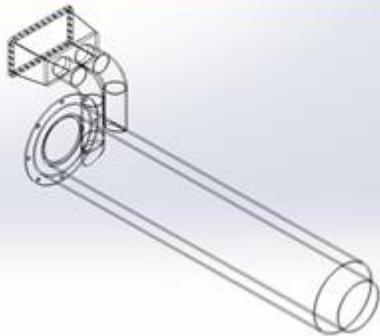
Bazuca de aire	
	
Metodología	
1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Taladrado 5) Pulido 6) Pintura 7) Limpieza	

Tabla 28. Ficha de fabricación laminas laterales del generador de calor

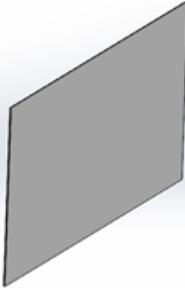
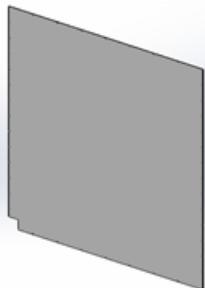
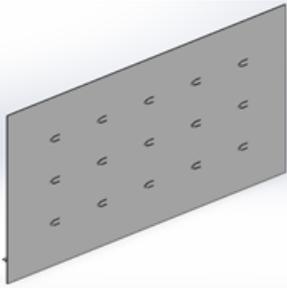
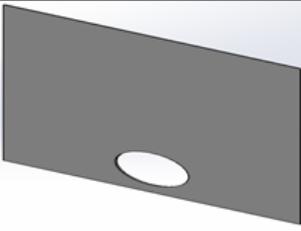
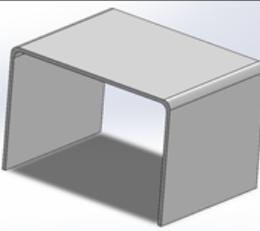
Laminas cámara de combustión	Laminas externas calefactor	Laminas aleteadas intermedias
		
Metodología	Metodología	Metodología
1) Corte 2) Pulido 3) Limpieza	1) Corte 2) Taladrado 3) Pulido 4) Limpieza	1) Corte 2) Soldadura 3) Pulido 4) Limpieza

Tabla 29. Ficha de fabricación laminas internas frontal y trasera de cámara de combustión y túnel de extracción de cenizas

Lamina interna frontal cámara de combustión	Lamina trasera interna de cámara de combustión	Túnel de extracción de ceniza
		
Metodología	Metodología	Metodología
1) Corte 2) Pulido 3) Limpieza	1) Corte 2) Pulido 3) Limpieza	1) Corte 2) Doblado 3) Pulido 4) Limpieza

5.2 INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Tabla 30. Ficha fabricación apoyos y arreglo de tubos

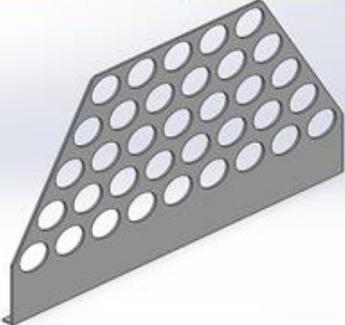
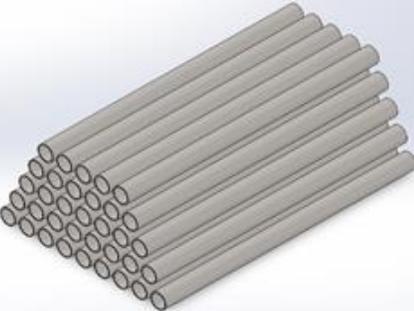
Apoyos arreglo de tubos	Arreglo de tubos
	
Metodología	Metodología
1) Trazado de matriz 2) Corte 3) Doblado 4) Pulido 5) Limpieza	1) Corte 2) Limpieza

Tabla 31. Ficha de fabricación de láminas separadoras de intercambiador calor

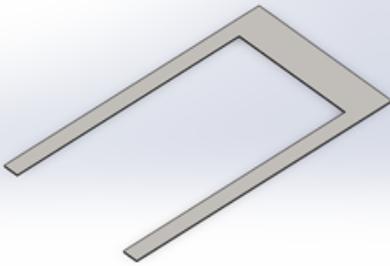
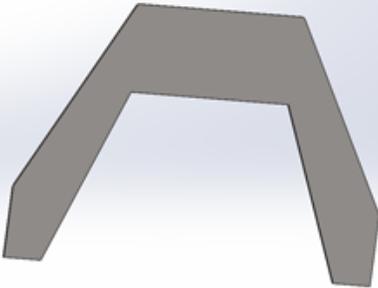
Lamina base separadora	Lamina separadora vertical
	
Metodología	Metodología
<p>1) Corte 2) Pulido 3) Limpieza</p>	<p>1) Corte 2) Pulido 3) Limpieza</p>

Tabla 32. Ficha de fabricación de carcasa interna y externa de tubos

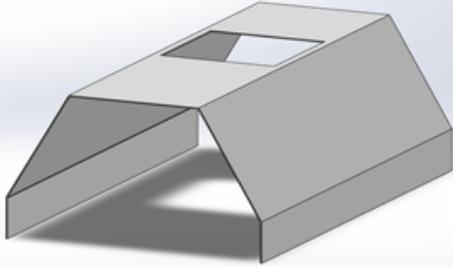
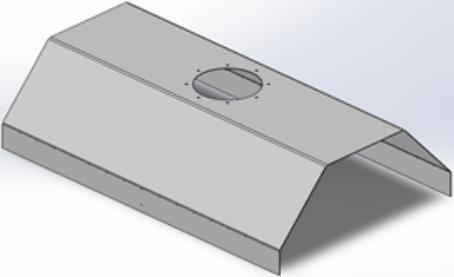
Carcasa interna de tubos	Carcasa externa de tubos
	
Metodología	Metodología
<p>1) Corte 2) Doblado 3) Pulido 4) Limpieza</p>	<p>1) Corte 2) Doblado 3) Taladrado 4) Pulido 5) Limpieza</p>

Tabla 33. Ficha de fabricación laminas externas frontal y trasera de cámara de combustión

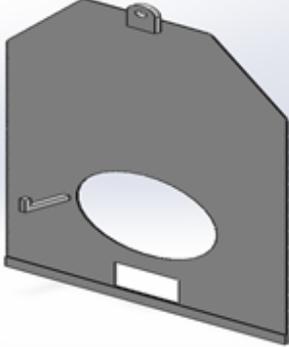
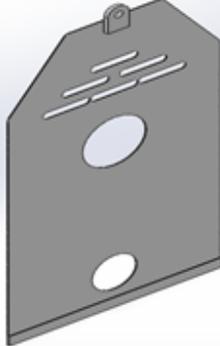
Placa frontal externa del generador	Placa trasera externa del generador
	
Metodología	Metodología
<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Pulido 5) Pintado 5) Limpieza 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Pulido 5) Pintado 5) Limpieza

Tabla 34. Ficha de fabricación bridas, bases y puertas del generador de calor

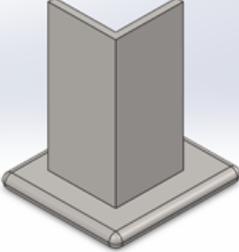
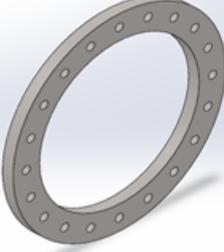
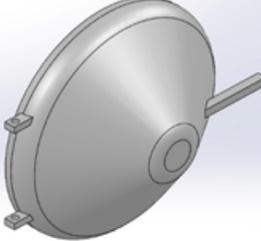
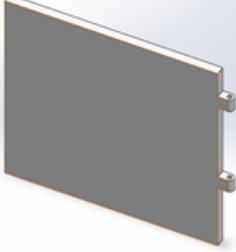
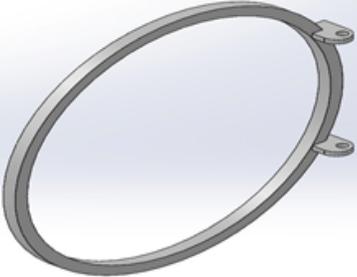
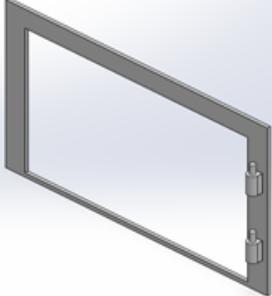
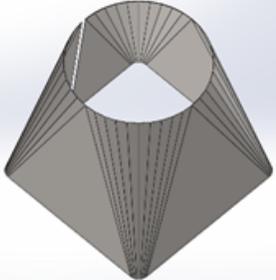
Bases Calefactor	Bridas	Puerta principal	Puerta extraccion de cenizas
			
Metodología	Metodología	Metodología	Metodología
<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Soldadura 3) Pulido 4) Pintura 5) Limpieza 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Taladrado 3) Pulido 4) Limpieza 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Taladrado 5) Pulido 6) Pintura 7) Limpieza 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Soldadura 3) Taladrado 4) Pulido 5) Limpieza

Tabla 35. Ficha de fabricación de bisagras y entrada de chimenea

Bisagra puerta circular	Bisagra puerta de cenizas	Entrada de chimenea
		
Metodología	Metodología	Metodología
<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Taladrado 4) Soldadura 5) Pulido 6) Limpieza 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Fresado 3) Soldadura 4) Pulido 5) Limpieza 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Corte 2) Doblado 3) Soldadura 4) Pulido 5) Limpieza

6. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO

6.1 VERIFICACIONES PRELIMINARES DE FUNCIONAMIENTO.

Una vez construido el calefactor, las primeras pruebas que se realizaron fueron la verificación del trabajo de todos los componentes como ventiladores, motores y todos los elementos comprendidos en el sistema, posteriormente se llevó a cabo la prueba de humo, en la cual con una antorcha se verifica la absorción de aire del ventilador de combustión y los tubos traseros del intercambiador de calor. Además, se verifico la salida de aire que se dirige al galpón, todo esto se hace sin iniciar la llama de combustión.

Figura 66. Prueba de humo ventilador de combustión



Figura 67. Prueba de humo tubos traseros



Figura 68. Prueba salida de aire ventilador de aire caliente



Por medio de un sistema de medición de temperatura proporcionado por la empresa, el cual consta de una termocupla, conectada a un tablero digital para obtener el control de la temperatura de salida del calefactor. Para la verificación y calibración de la termocupla se procede a hacer mediciones a recipientes con agua con hielo y un recipiente con una resistencia térmica y agua, para efectuar el control de la temperatura de salida del generador de calor.

Figura 69. Sistema de medición de temperatura.



Figura 70. Prueba a termocupla con vaso con agua y hielo



Por otro lado, la empresa también proporciono un termómetro infrarrojo y un anemómetro, con los cuales se realizó el control de temperatura de la chimenea, paredes del calefactor, motores y al caudal de salida de aire al galpón. Al mismo tiempo, con ayuda del anemómetro se midió el caudal de aire que llega a la parrilla y el que genera el ventilador que entrega al galpón. Finalmente se procedió a llenar la parrilla con el cuesco triturado proveniente de la tolva y transportado por el tornillo sin fin corona, durante 5 minutos se dejó llenar la parrilla de cuesco, el cual es pesado en una balanza digital, con la finalidad de hacer el encendido de la llama, la cual es generada por un operario con una antorcha y unas gotas de combustible, a su vez el ventilador de combustión abastece la llama.

Figura 71. Llenado de cascarilla



Figura 72. Pruebas de la velocidad de salida de aire, ventilador de combustión



Seguidamente se cierra la puerta del calefactor y se inicia la salida de aire, con la termocupla lista se procede a realizar el seguimiento a la temperatura de salida, una vez transcurrida la prueba se verifica la cantidad de cenizas generadas por el trabajo realizado por el generador de calor.

Figura 73. Cenizas generadas



Por último, con ayuda de los elementos de medición brindados por la empresa se generan un grupo de datos en los cuales se toma el control de la temperatura en la chimenea, la parrilla, la compuerta, la carcasa del ventilador que dirige aire caliente al galpón, variando la alimentación asistida, ya que se tiene control del tiempo que dura la alimentación y cada cuanto se puede hacer.

Figura 74. Toma de temperatura de combustión



6.2 PRUEBAS EN CAMPO.

Las pruebas se realizaron en las galponeras de la granja Rio Claro, las cuales están ubicadas en el sector 15 vía a sabana de torres En Santander - Colombia, las galponeras cuentan con el aislamiento reglamentario según técnicos de la empresa, además para extracción y flujo del aire en cada galpón tienen implementados ventiladores en la parte trasera, los cuales están automatizados para encenderse gradualmente o según sea la situación, cada galpón acoge a 30.000 pollos, estos galpones cuentan con un sistema de control de temperatura y humedad con la misión de advertir a los técnicos en caso de que exista una posible falla.

Figura 75. Galpón avícola granja Rio Claro

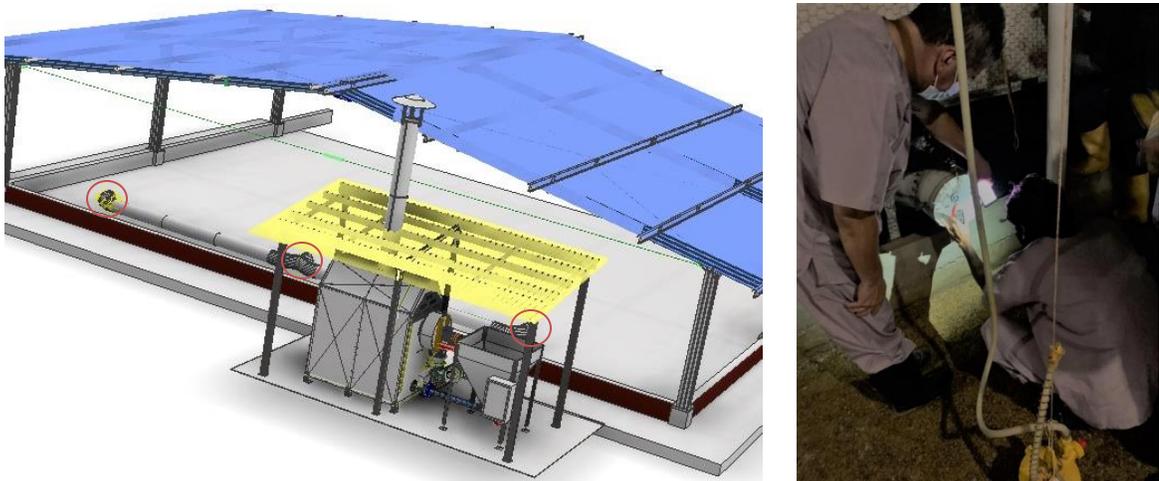


Figura 76. Ventiladores de galponeras



El generador está ubicado en la parte trasera del galpón facilitando la manipulación del cargamento de cascarilla, el cual es ubicado en el suelo junto al generador de aire caliente, de modo que el operario pueda abastecer o ejecutar un mantenimiento. Finalmente, el generador de aire caliente es conectado a tuberías metálicas para distribuir el aire en todo el galpón desde 3 puntos, se revisa la velocidad del aire generado en los puntos con ayuda del anemómetro y el control de temperatura es vigilado por los técnicos de las galponeras, con el objetivo de notificar cuando se requiera bajar la temperatura o subirla aumentando el abastecimiento del generador de calor.

Figura 77. Distribución de inyección de aire y pruebas de velocidad en galpón



6.3 RESULTADOS.

- Prueba salida de aire de parrilla con uso de anemómetro 9 de noviembre 2021.

Tabla 36. Resultados prueba de velocidad de aire parrilla

Velocidad de aire que abastece parrilla	
Prueba	Velocidad [m/s]
#1	6,3
#2	6,1
#3	5,6
#4	5,7
#5	5,8
Variando válvula de control de aire	
#6	4,6
#7	3,5
#8	4,5
#9	4,3
#10	5,5
#11	6,3
#12	5,6
#13	6

- Prueba Salida de aire de abastecimiento a galpón con uso de anemómetro 9 de noviembre 2021.

Tabla 37. Resultados prueba de velocidad de aire al galpón

Velocidad de aire que abastece a galpon	
Prueba	Velocidad [m/s]
#1	19
#2	19,8
#3	20
#4	21,2
#5	20,8
#6	20,2
#7	20
#8	20,1
#9	21,2
#10	20,2
#11	20,3

- Prueba inicial de temperatura de calefactor primeros treinta minutos.

Tabla 38. Datos primer encendido calefactor, primeros 30 minutos del encendido

Medidas calefactor primera encendida	
Hora	Temperatura de salida [°C]
11:00 a. m.	26
11:05 a. m.	26
11:15 a. m.	28
11:20 a. m.	32
11:23 a. m.	34
11:24 a. m.	36
11:25 a. m.	37
11:26 a. m.	38
11:27 a. m.	39
11:28 a. m.	40
11:29 a. m.	41
11:30 a. m.	42

- Primera prueba de calefactor con termómetro infrarrojo de uso industrial y Sistema con termocupla, 9 de noviembre de 2021.

Tabla 39. Resultados primer prueba de encendido del generador de calor

Datos con alimentación asistida en : cada minuto, 8 segundos de abastecimiento (60/8)					
Hora	Temperatura de salida [°C]	Temperatura de carcasa Ventilador [°C]	Temperatura Chimenea [°C]	Temperatura compuerta [°C]	Temperatura parrilla [°C]
1:03 p. m.	53	38	55	72,5	480
1:11 p. m.	53	38	49	70,5	400
1:16 p. m.	52	38,3	49,4	67,2	451
1:20 p. m.	53	39,8	48	66	426
1:22 p. m.	54	39	49	68	524
1:25 p. m.	55	39	55	62	522,7
1:29 p. m.	56	39	57,4	64,4	500
1:30 p. m.	57	39,6	51	68,3	525
1:34 p. m.	58	42,6	70,2	68,3	530,8
1:36 p. m.	59	40	56,4	68,2	517,6
1:38 p. m.	60	40	55,8	63	534
1:42 p. m.	61	40,5	58	70	476,4
1:52 p. m.	62	41,8	57	72	577,1
2:15 a. m.	67	42	55	71	538
2:16 p. m.	70	40	60,7	64	480
2:18 p. m.	73	42	56,7	65	425
2:20 p. m.	76	41,8	72	50	480
2:22 p. m.	80	41,7	76	65	538

- Segunda prueba de calefactor con termómetro infrarrojo de uso industrial y Sistema con termocupla, ejecución de atizado y abastecimiento (60/2), 10 noviembre de 2021.

Tabla 40. Resultados Segunda prueba de encendido del generador de calor

Datos con alimentación asistida en : cada minuto, 2 segundos de abastecimiento (60/2)					
Hora	Temperatura de salida [°C]	Temperatura de carcasa Ventilador [°C]	Temperatura Chimenea [°C]	Temperatura compuerta [°C]	Temperatura parrilla [°C]
12:20 p. m.	72	49,5	81,5	59	425
12:23 p. m.	68	43,5	65	56	530
12:28 p. m.	66	43,5	58	46	410
12:28 p. m.	64	42	62	46	400
12:32 p. m.	62	41,5	52	46	375
12:36 p. m.	61	41,8	60	49	550
Limpieza de ceniza					
12:40 p. m.	59	40,7	55,3	47	518
12:45 p. m.	57	39	46,8	55	455
12:48 p. m.	55	39,5	45	43	340
12:50 p. m.	53	39	45,8	40	370
12:55 p. m.	57	38	44,8	50	400
12:56 p. m.	62	38,8	48	72	518
12:57 p. m.	67	39,6	51,2	72	530
1:00 p. m.	72	40,4	54,4	70	530

- Tercera prueba de calefactor con termómetro infrarrojo de uso industrial y Sistema con termocupla, ejecución de atizado y abastecimiento (60/5), 11 de noviembre de 2021.

Tabla 41. Resultados tercera prueba de encendido generador de calor

Datos con alimentación asistida en : cada minuto, 5 segundos de abastecimiento (60/5)					
Hora	Temperatura de salida [°C]	Temperatura de carcasa Ventilador [°C]	Temperatura Chimenea [°C]	Temperatura compuerta [°C]	Temperatura parrilla [°C]
11:45 a. m.	53	35	70	42	400
11:47 a. m.	56	39	74	50	519
11:50 a. m.	59	39	95	43	416
11:51 a. m.	63	43	94	59	430
11:54 a. m.	68	42,3	102,7	64,7	475
Limpieza de ceniza					
11:55 a. m.	72	43,1	80	62	578
12:00 p. m.	76	50	81	77	577
12:05 p. m.	81	50,2	97,4	70	591
12:06 p. m.	82	52,5	102	74	600
12:10 p. m.	81	50,8	74,4	72	460
12:15 p. m.	78	50,6	91,2	70	400
12:20 p. m.	78	50,4	100	68	340
12:25 p. m.	80	50,2	95	70	400
12:30 p. m.	82	50	92	60	430
12:35 p. m.	82	49,8	91,2	66	430

- Cuarta prueba de calefactor con termómetro infrarrojo de uso industrial y sistema con termocupla, ejecución de atizado y abastecimiento inicial (60/8) con cambio a (60/13), 22 de noviembre de 2021.

Tabla 42. Resultados cuarta prueba de encendido generador de calor

Datos con alimentación asistida en : cada minuto, 8 segundos de abastecimiento (60/8)					
Hora	Temperatura de salida [°C]	Temperatura de carcasa Ventilador [°C]	Temperatura Chimenea [°C]	Temperatura compuerta [°C]	Temperatura parrilla [°C]
10:20 a. m.	70	31,5	100,2	29,7	573,5
10:22 a. m.	73	38,7	104,1	29,7	511,5
10:32 a. m.	71	41	98,5	33,5	593,4
Cambio alimentacion (60/13) y limpieza					
10:38 a. m.	72	40	111,2	33,5	551
10:39 a. m.	74	45,1	111,9	34,7	540,7
10:40 a. m.	78	43	110,8	35,4	580,8
10:42 a. m.	81	45	113,2	36	598
10:42 a. m.	83	44	112,7	36,2	600
10:50 a. m.	84	47	100	36,2	582
10:54 a. m.	85	48,3	107,6	39,3	584
10:57 a. m.	88	47,3	109,9	39,2	525,7

- Prueba de calefactor en galpón #7 y galpón #5, salidas de aire y temperatura global del galpón, con sistema de control automático de temperatura.

Tabla 43. Resultados implementación de generador de calor en galpón

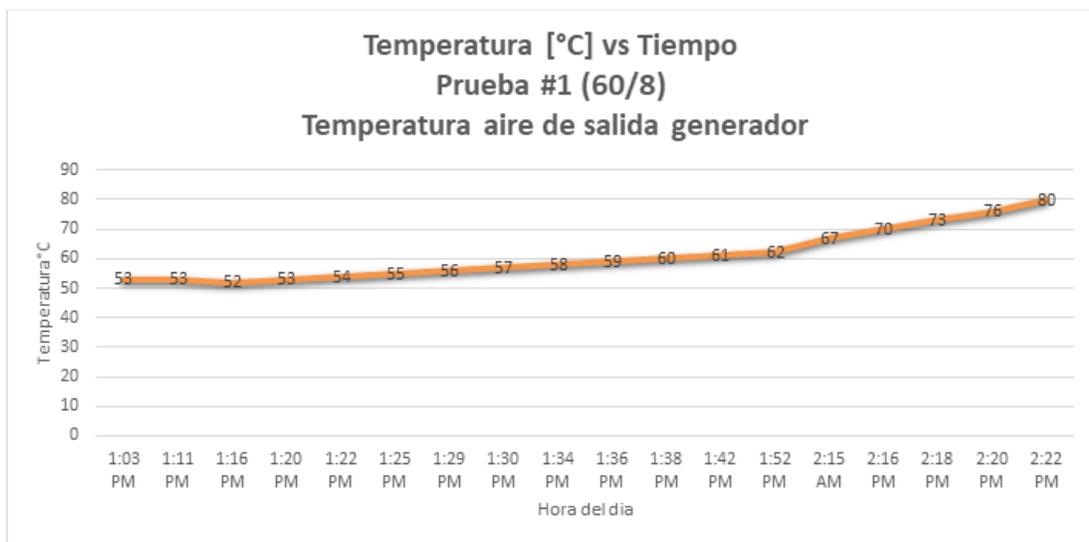
Pruebas de velocidad en Galpon 7		
Salida #1	Salida #2	Salida #3
6,5 [m/s]	7,8 [m/s]	6 [m/s]
2,9 [m/s]	4,5 [m/s]	6,4 [m/s]
6,5 [m/s]	5 [m/s]	4,9 [m/s]
Pruebas de velocidad en Galpon 5		
Salida #1	Salida #2	Salida #3
2,8 [m/s]	4,2 [m/s]	4,5 [m/s]
2,7 [m/s]	2,5 [m/s]	8 [m/s]
4,5 [m/s]	1,5 [m/s]	7 [m/s]
Temperatura requerida en el galpon		32
Temperatura ambiente Sabana de torres		30
Temperatura en el galpon		32.5
Abastecimiento seleccionado		60/8

6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Durante las pruebas realizadas se observó que los primeros 30 minutos de encendido del generador de calor, este no genera la suficiente temperatura, así que, durante su operación, antes de encender el ventilador que envía aire al galpón, es ideal que esos 30 minutos se establezcan para que la combustión tenga la energía apropiada y así poder ahorrar energía eléctrica, manteniendo el ventilador apagado en ese tiempo. De esta manera para cada prueba durante los 5 minutos de llenado de la parrilla se logra obtener el peso del cuesco depositado dentro de la parrilla (8 Kg de cuesco).

En la primera prueba una vez seguido el procedimiento de encendido del generador de calor, se establece la alimentación asistida en 8 segundos de abastecimiento automático generado por un tornillo sin fin corona cada minuto (alimentación asistida 60/8).

Figura 78. Grafica de prueba #1

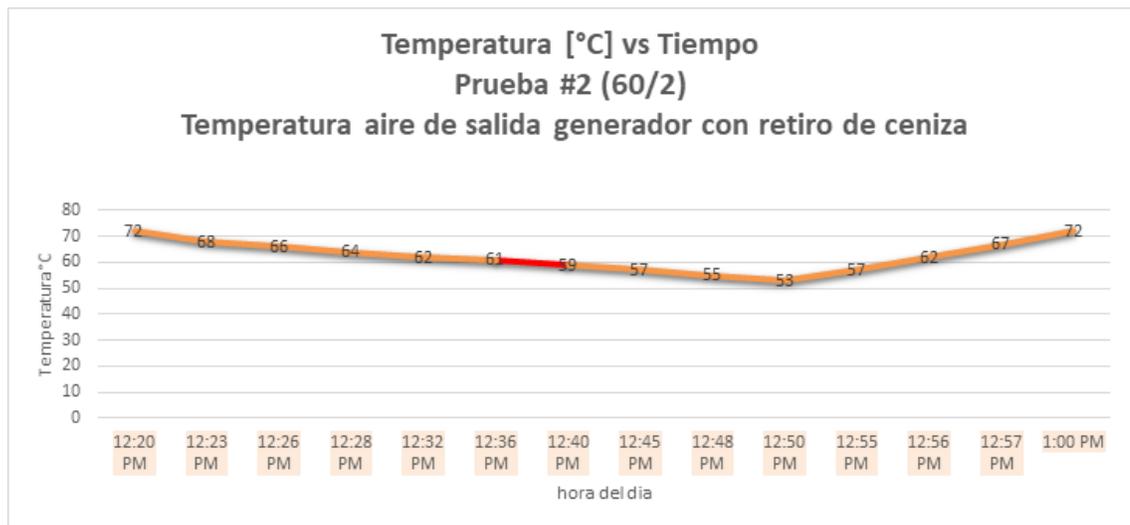


El comportamiento de todos los elementos del generador de calor es el esperado, se puede obtener una temperatura máxima de 80°C en una hora de trabajo enviando aire caliente. Además, se aprecia que no todo el material triturado es combustionado uniformemente, de manera que se plantea atizar la parrilla para

incentivar la llama, es posible hacer la recolección y medida de la cantidad de cenizas generadas para el primer encendido, obteniendo un peso neto de 3,2 Kg.

En la segunda prueba el tiempo en el cual se enciende el ventilador para el galpón se extiende a 45 minutos, observando en los inicios de salida de aire una temperatura de 72°C a diferencia de la primera prueba la cual tuvo una temperatura inicial de 53°C. Durante su operación se evidencia una caída de temperatura, por lo cual se decide incentivar la llama retirando cenizas y ayudando a unir el material no combustionado, generando un aumento en la temperatura.

Figura 79. Grafica de resultados prueba #2

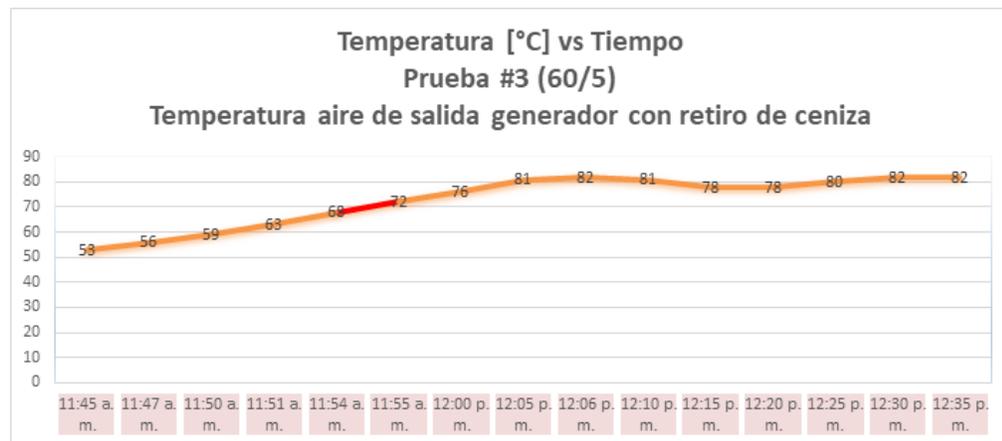


Es importante recordar que, en el proceso de limpieza de cenizas, se debe hacer de una manera que no se vea comprometida la llama, ya que puede que se extinga por una mala manipulación en la limpieza. El abastecimiento programado para esta prueba fue para cada minuto transcurrido, el tornillo abastece 2 segundos con cascarilla (60/2), en los cuales se observa una baja rápida en la temperatura en el transcurso de operación, al verificar la parrilla se evidencia una falta de combustible, es decir, se necesita un mejor abastecimiento para que el generador cumpla su labor sin que este haga una parada.

Para la tercera prueba el cambio en el abastecimiento se realiza a (60/5), para el

inicio de esta prueba se hizo un cambio en el motor del ventilador de combustión el cual fue proporcionado por la empresa, el motor tiene 1 hp de potencia a 3600 RPM, no se obtuvieron datos de esta prueba ya que el ventilador entregaba más aire del necesario y termino por ahogar la llama. Por consiguiente, se instaló el motor de 1/8 hp a 1700 RPM y se continuo con la tabulación de los datos obtenidos.

Figura 80. Grafica de resultados prueba #3

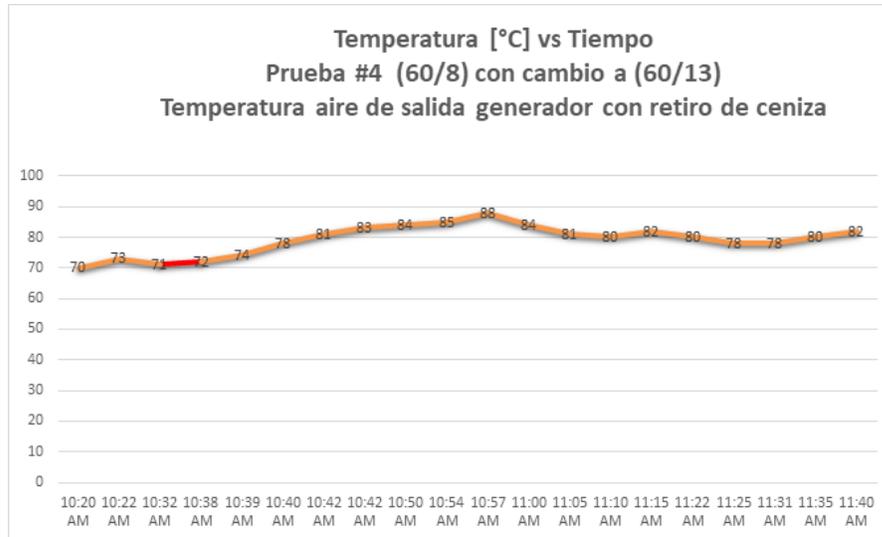


El abastecimiento seleccionado muestra un buen comportamiento y una vez más, es posible evidenciar como la limpieza de cenizas y el incentivar la llama provocan un incremento en la temperatura de salida, inmediatamente se presente una caída de temperatura en el sistema. También se logra visualizar que el tipo de aire entregado al galpón está libre de humos, y que efectivamente la generación de aire está en base a la cantidad de cuesco quemado en la combustión del generador de calor. Finalmente se logra resaltar en el gráfico de la prueba 3 el rango de temperaturas (80-82), en el cual se estabiliza la temperatura entregada por el generador, con el abastecimiento seleccionado (60/5) y con la limpieza de cenizas la cual está marcada en la gráfica con un tramo de color rojo.

Completando la fase de pruebas es posible evidenciar en el gráfico de resultados de la prueba #4 un aumento de temperatura máximo de 88°C fomentado por el incremento en el abastecimiento de cascarilla a la parrilla de 60/13. Adicionalmente se genera un apagado del ventilador en el momento que se realiza la limpieza de

cenizas y el atizado para favorecer la combustión del generador.

Figura 81. Grafica de resultados prueba #4



Se evidencia la estabilidad de temperatura de salida del generador de calor en 82 °C, adicionalmente el peso de ceniza que se recoge en esta prueba es el mayor en todas siendo de 3.6 Kg de ceniza. Para culminar la prueba se logra destacar que, al apagar unos minutos el ventilador de salida del generador de calor, al momento de encenderlo se genera un incremento mucho mayor que el que tiene en trabajo constante.

Por último, las pruebas en los galpones revelan que es necesario que el generador de calor sea encendido una hora antes de entregar aire al galpón, con el fin de que al precalentar el equipo genere mejor energía térmica, de esta manera fue necesario suspender la salida de aire y el abastecimiento en varias ocasiones debido a que, el generador incrementaba 1 o 2 grados la temperatura necesaria. El Generador trabajará 14 horas al día desde las 5:00 pm hasta las 7:00 am durante 12 días al mes, según la empresa avícola que está implementando el generador, En definitiva, el comportamiento del generador de calor es el esperado en la prueba ya que se aseguró la ambientación con el control de temperatura y humedad que tienen los galpones. Por otro lado, se ofrece una charla a los técnicos de la empresa avícola

presentes y al jefe de mantenimiento con el objetivo de aclarar el funcionamiento del generador de calor y las sugerencias para un mejor desempeño.

Tabla 44. Ficha técnica del equipo

	INDARS S.A.S.		Versión: 01	
	Área: Fabricación de maquinaria avícola			
	Nombre del formato: Ficha técnica			
REALIZADO POR: Lucas Ardila y Nicolas Patiño			Cargo: Estudiantes UIS	
EQUIPO: Generador de Calor a base de biomasa			Ubicación: Giron -Santander-Colombia	
Fabricante: INDARS S.A.S.			Email: comercial@indars.com.co	
Modelo: 2021			Contactos: 3168342257, 3165214660	
Características Generales				
Altura: 1,89 [m]		Ancho: 1,05 [m]		Largo: 3 [m]
				Peso: 1.4 [Ton]
Características técnicas			Vision del equipo	
Ventilador de abastecimiento a la combustión				
Salida de aire de combustión	m ³ /h		CFM	
	369,4		217,42	
Potencia motor ventilador de combustión			RPM	
1/8 [Hp]			1700/1450	
Voltaje de motor		Frecuencia		
208-230		60 Hz		
Ventilador de suministro de aire al galpón				
Salida de aire a galpón	m ³ /h		CFM	
	3622,65		2132,21	
Potencia motor ventilador de combustión			RPM	
4 [Hp]			1735	
Voltaje de motor		Frecuencia		
220-440		60 Hz		
Tipo de combustible		Temperatura máxima de salida		
Biomasa		88°C		
Capacidad de ambientación				
Galpón avícola 150 x 30				
FUNCION				
<p>Mantener la temperatura del ambiente de un galpón avícola, aportando aire caliente proveniente del intercambio de calor generado por la combustión de cascarilla de palma africana.</p>				
Instrucciones de uso				
<p>Conectar y Seleccionar el abastecimiento asistido el cual va desde 60/2 (cada 60 segundos de trabajo ingresa 2 segundos de cascarilla a la parrilla), hasta abastecimiento constante. Encender la alimentación automática de cascarilla durante 4 minutos para realizar el llenado de la parrilla, a continuación, un operario deberá con unas gotas de combustible y una antorcha encender la cascarilla depositada y cerrar la puerta, esperar 1 hora o menos según sea la exigencia de la zona a ambientar. Una vez pasado el precalentamiento del generador se enciende el ventilador de salida a tuberías para conducir el aire caliente.</p>				
Mantenimiento				
<p>Es importante que se revise el estado de la llama y el nivel de cenizas generado, retirando de manera manual por un acceso inferior a la puerta la cual es para el retiro de cenizas, además no se aconseja acumular cenizas en la parrilla, para no intervenir en la generación de calor ya que pueden formarse piedras que ahoguen el fuego. Los tubos del intercambiador de calor se deben limpiar de manera trimestral o mensual según el ambiente al que este expuesto. Finalmente se recomienda inspeccionar diariamente todos los componentes para garantizar el buen funcionamiento.</p>				

6.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL GENERADOR DE CALOR.

Finalmente es posible generar una comparación del generador de calor a base de cascarilla de palma africana, donde se compara en diferentes aspectos como los son el consumo de combustible, cantidad necesarias por galpón, peligro para las aves, fácil instalación, impacto ambiental, adecuada ambientación, mantenimiento, consumo eléctrico y sencilla operación. Estos aspectos serán evaluados así mismo en criadoras infrarrojas y turbo calentadores los cuales son los sistemas de calefacción más utilizados en el sector avícola actualmente.

Tabla 45. Generador de aire caliente con biomasa vs turbo calentador

Generador de aire caliente con biomasa	Turbo calentador
	
Combustible	
<p>Cascarilla de palmiste. 1 Tonelada de cascarilla: \$60.000(COP)/Ton. Consumo: 1 Tonelada al mes. Costo combustible: \$60.000(COP) mensuales.</p>	<p>Gas propano. Kilogramo de gas propano: \$1.600 (COP)/Kg. Consumo: 66,78 Kg/día = 2.031,22 Kg/mes Costo combustible: \$3'249.952 (COP) mensuales.</p>
Cantidad de equipos por galpón	
<p>1 equipo para ambientar completamente el galpón.</p>	<p>2 equipos para ambientar completamente el galpón.</p>
Instalación	
<p>El calefactor funciona en la parte externa del galpón, evitando el ruido para las aves</p>	<p>El turbo calentador funciona internamente en el galpón, lo que produce ruido y estrés a las aves</p>

Las características del turbo calentador mostradas en la anterior tabla son adquiridas por el catálogo "SunPower".⁵⁰

⁵⁰ SUNPOWER. [En línea]. Guatemala: AVINDUSTRIAS. [Consultado: 13 de octubre 2021]. Disponible en: <https://www.aveindustrias.com/page/sunpower>.

Tabla 46. Generador de aire caliente con biomasa vs criadoras infrarrojas

Generador de aire caliente con biomasa	Criadoras infrarrojas
	
Combustible	
<p>Cascarilla de palmiste Consumo: 1 Tonelada al mes 1 Tonelada de cascarilla: 60.000(COP) Capacidad: Galpon avicola 150 x 30</p>	<p>Gas propano Consumo: 303 gr de gr/h 1 Kg GLP: 471.500(COP) Capacidad: 1000 pollos * criadora</p>
Cantidad de equipos por galpón	
1 equipo para ambientar correctamente un galpón avícola de 150 x 30m ² (30000 pollos)	29 criadoras para galpón avicola 150 x 30 m ² (30000 pollos)
Instalación	
Sistema simple de ductos acoplado a la parte trasera del galpón	Red de tuberías para abastecimiento de gas por cada criadora

Las características de las criadoras infrarrojas mostradas en la anterior tabla son adquiridas por la empresa INDARS S.A.S.

A continuación, se implementa un rango de evaluación de 1 para indicar que el sistema de calefacción es eficiente en ese aspecto a evaluar, 0 para señalar que es poco eficiente y -1 para especificar que es no eficiente

Tabla 47. Rango de evaluación

Rango de evaluacion	
1	Eficiente
0	Poco Eficiente
-1	No eficiente

En la comparación de los sistemas de calefacción avícola se tabula los aspectos a evaluar, al igual que los resultados con el objetivo de dar a conocer aspectos característicos en los cuales el generador de calor a base de cascarilla es superior con respecto a los demás evaluados.

Tabla 48. Calefactor de biomasa Vs Criadoras y turbo calentadores

Tabla comparativa Calefactor de biomasa vs Criadoras y turbo calentadores									
Generador de aire caliente a base de cascavilla			Criadoras infrarrojas			Turbo calentadores			
									
Consumo de combustible	Cantidad necesarias por galpón	Peligro para las aves	Consumo de combustible	Cantidad necesarias por galpón	Peligro para las aves	Consumo de combustible	Cantidad necesarias por galpón	Peligro para las aves	
1	1	1	0	-1	-1	-1	1	-1	
Fácil instalación	Impacto ambiental	Adecuada ambientación	Fácil instalación	Impacto ambiental	Adecuada ambientación	Fácil instalación	Impacto ambiental	Adecuada ambientación	
1	0	1	-1	0	-1	0	-1	1	
Mantenimiento	Consumo eléctrico	Sencilla operación	Mantenimiento	Consumo eléctrico	Sencilla operación	Mantenimiento	Consumo eléctrico	Sencilla operación	
1	0	0	1	1	1	-1	-1	1	

Dentro de los aspectos evaluados se puede encontrar el consumo de combustible, el cual es importante y predominante en esta evaluación ya que el generador de calor usa un combustible alternativo a diferencia de los demás calefactores que utilizan combustibles fósiles como lo son los derivados del petróleo y el propano, además de la energía eléctrica, los cuales, además de generar un costo alto en la implementación de estos sistemas generan un impacto ambiental negativo debido a la combustión de estos tipos de combustibles. En relación con esta idea, es posible verificar que en las criadoras infrarrojas su principal combustible es el GLP o la gasolina, el cual genera gases tóxicos al ambiente, aportando gastos de \$2'000.000 (COP) al mes en gastos de combustible, ya que se requieren de alrededor de 29 criadoras por galpón, esto según INDAR S.A.S.

Adicionalmente se evalúa la seguridad que estos sistemas ofrecen para las aves y para los operarios que trabajen con estos tipos de máquinas. Una ventaja del generador de calor a base de cascarilla es que es instalado en la parte exterior de los galpones proporcionando un ambiente dentro del galpón libre de ruido y sin estructuras que pongan en peligro a las aves a diferencia de algunos turbos calentadores y criadoras infrarrojas, las cuales, tienen que graduar la altura de la instalación según el crecimiento para evitar daños en los pollos. Por añadidura el generador de calor a base de cascarilla no representa peligro por la manipulación de combustibles que pueden generar una explosión.

Figura 82. Tanque de GLP



Del mismo modo se tienen en cuenta aspectos como lo es una ambientación adecuada en el galpón, es por esto que el entorno es ambientado por convección, debido a que es la más adecuada para el crecimiento de las aves, evitando enfermedades ocasionadas por la radiación de las criadoras infrarrojas y garantizando un confort dentro del galpón con el implemento de un solo generador de calor, en contraste con las criadoras las cuales para ambientar un galpón completo, se necesita de la instalación de una red de las mismas para satisfacer la crianza de las aves, complicando la instalación de este tipo de criadoras, la manipulación y el mantenimiento, al igual que sucede en sistemas completos, compactos y automatizados como los turbo calentadores.

Figura 83. Criadora infrarroja de radiación



Para culminar en los resultados de la evaluación comparativa se verifica que la mejor opción es el generador de aire caliente a base de cascarilla ya que entrega un sistema de calefacción completo de fácil operación y mantenimiento, asegurando un aire limpio a las aves dentro del galpón, evitando estrés u otras enfermedades debido al mal ambiente generado por la máquina, con uso de un combustible no toxico e inofensivo de manipular y disminuyendo el impacto ambiental.

Tabla 49. Resultados de la tabla de comparación

Resultados de comparación		
		
Total		
6	-1	-2

7. DISEÑO DEL FLUJO ECONÓMICO DEL PROYECTO.

En el desarrollo de este proyecto es muy importante tener en cuenta el factor económico que influye en la empresa. Esto se puede determinar obteniendo la tasa de retorno y el valor presente neto del proyecto.

Para poder hallar estos 2 criterios anteriores, se debe tener en cuenta los costos de los componentes del calefactor, la materia prima utilizada, transporte, motores, construcción, etc.

Estos valores están representados en la siguiente tabla.

Tabla 50. Costo componentes del calefactor

Costo de componentes	
NOMBRE COMPONENTE	PRECIO TOTAL
CUERPO INTERNO	\$ 11.675.650,00
CUERPO EXTERNO	\$ 4.530.731,00
CHIMENEA DESFOGUE	\$ 801.003,00
SISTEMA AIRE LLAMA	\$ 2.381.916,00
VENTILADOR AIRE CALIENTE	\$ 3.616.400,00
CONEXIÓN TUBERIA GALPON	\$ 1.365.000,00
TOTAL	\$ 24.370.700,00

Esta tabla fue aportada por la empresa INDARS, en la cual los valores de transporte y materia prima están incluidos en ella.

A continuación, se presenta el valor del costo por construcción del calefactor anualmente, este valor incluye la mano de obra y la maquinaria utilizada durante la construcción. Se debe tener en cuenta que para este valor se tomará un 10% para los imprevistos durante su construcción.

Tabla 51. Costos de construcción del calefactor

Costo de construcción anual	
NOMBRE COMPONENTE	PRECIO TOTAL
COSTO DE CONSTRUCCIÓN	\$ 4.000.000,00
IMPREVISTOS 10%	1,1
Costo de construcción anual	\$ 4.400.000,00

Estos costos planteados en la anterior tabla son representados en un año, es decir se debe modificar este valor a pagos trimestrales, debido a que en un año se venden en promedio 4 calefactores.

Tabla 52. Costos de construcción trimestral

Costo de construcción trimestral	
Costo de construcción (anual)	\$ 4'400.000
Trimestres en un año	4
$Costo_{constrimestral} = \frac{costo_{cons\ anual}}{trimestres_{año}}$	
Costos de construcción (trimestral)	\$ 1'100.000

Luego de presentar los costos necesarios para la fabricación del calefactor, la empresa dedujo su precio de venta.

Se venden los calefactores trimestralmente (cada 3 meses).

Tabla 53. Precio de venta del calefactor

Precio de venta del calefactor	
Precio de venta del calefactor	\$ 27.500.000,00

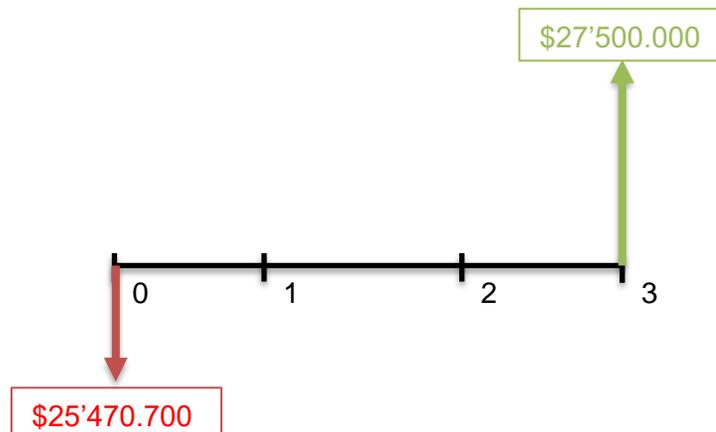
7.1 VALOR PRESENTE NETO DEL PROYECTO (VPN).

Con el costo total para fabricar el calefactor (el cual se obtiene sumando los costos de los componentes y el costo de construcción trimestral), y el precio de venta de este, se puede determinar el valor presente neto del proyecto, teniendo en cuenta que el análisis se realizará para un año con un interés anual del 14% (interés anual para pequeñas empresas ofrecido por el banco Colpatría).⁵¹

Tabla 54. Costo total de fabricación del calefactor trimestral

Cálculo de los costos de fabricación trimestral	
Costo componentes	\$ 24'370.700
Costo de construccion trimestral	\$ 1'100.000
Costo total de fabricacion trimetral	
$Costo_{fabricacion} = Costo_{componentes} + Costo_{construccion_{trimestral}}$	
RESULTADO	
Costos de fabricación (trimestral)	\$ 25'470.700

Figura 84. Diagrama de flujo económico trimestral



Una vez obtenido el diagrama de flujo trimestral, se continua con el desarrollo del flujo economico anual, en este sentido, se debe calcular primero el costo mensual de construcción por un año, teniendo en cuenta que el interes anual es del 14%, el cual se debe modificar a un interes mensual.

⁵¹ RANKIA. [en línea]. Colombia: RANKIA, Mejores tasas de crédito para pymes 2022. [Consulta: 20 de diciembre del 2021]. Disponible en: <https://www.rankia.co/blog/mejores-creditos-y-prestamos-colombia/3927261-mejores-tasas-credito-para-pymes>.

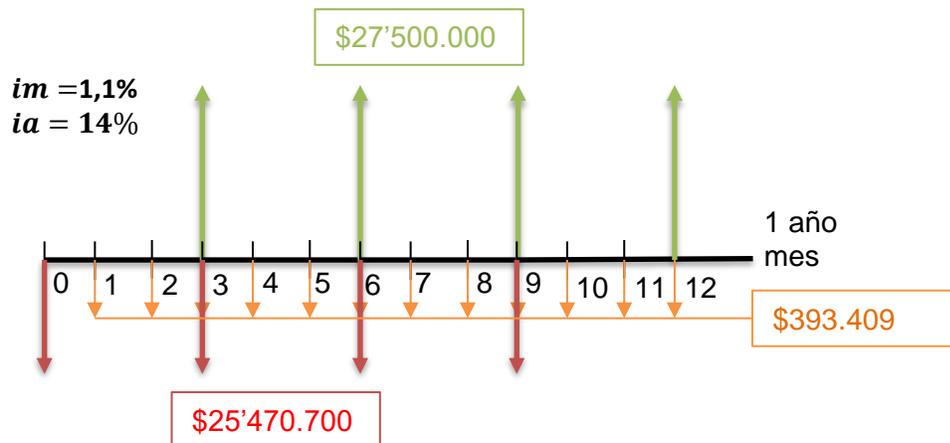
Tabla 55. Modificación del interes anual a interes mensual

Cálculo del interes mensual ofrecido por el banco	
interes anual (<i>ia</i>)	14%
Meses en un año (M)	12
Tasa de interes mensual (<i>im</i>)	
$im = (1 + ia)^{\frac{1}{12}} - 1$	
RESULTADO	
Tasa de interes mensual - Banco (<i>im</i>)	1,10%

Tabla 56. Costo mensual de construcción

Cálculo costos de construcción mensual	
P (costos de construcción anual)	\$ 4'400.000
F (precio de venta)	\$ 27'500.000
N (meses en un año)	12
interes mensual (<i>im</i>)	1,1% (0,011)
Pagos de construcción mensuales	
$A = P * \left(\frac{im * (1 + im)^N}{(1 + im)^N - 1} \right)$	
RESULTADO	
Pagos construcción mensual (A)	\$ 393.409,00

Figura 85. Diagrama de flujo económico anual



Con el diagrama de flujos económicos obtenido en el anterior apartado (Figura 20), se puede verificar si el proyecto genera ganancias de acuerdo con el valor presente neto, el cual se desarrolla de la siguiente manera.

Primero se debe calcular el valor presente neto de los ingresos ($VPN_{INGRESOS}$) y el valor presente neto de los egresos ($VPN_{EGRESOS}$), este cálculo se desarrolla teniendo en cuenta el diagrama de flujos económicos del proyecto (Figura 20).

Tabla 57. Cálculo del valor presente neto de los egresos

Cálculo valor presente neto de los egresos	
P (costos componentes)	\$ 24'370.700
A (costo de construcción mensual)	\$ 393.409,00
N (meses en un año)	12
Tasa de interes mensual (<i>im</i>)	1,1% (0,011)
$VPN_{EGRESOS}$	
$VPN_{EGRESOS} = P + A * \frac{(1 + im)^N - 1}{im * (1 + im)^N} + P * (1 + im)^{-3} + P * (1 + im)^{-6} + P * (1 + im)^{-9}$	
RESULTADO	
$VPN_{EGRESOS}$	\$97'262.446,9

Tabla 58. Cálculo del valor presente neto de los ingresos

Cálculo del valor presente neto de los ingresos	
F (precio de venta)	\$ 27'500.000
Tasa de retorno mensual (<i>im</i>)	1,1% (0,011)
$VPN_{INGRESOS}$	
$VPN_{INGRESOS} = F * (1 + im)^{-3} + F * (1 + im)^{-6} + F * (1 + im)^{-9} + F * (1 + im)^{-12}$	
RESULTADO	
$VPN_{INGRESOS}$	\$101'403.126,7

Una vez obtenido el valor presente de los egresos y de los ingresos, se puede calcular el valor presente neto que genera el proyecto haciendo la diferencia entre ellos ($VPN_{INGRESOS} - VPN_{EGRESOS}$).

Tabla 59. Cálculo del valor presente neto del proyecto

Cálculo del valor presente neto del proyecto (VPN)	
$VPN_{INGRESOS}$	\$101'403.126,7
$VPN_{EGRESOS}$	\$97'262.446,9
Valor presente neto (VPN)	
$VPN = VPN_{INGRESOS} - VPN_{EGRESOS}$	
RESULTADO	
(VPN)	\$4'140.679,784

Si verificamos el VPN, se puede concluir que una vez se implemente este proyecto en un año le va a generar ganancias a la empresa, debido a que el resultado es positivo, esto teniendo en cuenta que se venda 4 calefactores al año.

7.2 TASA INTERNA DE RETORNO DEL PROYECTO (TIR)

Para el cálculo de la tasa interna de retorno del proyecto (TIR) se igualará a cero el valor presente neto ($VPN=0$) o valor actual neto ($VAN=0$), para así obtener un valor de interés, el cual será la TIR.

Los criterios de decisión en la TIR son los siguientes:

- $TIR > ia$, se acepta el proyecto.
- $TIR < ia$, se rechaza el proyecto.
- $TIR = ia$, el proyecto es indiferente.

Sabiendo que (ia) = 14%

De acuerdo con lo anterior, para obtener la ecuación del VPN se debe analizar el diagrama de flujos económico del proyecto (Figura 20).

Tabla 60. Cálculo de la tasa interna de retorno del proyecto

Cálculo de la tasa interna de retorno del proyecto	
P (costos de fabricación trimestral)	\$ 25'470.700
F (precio de venta)	\$ 27'500.000
A (Costo de construcción mensual)	\$ 4'400.000
N (meses en un trimestre)	3
Tasa interna de retorno mensual $(TIR)_{MENSUAL}$	
$VPN = (F * (1 + i)^{-3} + F * (1 + i)^{-6} + F * (1 + i)^{-9} + F * (1 + i)^{-12}) - (P + A * \frac{(1+i)^N - 1}{i * (1+i)^N} + P * (1 + i)^{-3} + P * (1 + i)^{-6} + P * (1 + i)^{-9})$ $VPN = 0$	
RESULTADO	
Tasa interna de retorno mensual $(TIR)_{MENSUAL}$	2,56% (0,0256)
Tasa interna de retorno anual $(TIR)_{ANUAL}$	
$ia = (1 + im)^{12} - 1$	
RESULTADO	
Tasa interna de retorno anual $(TIR)_{ANUAL}$	35,44% (0,3544)

Observando la tabla anterior, se concluye que el proyecto es rentable debido a que su tasa interna de retorno anual es superior a la tasa de interés ofrecida por el banco. (sabiendo que el banco Colpatria ofrece un interés efectivo anual para pequeñas empresas del 14,75 %).⁵²

⁵² RANKIA. [en línea]. Colombia: RANKIA, Mejores tasas de crédito para pymes 2022. [Consulta: 20 de diciembre del 2021]. Disponible en: <https://www.rankia.co/blog/mejores-creditos-y-prestamos-colombia/3927261-mejores-tasas-credito-para-pymes>.

8. CONCLUSIONES.

- ✓ Con el desarrollo del sistema de calefacción para galpones avícolas se cumple con la misión de la Universidad Industrial de Santander de contribuir con el desarrollo tecnológico de la región, impulsando el sector avícola mediante un aporte al diseño de sistemas de calefacción, además de incentivar el uso de la biomasa como principal fuente de generación de calor, y a su vez impulsar las empresas productoras de este tipo de combustible.
- ✓ Se logró diseñar un sistema de calefacción que implementa biomasa como combustible principal, para este caso cascarilla de palma aceitera, obteniendo una configuración satisfactoria estructural y térmica del modelo desarrollado, adicionalmente se logró seleccionar los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del calefactor, capaz de acondicionar los galpones del sector avícola, como es el caso de las galponeras de la granja Rio Claro, la cual cuenta con galpones desde 150 x 30 [m] hasta 130 x 10 [m].
- ✓ Se cumplió con el objetivo de la construcción de un sistema de generación de calor, con la capacidad de ambientar un galpón de 150 x 30 [m], el cual soporta satisfactoriamente las cargas para las cuales se diseñó, capacitado para suministrar aire a una temperatura de hasta de 88°C a una rata de 3622 [m³/h], garantizando un aire limpio y sin provocar ruido para la salud de las aves, ya que el modelo construido opera desde la parte externa del galpón.
- ✓ Al realizar la comparación del sistema de calefacción con los 2 tipos más comunes de criadores para galpones avícolas, se puede evidenciar que el generador de calor supera sin dificultades las características de las criadoras infrarrojas y de los turbos calentadores, además de generar pocos gastos en el combustible debido a que es un material orgánico y fácil de adquirir, que en este caso se puede obtener en el sector de Santander por la empresa Agro Anaime S.A.S., la cual comercializa la tonelada de cascarilla de palma aceitera a \$60.000 (COP). Por otro lado, el biocombustible utilizado es ecológico y sano con el entorno, a diferencia de los

combustibles derivados del petróleo, que producen gases tóxicos al ambiente. Para finalizar, es importante resaltar que solo es requerido un calefactor de biomasa por un galpón, a diferencia de los sistemas tradicionales, los cuales requieren de más de un equipo.

- ✓ La realización de este proyecto nos permitió generar y desarrollar un pensamiento consiente, con responsabilidad y flexibilidad, asumiendo los conocimientos nuevos brindados por la experiencia de la ejecución del proyecto en la empresa, fortaleciendo conocimientos en el sector metalmecánico, permitiendo la participación de negociaciones sobre maquinaria, materiales y procesos, además del asesoramiento en la selección de equipos para montajes e instalaciones diversas. Del mismo modo se refuerzan las habilidades en el manejo de herramientas computacionales para el apoyo en el diseño de maquinaria para el sector avícola.

BIBLIOGRAFÍA

ACADEMIA. [en línea]. ACADEMIA, Guía de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/7767151/GUIA_DE_INTERCAMBIADORES_DE_CALOR_TIPOS_GENERALES_Y_APLICACIONES.

ACADEMIA. [en línea]. ACADEMIA, Quemadores para combustibles sólidos. [Consultado: 13 de Abril 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/25502140/QUEMADORES_PARA_COMBUSTIBLES_SOLIDOS.

AIRE LIMPIO GLOBAL. [en línea]. Bogotá: ALG, Tipos de ventiladores – Clasificación. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>.

AMRANDADO. [en línea]. España: CCR, Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 3.0, Combustión y Combustibles, 27/04/2020. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://blogsaverroes.juntadeandalucia.es/amrandado/211-2/>.

BANCO DE LA REPUBLICA. [en línea]. Bucaramanga: Banco de la república, Características del sector avícola colombiano y su reciente evolución en el departamento de Santander. [Consultado: 12 de Abril del 2021]. Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/caracteristicas-del-sector-avicola-colombiano-y-su-reciente-evolucion-el-departamento-santander>.

BARRERA, Juan; RAMIREZ, Nidia; GARCIA, Jesús; Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. Valor Agregado [en línea]. Bogotá (Colombia): Revista Palmas, Octubre - diciembre 2018, vol. 39 (4) 24 – 44. [Consultado: 12 de Abril 2021]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709/12613>.

BARRIQUAND. [En línea]. Saint-Claude: BARRIQUAND, El especialista del intercambiador de calor. [Consultado: 17 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.barriquand.com/es/intercambiadores-calor/intercambiador-calor-espiral/>.

BLOGGER. [En línea]. Santiago: BLOGGER, Turbo calefactor Chile. [Consultado: 14 de Mayo 2021]. Disponible en: <http://turbocalefactor.blogspot.com/2015/08/para-que-sirve-un-turbo-calefactor.html>.

BROCHERO MONTERO, Juan Jose Y ESTUPIÑAN HINESTROZA, Romario. Sistema de calentamiento con biomasa para uso alternativo en el secado solar de tunal Hohenheim. [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Universidad Pontificia Bolivariana, 2019 [Consultado: 12 de Abril 2021]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8540/39264.pdf?sequence=1>.

CANALES SECTORIALES. [en línea]. Barcelona: Interempresas, principios para la correcta elección de una caldera de biomasa ¿cámara de combustión metálica o de refractario?, 23/01/2014. [Consultado: 13 de Abril 2021]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/142732-principios-para-la-correcta-eleccion-de-una-caldera-de-biomasa-camara-de-combustion-metalica-o-de-refractario.html>.

CÉLLERI, Diego Iván. Diseño y construcción de un generador de aire caliente con residuos de palma africana. Tesis de grado Ingeniero Químico. Quito: Universidad San Francisco de Quito Politécnico. Facultad de fisicoquímicas, Septiembre 2008.

CENGEL Yanus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, 8va edición. Mc Graw-Hill, 2015.

COMERCIALFOISA. [En línea]. COMERCIALFOISA, Intercambiador de calor funcionamiento, tipos y eficiencia, Los diferentes tipos de intercambiadores de calor. [Consultado: 16 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://comercialfoisa.com/intercambiador-de-calor-funcionamientotipos-y-eficiencia/>.

DOCPLAYER. [en línea]. CHORE TIME, Criadoras y Calentadores, Fabricado para Funcionar. Construido para Durar, acerca de la calefacción. [Consultado: 14 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/39720698-Chore-time-le-brinda-a-sus-aves-el-calor-y-comodidad-del-sol.html>.

EL SITIO AVÍCOLA, Sistemas de calefacción por biomasa para galpones de pollos. [en línea]. GLOBAL AG MEDIA, Sistemas de calefacción por biomasa para galpones de pollos. [Consultado: 12 de Abril 2021]. Disponible en: <https://www.elsitioavicola.com/articles/2479/sistemas-de-calefaccian-por-biomasa-para-galpones-de-pollos/>.

ERAZO CHÁFUEL, Diego Orlando. Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y humedad para un galpón de pollos de la avícola “la esperanza”. Trabajo de grado Ingeniero en mecatrónica. Ibarra (Ecuador): Universidad técnica del norte, Junio 2014

FACO. [En línea]. Guadalajara: EMIJH SALAS, Ventiladores centrífugos, 2016. [Consultado: 18 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.facorb.com/ventiladores-centrifugos>.

FEDERACIÓN NACIONAL DE AVICULTORES DE COLOMBIA. [En línea]. Bogotá: FENAVI, Estadísticas del sector, Producción. [Consultado: 14 de abril 2021]. Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/>.

FORERO, Carlos A., et al. Estudio preliminar del potencial energético de cuesco de palma y cáscara de coco en Colombia. Revista Ingeniería Solidaria [en línea]. Bogotá (Colombia): Universidad Nacional de Colombia, 5 Marzo 2012, Vol. 4, nro. 14. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/340/347>.

GRAHAM, Frank D. Audels engineers and mechanics, guide 5. Theo Audel & Co. editions, 1 Enero 1921.

GRAHAM, Frank D. Audels engineers and mechanics, guide 6. Theo Audel & Co. editions, 1 Enero 1921.

Guía de Intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones. [En línea]. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar, Marzo del 2002. [Consultado: 16 de Mayo 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/7767151/GUIA_DE_INTERCAMBIADORES_DE_CALOR_TIPOS_GENERALES_Y_APLICACIONES.

INCROPERA Frank P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: Pearson, 1999.

INGENIERO MARINO. [en línea]. INGENIERO MARINO, Intercambiadores de Calor. [Consultado: 15 de Abril 2021]. Disponible en: <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>>. 2020.

PERRY, John H. Chemical Engineers Handbook. 7ma ed. McGraw-Hill, 1997.

RANKIA, Mejores tasas de crédito para pymes 2022. [en línea]. Colombia: RANKIA, Mejores tasas de crédito para pymes 2022. [Consultado: 20 de diciembre del 2021]. Disponible en: <https://www.rankia.co/blog/mejores-creditos-y-prestamos-colombia/3927261-mejores-tasas-credito-para-pymes>.

SÁNCHEZ ALFOSNO, Raúl Antonio, et al. Modelo para la gasificación del cuesco de palma aceitera. Ingenium. [en línea]. GIATME: Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, Julio – Diciembre 2017, Vol. 18, nro. 36. [Consultado: 1 de Junio 2021]. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK Ewif87OI2I3yAhVzsDEKHTVJArAQFjAAegQIBRAD&url=https%3A%2F%2Fdia.net.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F6333250.pdf&usg=AOvVaw0qK4KvWzaqNln4WuA8pb8H>.

SDT AIR. [En línea]. Girona: SDT AIR, Ventiladores centrífugos: características y ventajas, Tipos de ventiladores centrífugos, 26/08/2020. [Consultado: 18 de Mayo 2021]. Disponible en: <https://www.sdtair.com/ventiladores-centrifugos-caracteristicas-y-ventajas>.

SODECA. Ventiladores centrífugos y extractore en línea para conductos. ventiladores centrífugos de media presión y simple aspiración. Barcelona: amca editions, 1983.

SPIRO, Thomas G., and WILLIAM, Stigliani. Chemistry of the Environment. 2da ed. Pearson, 2003.

STANLEY, Wallas. Chemical process Equipment Selection and Design, 2nd edition. Lawrence (Kansas): Butterworth Heinemann, 2005. p. 208.

SUNPOWER. [En línea]. Guatemala: AVINDUSTRIAS. [Consultado: 13 de octubre 2021]. Disponible en: <https://www.aveindustrias.com/page/sunpower>.