



**Diseño de un sistema de  
aprovechamiento de calor residual  
generado en el horno de secado de la  
empresa transformadores GVR  
Energy S.A.S. localizada en la ciudad  
de Ibagué.**

**Jeisson Fernando Urueña Labrador**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Ciudad, Colombia  
Año  
2021



# **Diseño de un sistema de aprovechamiento de calor residual generado en el horno de secado de la empresa transformadores GVR Energy S.A.S. localizada en la ciudad de Ibagué.**

**Jeisson Fernando Urueña Labrador**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electromecánico**

Director:

MSc. Ingeniero Juan Carlos Rico Bermúdez

Línea de Investigación:

Cogeneración y eficiencia energética

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

Año

2021



*La persistencia es muy importante. No debes renunciar al menos que te veas obligado a renunciar.*

*Elon Musk*



## **Agradecimientos**

El autor de este proyecto agradece:

A Dios por brindarme la sabiduría y entendimiento, para culminar este logro de ser ingeniero.

A mi familia por su apoyo constante, durante este proceso de pregrado.

Al ingeniero Juan Carlos Rico Bermúdez, por su apoyo y asesoría. Durante la elaboración de esta investigación.



## **Resumen**

El presente proyecto realiza el diseño de un sistema para el aprovechamiento del calor residual que es expulsado durante el proceso de combustión de gas en el horno de secado en la línea de producción de la empresa transformadores GVR Energy S.A.S. (a 138°C) con el objeto de disminuir el consumo energético del horno de curado, ya que su operación de calentamiento es por medio de resistencias eléctricas de 1200 Ohm (hasta 120°C). Así mismo, disminuir la radiación del horno de secado que expulsa sus productos de combustión en el entorno y de este modo contribuir a la mejora del medio ambiente (se dejan de emitir a la atmosfera cerca de 22 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes). El desarrollo del sistema de recuperación de energía en forma de calor (cogeneración) documentado en este trabajo de grado está conformado por un marco teórico necesario para fundamentar y establecer una metodología de cálculo que permita desarrollar el diseño, en la ingeniería del proyecto se presenta la recolección de datos y variables del sistema, se diseña el recuperador de calor de coraza y tubos mediante el método de la Temperatura Media Logarítmica (LMT), diseño del sistema de ductos mediante la caída de presión dinámica, selección del ventilador centrífugo, revestimiento aislante, filtro catalizador y selección de los demás componentes de la instalación. Se presentan los planos constructivos y como resultado del proyecto se presentan los costos del sistema (cerca de los \$7.500.000) el retorno a la inversión (sobre los 5 años) y un aporte concreto del diseño es el cambio de 2 resistencias de 1100 W cada una (2,2kW) por un sistema de recuperación de calor y una resistencia de 606 W y 20 W en ventilador centrífugo (0.626 kW). Los cuales se manifiestan en un ahorro en el consumo del 70%.

**Palabras clave: (Horno de secado, cogeneración, consumo energético, medio ambiente).**

## **Abstract**

This project carries out the design of a system to take advantage of the residual heat that is expelled during the gas combustion process in the drying oven on the production line of the transformers company GVR Energy S.A.S. (at 138 ° C) in order to reduce the energy consumption of the curing oven, since its heating operation is by means of 1200 Ohm electrical resistances (up to 120 ° C). Likewise, reduce the radiation from the drying oven that expels its combustion products into the environment and thus contribute to the improvement of the environment (about 22 tons of CO<sub>2</sub> equivalent are no longer emitted into the atmosphere). The development of the energy recovery system in the form of heat (cogeneration) documented in this degree work is made up of a theoretical framework necessary to base and establish a calculation methodology that allows the development of the design, in the project engineering the data collection and system variables, the shell and tube heat recovery unit is designed using the Logarithmic Mean Temperature (LMT) method, duct system design using the dynamic pressure drop, centrifugal fan selection, insulating lining, catalyst filter and selection of the other components of the installation. The construction plans are presented and as a result of the project, the costs of the system are presented (close to \$ 7,500,000), the return on investment (over 5 years) and a specific contribution of the design is the change of 2 resistors of 1100 W each (2, 2kW) by a heat recovery system and a resistance of 606 W and 20 W in a centrifugal fan (0.626 kW). Which are manifested in a saving in consumption of 70%.

**Keywords: (Drying oven, cogeneration, energy consumption, environment).**

# Contenido

Resumen.....	IX
Abstract.....	X
Lista de figuras.....	XII
Lista de tablas.....	XV
Lista de símbolos y abreviaturas.....	XVII
Introducción.....	XVIII
<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>20</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	20
1.2 Justificación .....	20
1.3 Objetivos del proyecto.....	21
1.3.1 Objetivo general .....	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 Transformadores GVR Energy S.A.S.....	21
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>25</b>
2.1 Cogeneración.....	25
2.1.2 Ventajas .....	26
2.1.3 Tipos de plantas para recuperación de calor .....	26
2.2 Maquinaria utilizada para instalaciones de recuperación de calor .....	30
2.2.1 Fuente de energía primaria .....	30
2.2.2 El elemento motor .....	31
2.2.3 Sistema de aprovechamiento o recuperación de calor .....	32
2.3 Ventiladores .....	34
2.3.1 Ventiladores centrífugos.....	34
2.4 Radio crítico de aislamiento .....	36
2.5 Gas natural.....	37
2.5.1 Combustión del gas natural .....	38
2.6 Control de emisiones contaminantes a la atmosfera .....	39
2.7 Factor de Emisión del Sistema Interconectado SIN.....	40
<b>3. Ingeniería del proyecto .....</b>	<b>42</b>
3.1 Recolección de datos.....	42
3.1.1 Caudal de productos de la combustión.....	43
3.1.2 Caudal de aire para el horno de curado.....	44
3.1.3 Temperaturas de operación.....	44
3.1.4 Localización de los equipos.....	45
3.2 Diseño y selección de equipos.....	46
3.2.1 Recuperador de calor .....	46
3.2.2 Diseño de ductos y selección de ventilador .....	50
3.2.3 Diseño del sistema de aislamiento en ductos. ....	56

---

3.2.4 Selección de filtro .....	57
3.2.5 Calculo de resistencia eléctrica .....	58
3.2.6 Calculo del CO2 equivalente .....	59
3.2.7 Sistema de control .....	60
<b>4. Operación y mantenimiento .....</b>	<b>63</b>
4.1 Seguridad general .....	63
4.2 Operación .....	63
4.3 Mantenimiento .....	65
4.3.1 Recuperador de calor .....	65
4.3.2 Ventilador centrifugo .....	66
4.3.3 Líneas de conducción de aire y gas .....	67
<b>5. Resultados .....</b>	<b>68</b>
5.1 Costo de la instalación .....	69
5.2 Balance energético .....	70
5.3 Disminución de la radiación .....	71
5.4 Recuperación de la inversión .....	72
<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>75</b>
6.1 Conclusiones .....	75
6.2 Recomendaciones .....	76

## Lista de figuras

<b>Figura 1.1</b> <i>Diagrama de procesos de Transformadores GVR Energy S.A.S.</i> .....	24
<b>Figura 2.1</b> <i>Cogeneración en la industria</i> .....	25
<b>Figura 2.2</b> <i>Eficiencia sistema de cogeneración</i> .....	26
<b>Figura 2.3</b> <i>Cogeneración con motor a gas</i> .....	27
<b>Figura 2.4</b> <i>Cogeneración con turbina de gas</i> .....	28
<b>Figura 2.5</b> <i>Cogeneración con turbina de vapor</i> .....	29
<b>Figura 2.6</b> <i>Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas y vapor</i> .....	30
<b>Figura 2.7</b> <i>Horno de secado</i> .....	31
<b>Figura 2.8</b> <i>Horno de secado desde el interior</i> .....	32
<b>Figura 2.9</b> <i>Diferentes tipos de recuperadores de calor</i> .....	33
<b>Figura 2.10</b> <i>Ventilador centrífugo</i> .....	34
<b>Figura 2.11</b> <i>Curva característica para selección de ventilador centrífugo</i> .....	35
<b>Figura 2.12</b> <i>Radio crítico de aislamiento en ducto circular</i> .....	36
<b>Figura 2.13</b> <i>Convertidor catalítico para control de emisiones de gases de combustión</i> ..	39
<b>Figura 3.1</b> <i>Horno de secado</i> .....	42
<b>Figura 3.2</b> <i>Horno de curado</i> .....	42
<b>Figura 3.3</b> <i>Localización de hornos en el edificio</i> .....	46
<b>Figura 3.4</b> <i>Intercambiador de tubo y coraza a contraflujo</i> .....	47
<b>Figura 3.5</b> <i>Arreglo de tubos cuadrado</i> .....	50
<b>Figura 3.6.</b> <i>Sistema de ductos recuperación de calor del horno de secado</i> .....	51
<b>Figura 3.7</b> <i>Presión dinámica, caudal y diámetro en conducciones tubulares</i> .....	52
<b>Figura 3.8</b> <i>Perdida de carga en conductos circulares, rígidos y flexibles</i> .....	53
<b>Figura 3.9</b> <i>Coefficientes n de pérdidas de carga codos</i> .....	54
<b>Figura 3.10</b> <i>Geometría del ventilador CFP 120</i> .....	55
<b>Figura 3.11</b> <i>Disposición del material aislante sobre el ducto</i> .....	57
<b>Figura 3.12</b> <i>Convertidor catalítico ATCC 0021 para control de emisiones</i> .....	58
<b>Figura 3.13</b> <i>Resistencia conectada en triangulo</i> .....	59
<b>Figura 3.14</b> <i>Diagrama de control con temporizador</i> .....	61
<b>Figura 3.15</b> <i>Elementos constitutivos del circuito de control</i> .....	61
<b>Figura 4.1</b> <i>Tablero de control sistema de recuperación de calor</i> .....	64
<b>Figura 5.1</b> <i>Sistema de recuperación de calor Transformadores GVR S.A.S</i> .....	68

**Figura 5.2** *Retorno a la inversión* ..... 74

## Lista de tablas

<b>Tabla 2.1</b> <i>Propiedades físicas y químicas del gas natural</i> .....	37
<b>Tabla 2.2</b> <i>Propiedades de los gases de combustión del gas natural</i> .....	38
<b>Tabla 3.1</b> <i>Flujo volumétrico de dióxido de carbono</i> .....	44
<b>Tabla 3.2</b> <i>Flujo volumétrico de aire para el horno de curado e intercambiador de calor</i> .	44
<b>Tabla 3.3</b> <i>Propiedades térmicas para el gas de combustión y para el aire atmosférico.</i>	48
<b>Tabla 3.4</b> <i>Datos para el cálculo del sistema de ductos</i> .....	51
<b>Tabla 3.5</b> <i>Datos para estimar espesor de material aislante</i> .....	56
<b>Tabla 5.1</b> <i>Costos instalación recuperación de calor de gases residuales del horno de secado</i> .....	70
<b>Tabla 5.2</b> <i>Calculo del consumo energético por mes sin recuperación de calor</i> .....	71
<b>Tabla 5.3</b> <i>Calculo del consumo energético por mes con recuperación de calor</i> .....	71
<b>Tabla 5.4</b> <i>Retorno a la inversión VAN</i> .....	73



## **Lista de Símbolos y abreviaturas**

$\rho$ : Densidad ( $\text{Kg/m}^3$ ), la relación entre el volumen y la masa de la materia

C: Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), flujo de volumen sobre unidad de tiempo

Q: Calor (kW), energía en forma de calor

dT: Diferencia de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

A: Área ( $\text{m}^2$ ), sobre unidad de superficie

$D_H$ : Diámetro hidráulico (m), equivalente en ductos no circulares

Pot: Potencia (kW), energía por unidad de tiempo

P: Presión (Pa), relación entre la fuerza y el área

Pat: Presión atmosférica (Pa), presión del aire en el sitio del proyecto

n: Eficiencia (%), rendimiento mecánico, volumétrico, térmico o total de un sistema

Re: Numero de Reynolds, numero adimensional

Nu: Numero de Nusselt, numero adimensional

h: Coeficiente convectivo

## INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta enfrenta cambios negativos en los aspectos económicos, sociales y ambientales debido al exceso en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), la utilización elevada de energías tradicionales basadas en combustibles fósiles, así como por la explotación indiscriminada de los recursos naturales para diferentes usos. Estas malas acciones han generado impactos en el medio ambiente que en algunos casos es irreversible, tales como la desertificación, la migración de las sociedades más vulnerables a zonas pobladas, pérdida de ecosistemas, etc., y otros impactos que aún son reversibles con el tiempo y con el compromiso de la comunidad internacional, tales como el cambio climático y el agujero en la capa de ozono.

A partir de diferentes acuerdos internacionales de los cuales Colombia ha sido parte, tales como la Convención marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) se ha establecido una serie de medidas sectoriales con miras a lograr ciertas metas referentes a disminuir las emisiones de GEI, dentro de estas medidas el sector industrial y productivo de los gobiernos firmantes se comprometen entre otros aspectos a diversificar las fuentes de energía por sistemas alternativos renovables y más limpios, aumentar la eficiencia en los procesos productivos para disminuir las emisiones y los consumos energéticos.

Colombia ha elaborado una serie de medidas ambientales y económicas tales como la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) y la Estrategia nacional REDD+ que buscan desligar el aumento de las emisiones de GEI del desarrollo económico, por medio de medidas sectoriales de mitigación (UPME, 2019). También aparecen los beneficios tributarios establecidos por la Ley 1715 del 2004 que propician un entorno ideal para el desarrollo de pequeños y grandes proyectos basados en energías renovables y aumento de la eficiencia en procesos productivos entre otras medidas.

Las acciones inmediatas deben ser tomadas por iniciativa de las propias empresas del sector terciario a la cual pertenece Transformadores GVR Energy S.A.S de la ciudad de Ibagué, la cual se dedica a la fabricación y mantenimiento principalmente de transformadores eléctricos de baja, mediana y alta potencia. En el proceso de secado y curado se emplea gas natural y energía eléctrica respectivamente, presentándose un desperdicio de energía en forma de calor en los gases de combustión del horno de secado los cuales son arrojados a la atmosfera con las correspondientes consecuencias ambientales y energéticas.

En este sentido y tomando conciencia tanto de los aspectos ambientales como de eficiencia energética el autor de este trabajo le ha planteado a la empresa Transformadores GVR Energy S.A.S de la ciudad de Ibagué, aprovechar esta energía mediante un sistema de recuperación de calor.

Mediante el diseño y selección de los diferentes elementos que conforman un sistema de recuperación de calor a partir de gases de combustión del gas natural del horno de secado y un balance energético se puede confirmar que es posible disminuir la contaminación atmosférica y aumentar la eficiencia en el proceso.

El tema elegido (Diseño de un sistema de aprovechamiento de calor residual generado en el horno de secado de la empresa transformadores GVR Energy S.A.S. localizada en la ciudad de Ibagué) sirve para establecer una metodología de diseño desde la ingeniería considerando adicionalmente un aporte significativo al balance económico de la empresa y sobre todo hacia el medio ambiente.

## **1. GENERALIDADES**

En este primer capítulo se presenta el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos propuestos para resolver el problema de ingeniería que surge a partir de la necesidad de reducir costos por consumo de energía y emisiones contaminantes en uno de los hornos utilizados en el proceso de producción de transformadores eléctricos en la empresa GVR Energy S.A.S de la ciudad de Ibagué.

### **1.1 Planteamiento del problema**

Al momento de encender el horno de secado para eliminar la humedad de la parte activa, se establecen los parámetros de normatividad estándar como son: la temperatura a la cual debe estar el horno de secado que es 150° C para que la parte activa no sufra esfuerzos mecánicos ni daños y el tiempo que se establece en 24 horas cuando el transformador es de alta potencia (a partir de 500 KVA), para que termine el ciclo de proceso de secado. El proceso en el horno de curado dura aproximadamente unas 5 horas máximo y se puede realizar de forma paralela al secado a máximo 120°C.

El calor residual liberado a la atmosfera por el horno de secado genera impactos ambientales negativos y al mismo tiempo, esta energía térmica es desperdiciada, surge pues la pregunta de investigación: ¿Es posible diseñar un sistema electromecánico para el aprovechamiento térmico de los gases de combustión del horno de secado?

### **1.2 Justificación**

Mejorar la eficiencia en los procesos e implementar nuevas fuentes de energía son algunas de las formas como las empresas se comprometen para lograr las metas de reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y otro tipo de emisiones contaminantes al medio ambiente y lograr los objetivos propuestos por el país en relación a los compromisos que la nación tiene frente al COP21 y otros acuerdos internacionales. En la actualidad la empresa GVR Energy S.A.S emite en uno de sus procesos aire caliente que sale por la chimenea del horno de secado el cual se está desperdiciando, el propósito de este

proyecto es aprovechar ese calor residual y transportarlo al horno de curado por medio de un sistema de recuperación de calor y disminuir el consumo energético del horno de curado en al menos un 60%. También se busca disminuir el impacto ambiental ya que la radiación del horno de secado y el material particulado son expulsados a la atmosfera sin tratamiento alguno.

### **1.3 Objetivos del proyecto**

Una vez presentado el problema y para dar respuesta a la pregunta de investigación se han planteado una serie de objetivos general y específicos que se presentan a continuación:

#### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema de aprovechamiento de calor residual generado por el horno de secado de la empresa transformadores GVR Energy S.A.S. Localizada en la ciudad de Ibagué

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Indagar sobre los aspectos fundamentales relacionados con la recuperación de calor para comprender y establecer los equipos y parámetros necesarios para el diseño del sistema.
- Recolectar los datos necesarios para el diseño y selección de los diferentes elementos del sistema y su posterior fabricación mediante planos de fabricación y montaje.
- Entregar un procedimiento de recuperación del calor residual, para su aplicación en el proceso.
- Presentar balance de ahorro energético.

### **1.4 Transformadores GVR Energy S.A.S.**

En la empresa transformadores GVR Energy S.A.S. localizada en la ciudad de Ibagué se fabrica, repara y hace mantenimiento de transformadores de potencia y de distribución. A

continuación se describirá el proceso efectuado durante el mantenimiento que reciben los equipos en la empresa:

En una primera etapa se hace la recepción e inspección inicial del transformador utilizando un diferencial de 5 toneladas, Megger de 5.000 voltios, TTR, Gato Hidráulico y una serie de formatos de recibo.

El siguiente paso es desencube, desarmado del transformador y limpieza de la parte activa; se dispone de herramientas manuales y mecánicas las cuales son: bomba para vaciado de aceite, recipiente para toma de muestra de aceite, brochas, alcohol industrial para limpieza de las bridas o prensas, para la limpieza de las bobinas y caretas de protección para los gases, aceite usado para limpieza. El coordinador de producción o los auxiliares correspondientes al área de desencube, previamente socializada la información de trabajos a realizar, para dicha labor utilizan la plataforma "EVOLUTION" en la cual se registran el estado en que se encuentran las partes: bujes, terminales, conmutador, tuercas y tornillos de herrajes, válvula de presión, bobinas, núcleo, soportes del núcleo, prensa de núcleo, protección, etc.

En un tercer paso, se procede a probar el transformador fase-fase o fase-neutro ya sea en transformadores monofásicos o trifásicos, si visualmente no se determina el daño, se utiliza un transformador de variables con un rango aproximado de 0 – 150 VAC, para verificar el funcionamiento del mismo, si al aplicar el voltaje no se observa una medición de corriente en los bornes de salida de la fuente variable, corresponde a que la bobina no se encuentra en corto, para tener una buena conclusión y decisión y brindar un diagnóstico de cuál es el daño del transformador e identificar bien las bobinas o la bobina, es necesario tener como base dos pruebas más, relación de transformación (TTR) y ensayo de corto circuito, para tomar carga en los bornes de baja tensión y descartar bobinas abiertas. El Coordinador de producción debe confirmar que el núcleo puede ser rearmado en la dimensión, forma y el entrehierro originales. Evitar adherencia de elementos extraños en el núcleo y almacenar adecuadamente. El objetivo de esta inspección es saber si el transformador está en buenas o malas condiciones y así determinar si se debe reparar o simplemente hacer un mantenimiento preventivo.

Seguidamente se realiza el manejo y corte de papeles y cartones aislantes. Se hace para cortar la fibra presspan Rombo epóxico exacto y los cartones presspan aislantes de acuerdo al tipo de bobina que se va a reproducir. Esta parte del proceso la realizan los

auxiliares de acuerdo a las instrucciones del Coordinador de producción. Posteriormente se elaboran las bobinas y se lleva un control de materiales. Esta parte del proceso tiene como objeto reproducir las bobinas quemadas de acuerdo a su programación original. La realiza el Coordinador de producción con apoyo de los técnicos.

El curado, prensado y secado de bobinas, con el fin de la adherencia del alambre conductor al papel rombo epóxico. La realiza el auxiliar con la supervisión del Coordinador de producción. Introducir las bobinas así prensadas dentro del horno de secado y dejarlas a 105° C durante tres horas. Retirar bobina del horno y dejar que la temperatura disminuya para evitar que la bobina se vuelva a expandir como estaba originalmente antes de entrar a curado donde se quita la humedad de los aisladores, de los flejes de cobre o aluminio a 120°C durante 3 horas, retirar las prensas y almacenarlas para la siguiente etapa de armado de la parte activa.

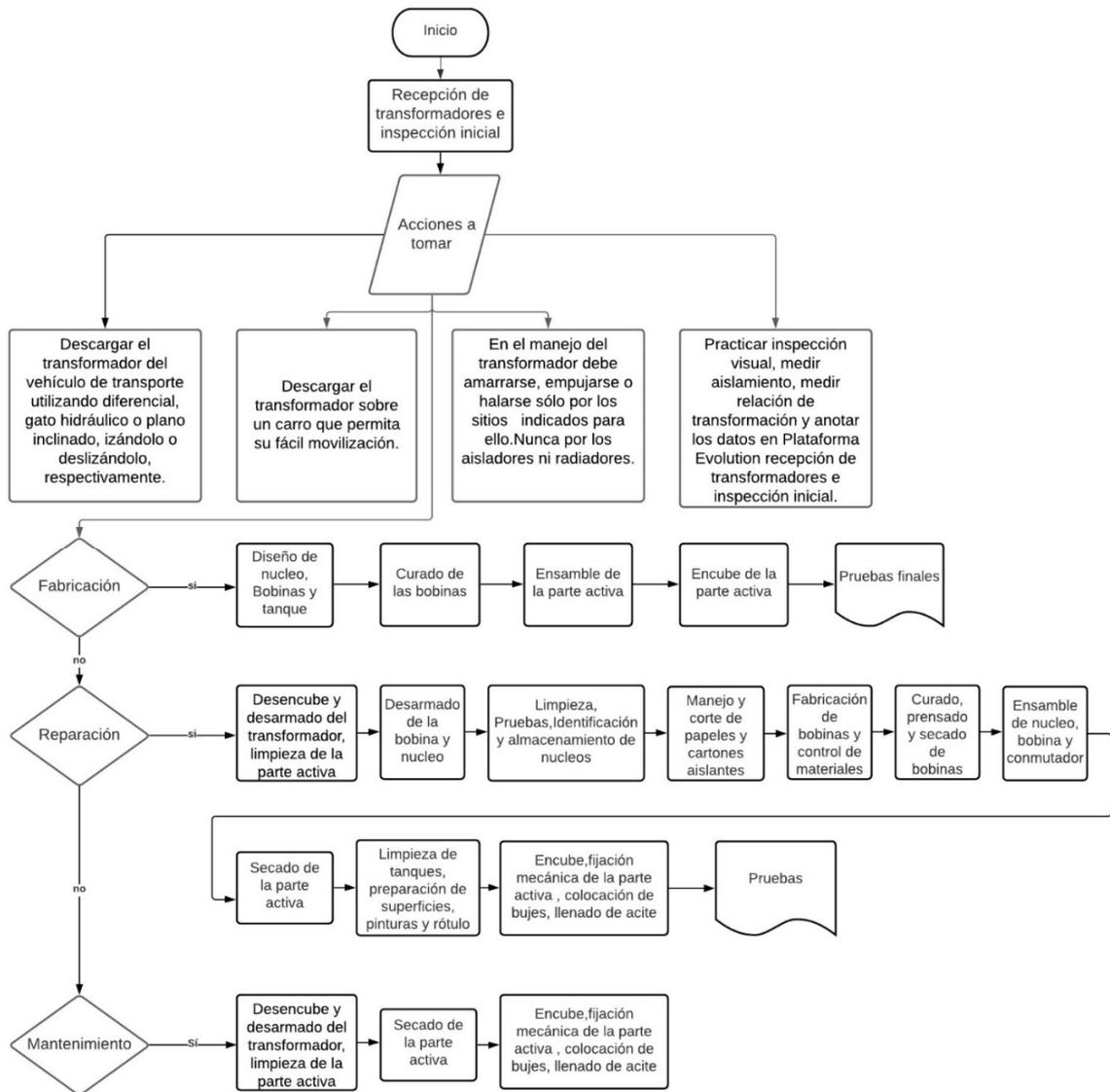
Después sigue el ensamble de núcleos, bobina y conmutador, Esta parte del proceso se realiza para armar el núcleo, bobinas, la instalación del conmutador, accesorios y cerramiento del núcleo. Una vez armada la parte activa, debe ser llevada al horno de secado donde se someterá a un proceso de secamiento a 150° C aproximadamente de 18 a 30 horas dependiendo de la capacidad y tensiones nominales del transformador, para el caso de transformadores de serie 15/13.2 aproximadamente 14 horas y para transformadores con serie 15/34.5 aproximadamente 48 horas y así eliminar la humedad de la parte activa. Lo supervisa el Coordinador de producción con apoyo de los auxiliares.

Por último, se arma el transformador, introduciendo la parte activa a la cuba que es el recipiente donde va situada y posteriormente se conectan terminales de baja tensión a sus herrajes correspondientes y bujes de alta tensión en los huecos de la tapa con sus respectivos empaques.

En el proceso de producción de la empresa transformadores GVR Energy S.A.S. mencionado anteriormente se emplean dos hornos, uno de secado con fuente de alimentación con gas propano y otro para curado con fuente de alimentación con corriente eléctrica. El horno de secado en el proceso que realiza libera energía en forma de calor que posteriormente es expulsado por medio de una chimenea donde circula aire y es arrojado al medio ambiente. Siguiendo con el horno de curado en su proceso es calentado por resistencias eléctricas (Ohm), inyectando voltaje (V). En este caso es zona industrial

el voltaje con el que trabaja es 440 V. El consumo energético de dicho horno es elevado por las horas de trabajo. En la figura 1.1 se presenta el flujograma de proceso de la empresa.

**Figura 1.1** Diagrama de procesos de Transformadores GVR Energy S.A.S.



Nota: fuente gerencia Transformadores GVR Energy S.A.S.

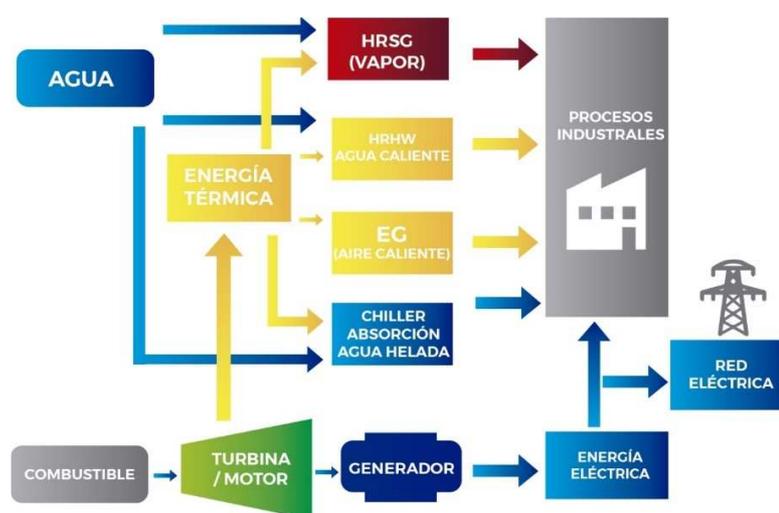
## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan algunos aspectos fundamentales para comprender y establecer los equipos y parámetros necesarios para un posterior diseño del sistema de aprovechamiento de calor residual, se inicia definiendo cogeneración, intercambiadores de calor, ventiladores, filtros y ecuación de continuidad.

### 2.1 Cogeneración

Existen en la actualidad diferentes procedimientos para obtener de forma simultánea variados tipos de energía, de tal manera que desde una fuente primaria es posible derivar otras con aplicaciones igualmente variadas. Inicialmente se habla de cogeneración cuando se aprovechó a partir del calor residual de los procesos de combustión en motores y calderas para producir energía eléctrica o térmica. Adicionalmente si es aprovechada esta fuente primaria de energía en una tercera forma se le denomina trigeneración. Cuando en el proceso de recuperación de energía se captan las emisiones de dióxido de carbono se le denomina cuatrigeneración. Durante el procedimiento es posible obtener energía mecánica denominándose esta tetra generación. En la figura 2.1 se puede observar como a partir de una fuente primaria de energía (combustible) se aprovecha el calor residual producido en la combustión como fuente de energía térmica y eléctrica.

**Figura 2.1** *Cogeneración en la industria*

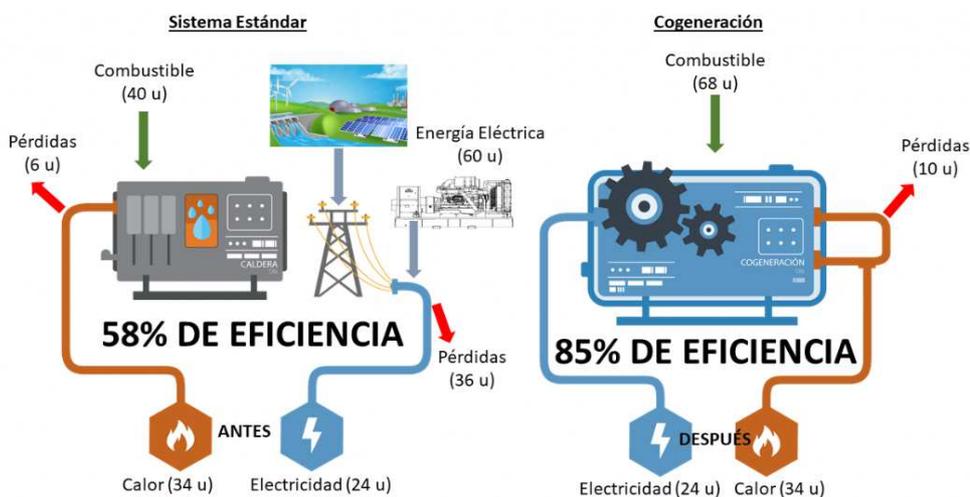


Nota: Diferentes formas de cogeneración. Adaptado de [https://cdn.shortpixel.ai/client/q\\_glossy,ret\\_img,w\\_830,h\\_460/https://www.tecnoloblog.com/wp-content/uploads/2019/12/ciclo-combinado-cogas.jpg](https://cdn.shortpixel.ai/client/q_glossy,ret_img,w_830,h_460/https://www.tecnoloblog.com/wp-content/uploads/2019/12/ciclo-combinado-cogas.jpg)

### 2.1.2 Ventajas

La principal ventaja de aprovechar la energía residual de los procesos industriales es el aumento de la eficiencia energética en la planta, pues a partir de una única fuente es posible derivar otras, disminuyendo o supliendo sistemas individuales por un solo sistema central de tal manera que se aprovecha el calor, la energía mecánica y la eléctrica en un único proceso, en lugar de emplear un generador o la energía suministrada por una central eléctrica convencional. En la figura 2.2 se muestra como en una planta convencional la eficiencia alcanza hasta un 58%, mientras que en un sistema con recuperación por cogeneración la eficiencia energética alcanza el 85%, lo que representa beneficios económicos y ambientales.

**Figura 2.2** Eficiencia sistema de cogeneración



Nota: Eficiencia en un sistema de cogeneración. Adaptado de <https://img2.freepng.es/20180502/fwe/kisspng-cogeneration-energy-conservation-efficiency-tecnico-residual-5ae95286637112.7031960515252404544073.jpg>

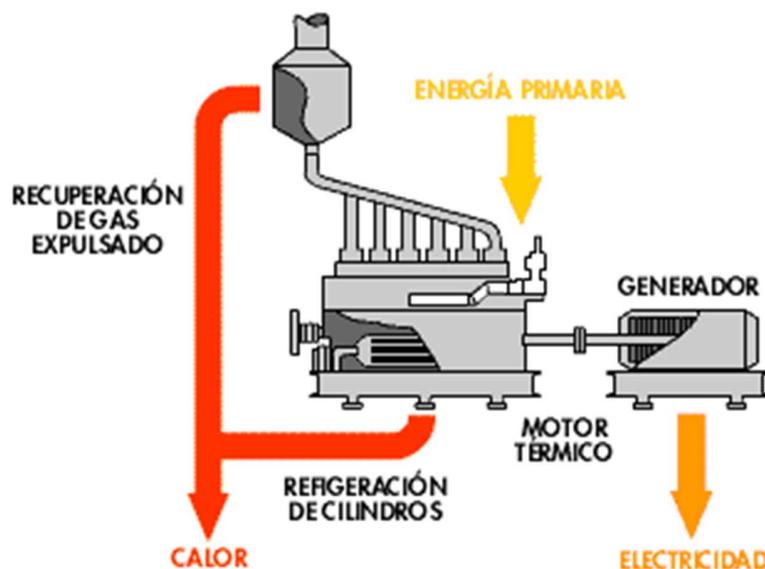
### 2.1.3 Tipos de plantas para recuperación de calor

En general los sistemas de recuperación de energía lo hacen a partir del calor de desecho producido durante el mecanismo de combustión en diferentes elementos motrices los cuales pueden ser motores, turbinas, calderas u hornos. De allí se clasifican los diferentes tipos de plantas de cogeneración. A continuación se presentan los más típicos no olvidando que el quemado de combustible (gas natural para el presente proyecto) en un horno tiene los mismos principios aquí expuestos.

- Cogeneración con motor de gas (alternativos)

La fuente primaria de energía es gas, gasóleo o fuel-oíl. Se caracterizan porque su eficiencia eléctrica es elevada frente a la eficiencia térmica. El sistema de recuperación de energía en forma de calor es diseñado en función de las necesidades de la industria y en general se fundamentan en la producción de vapor a baja presión (por debajo de los 10 bares), precalentamiento de aceite y en la recuperación de calor del circuito de alta temperatura del agua del sistema de refrigeración del motor. Igualmente estos sistemas de cogeneración son adecuados para la generación de frío por el método de absorción, por medio del vapor generado con los gases en máquinas de doble efecto, o utilizando directamente el calor del agua de refrigeración en máquinas de simple efecto. Estas plantas son utilizadas cuando la potencia es baja, alrededor de los 15 MW cuando el indicador energético asociado a la generación eléctrica tiene alto valor. Los motores son la maquina térmica con mayor rendimiento, cerca de un 45% de la energía contenida en el combustible se convierte en energía eléctrica, sin embargo se espera que hacia el futuro esta eficiencia aumente.

**Figura 2.3** Cogeneración con motor a gas



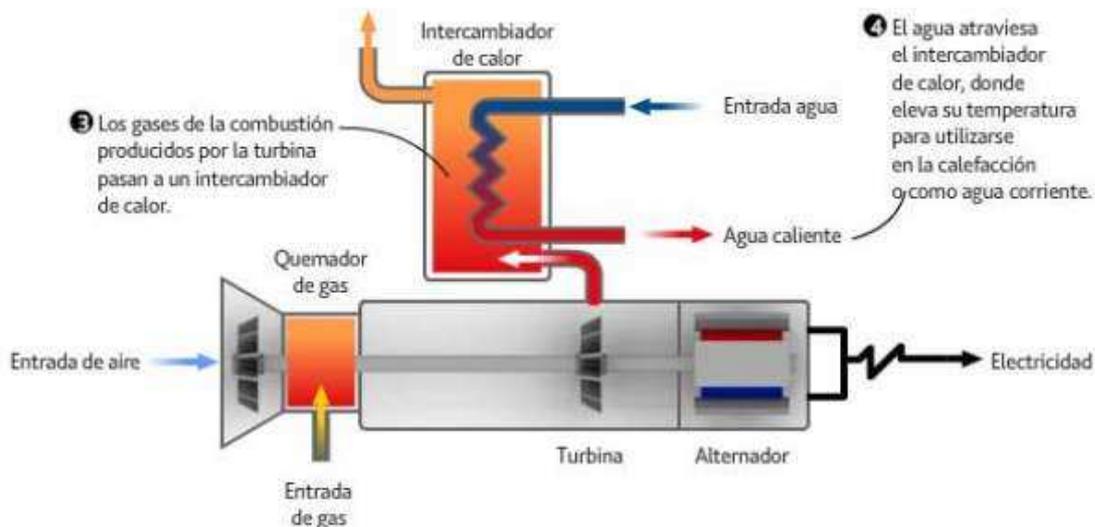
Nota: Energías renovables. Cogeneración Adaptado de <https://lidiaperezrubio.wixsite.com/arquitecturayenergia/single-post/2016/08/12/energ%C3%ADas-renovables-4-cogeneraci%C3%B3n>

- Cogeneración con turbina de gas

Al igual que la cogeneración con motor de gas, la fuente primaria se quema pero en este caso lo hace en un turbogenerador. La mayor proporción se convierte en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica gracias a un alternador. Existe entonces la presencia de eficiencia térmica, mecánica y eléctrica en el proceso de transformación. Por tal motivo el rendimiento está por debajo de los motores alternativos. La ventaja de estos sistemas reside en la facilidad de recuperación de calor pues la energía se encuentra mayormente concentrada en los gases de escape, que en general se encuentra a unos 500°C, mientras en los motores alternativos parte del calor se pierde en el propio sistema de refrigeración del motor y por fricción de los componentes mecánicos. Estos sistemas son empleados para la producción de vapor en una caldera de recuperación.

Se pueden disponer en diferentes ciclos termodinámicos, sin embargo cuando lo hacen en un ciclo simple, es decir, una turbina y una caldera de recuperación, se genera vapor a la presión del proceso en la planta de cogeneración, otra ventaja es cuando el flujo másico de vapor es considerable, superior a las diez toneladas hora lo cual es común en la mayoría de industrias. Por ser un sistema relativamente simple, son fiables lo que redunda en un pronto retorno a la inversión.

**Figura 2.4** Cogeneración con turbina de gas



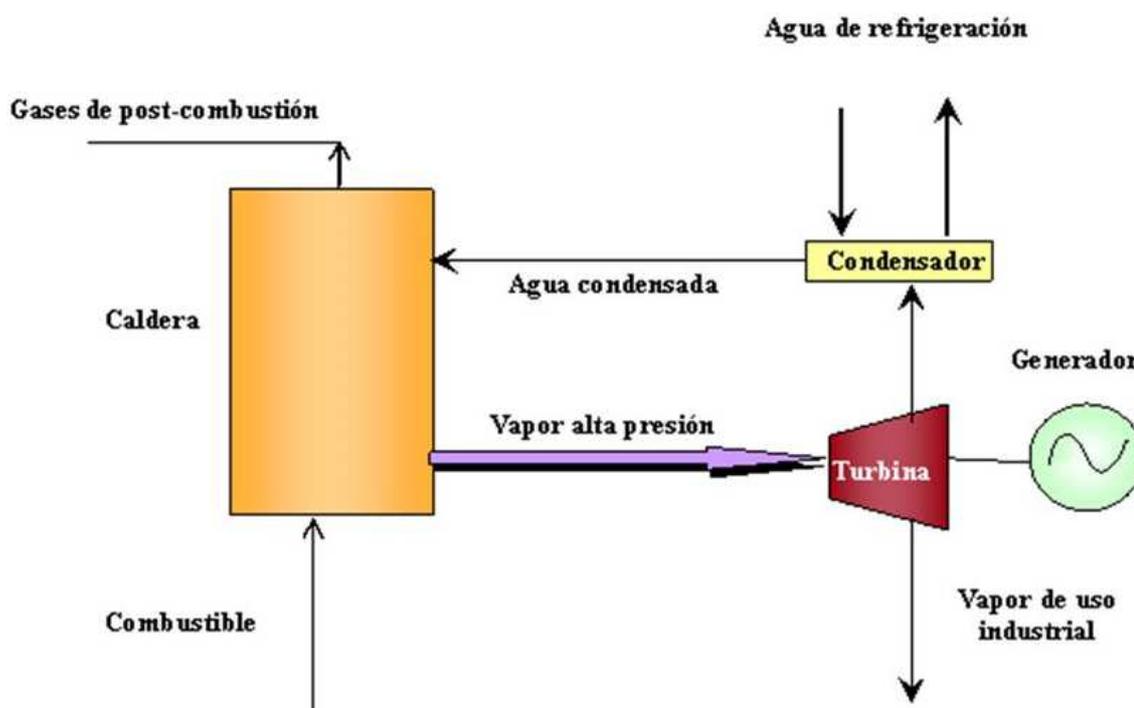
Nota: Soluciones eficiencia energética. Adaptado de <https://www.certificadosenergeticos.com/micro-cogeneracion-viviendas-generar-agua-caliente-electricidad>

- Cogeneración con turbina de vapor

En ciclos termodinámicos combinados hace su aparición este sistema de cogeneración con turbina de vapor, el calor de alta presión generado en una caldera es suministrado a una turbina la cual convierte esta energía térmica en energía mecánica y está a su vez en energía eléctrica, el vapor que sale a baja presión pero aun con cierta temperatura de la turbina es recuperado y aprovechado en otros procesos dentro del mismo ciclo o para otros procesos en la planta.

En dependencia de la presión a la salida de la turbina estas se clasifican a contrapresión o condensación (presión por encima de la atmosférica, presión por debajo de la atmosférica respectivamente). Para ambos tipos es posible disponer de salidas intermedias y extracciones, haciendo posible la utilización en proceso a diferentes niveles de presión.

**Figura 2.5** Cogeneración con turbina de vapor

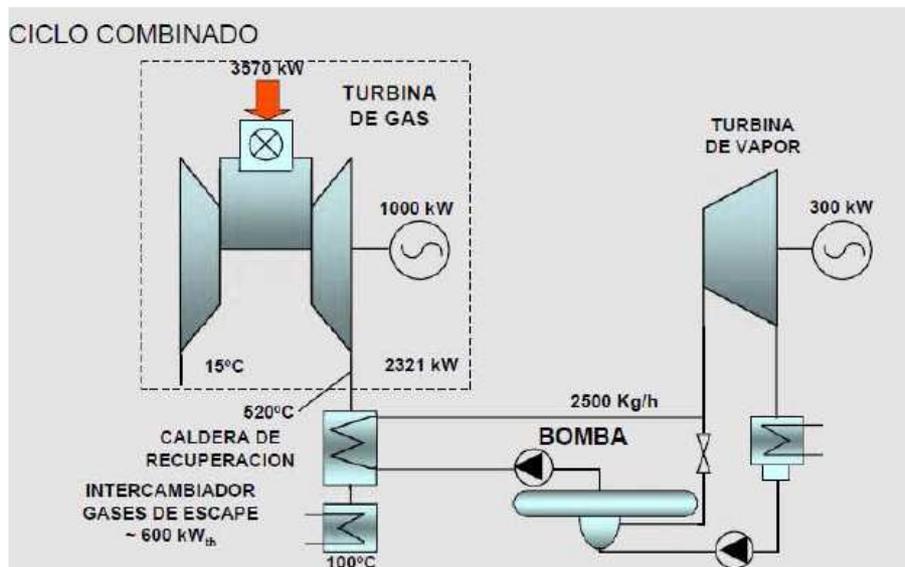


Nota: Cogeneración (Cualtero, sin fecha). Adaptado de <https://slideplayer.es/slide/122520/>

- Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas y vapor

El ciclo combinado consiste en el empleo simultáneamente de una turbina de gas y una de vapor. En la figura 2.6 se puede observar que los gases de la combustión pueden liberarse a la atmosfera, sin embargo se aprovechan en una caldera de recuperación para generar vapor a alta presión que posteriormente es introducido a la turbina de vapor donde se expande, es condensado y retorna al ciclo cerrado de la turbina de vapor generando durante el proceso energía eléctrica en el generador.

**Figura 2.6** Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas y vapor



Nota: El problema de la energía. Capítulo 2. Centrales térmicas convencionales. Adaptado de <https://xfma.wordpress.com/2013/01/23/el-problema-de-la-energia-centrales-termicas-convencionales-capitulo-3/>

## 2.2 Maquinaria utilizada para instalaciones de recuperación de calor

En términos generales los sistemas de cogeneración están compuestos por unos elementos básicos que se describen a continuación:

### 2.2.1 Fuente de energía primaria

Se define por fuente de energía primaria a aquella de la cual se extrae energía mediante un primer proceso o etapa, generalmente son combustibles fósiles o biomasa la cual contiene energía en forma química, que al ser sometido a procesos de oxidación

libera calor durante la transformación. Suele presentarse como gas, líquido o sólido. El vapor se considera una fuente secundaria al ser el resultado de un proceso previo.

### 2.2.2 El elemento motor

Es todo mecanismo que convierte la energía química del combustible en energía térmica o mecánica. En dependencia del tipo de planta hablamos de motores alternativos, turbinas, hornos y calderas. Se encuentran con diferentes ciclos, tales como el Diésel, Rankine, Otto, Stirling entre otros. En la figura 2.7 se presenta una vista exterior del horno de secado, se aprecia la línea de alimentación de gas (sobre la pared izquierda) y la chimenea para evacuación de gases de combustión. En la figura 2.8 una vista interna del horno.

**Figura 2.7** *Horno de secado*



**Figura 2.8** Horno de secado desde el interior

### 2.2.3 Sistema de aprovechamiento o recuperación de calor

Dependiendo del tipo de planta y la fuente de calor se pueden clasificar en calderas recuperadoras de calor de gases de escape, intercambiadores de calor, o incluso unidades de absorción que producen frío a partir de este calor de bajo rango. Para el caso presentado se requiere de un recuperador de calor a partir de gases de escape, en este sentido se pueden presentar diferentes configuraciones:

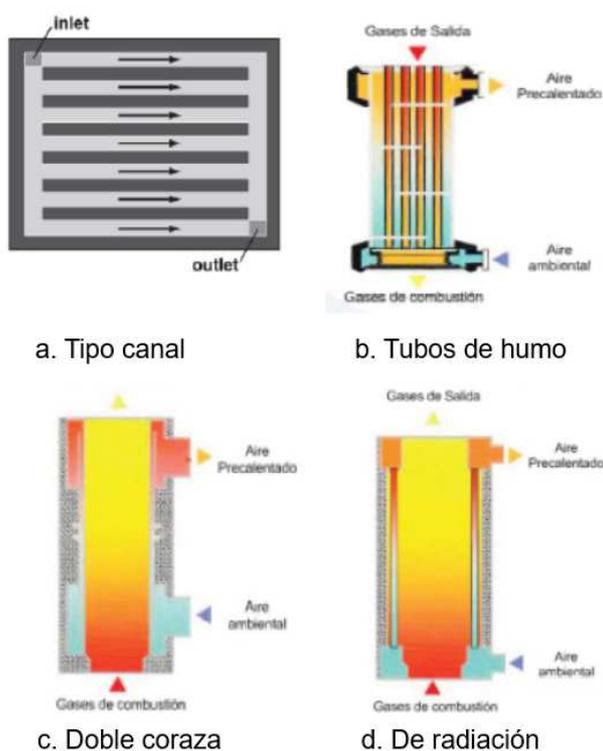
**Recuperadores tipo canal.** Se instalan dentro del ducto de salida de los gases de escape del proceso, está formado por hileras de canales en acero por los que pasa el aire a precalentar. En la figura 2.9a se observa uno de este tipo.

**Tipo tubos de humo.** El gas de salida del proceso de combustión pasa por entre el haz de tubos, el aire a ser precalentado por entre la coraza y el exterior del haz de tubos recuperando la energía en forma de calor, es similar al intercambiador tipo tubos y coraza. Figura 2.9 b.

**Recuperador de doble coraza.** Es básicamente una construcción concéntrica entre dos tubos, en este caso los gases de combustión circulan por la coraza interior, mientras el aire a ser precalentado circula por entre las dos corazas. Figura 2.9c

**Recuperador de radiación.** La coraza interior es reemplazada por una jaula de tubos y se aprovecha el mecanismo de transferencia por radiación de una forma más eficiente, se emplean en hornos de forjado, industria del vidrio y cerámica. En la figura 2.9d se puede observar un recuperador de este tipo.

**Figura 2.9** Diferentes tipos de recuperadores de calor



Nota: Sistemas de recuperación de calor. Adaptado de <https://www.mundohvacr.com.mx/2014/06/sistemas-de-recuperacion-de-calor/>

## 2.3 Ventiladores

Cuando el fluido de trabajo es un gas, la turbomáquina se define como ventilador o compresor en dependencia de la presión a la cual se encuentre el fluido a la entrada y principalmente a la salida del dispositivo, para el caso de los ventiladores según la presión total desarrollada se pueden clasificar de baja presión (inferior a 10 mbar), media presión (superior a 10 y por debajo de 30 mbar) y de alta presión (superior a 30 e inferior a 100). Por encima de estas presiones se denominan compresores y la compresibilidad del gas no se puede despreciar (Mataix, 1986). Igualmente, los ventiladores se pueden clasificar de acuerdo al sentido de entrada y salida del gas de la máquina en: axiales, cuando el gas entra y sale de forma paralela al eje motriz del dispositivo y en centrífugos cuando el fluido ingresa paralelo al eje pero su salida se perpendicularmente (tangencial). Para aplicaciones de recuperación de calor los ventiladores empleados son centrífugos por sus características de caudal, presión, nivel sonoro, montaje en ductos, etc.

### 2.3.1 Ventiladores centrífugos

Se encuentran con las aspas dispuestas en diferentes inclinaciones, radiales, de curvatura al frente, de curvatura inversa y aerodinámicas. Sus rendimientos son variados, así como sus aplicaciones. En la figura 2.10 se puede observar los elementos constitutivos y características de un ventilador centrífugo.

**Figura 2.10** Ventilador centrífugo



Nota: Ventilador centrífugo de alta presión. Adaptado de Sogomar. [https://es.made-in-china.com/co\\_sogomar-2017/product\\_9-19-High-Pressure-Centrifugal-Blower-Fan-for-Exhausting-and-Ventilating\\_rnuihuog.html](https://es.made-in-china.com/co_sogomar-2017/product_9-19-High-Pressure-Centrifugal-Blower-Fan-for-Exhausting-and-Ventilating_rnuihuog.html)

Las principales variables en la selección de un ventilador centrífugo son:

Caudal **C**: se define como la masa de aire que desplaza en la unidad de tiempo, se puede expresar en  $\text{m}^3/\text{h}$  o Pies Cúbicos por Minuto (CFM).

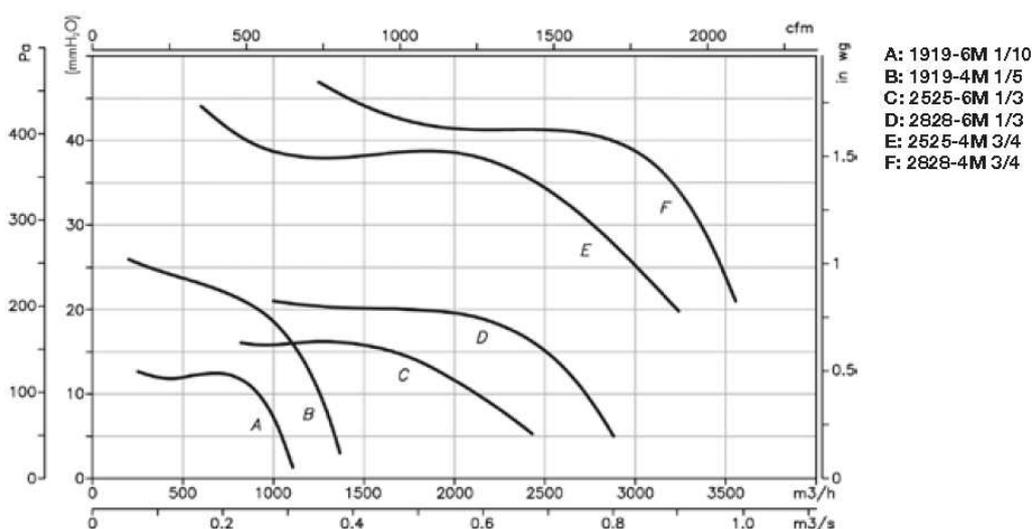
Presión dinámica **Pd**: El aire ejerce una fuerza sobre el área de sección del ducto que lo conduce y en su misma dirección, es la presión que sentimos cuando sacamos la mano por una ventanilla del auto cuando este se desplaza a cierta velocidad. Siempre es positiva.

Presión estática **Pe**: El aire es conducido por ductos y este ejerce una fuerza sobre dichas paredes, es decir es la fuerza perpendicular al flujo de aire en un ducto, puede ser positiva o negativa.

Presión total **Pt**: la resultante de la suma de las presiones dinámicas y estáticas, se emplea como unidad de medida los milímetros de columna de agua (mmH<sub>2</sub>O) o los pascales (Pa).

Una vez establecida las variables es posible ingresar a un diagrama con las curvas características del equipo para su selección. La figura 2.11 presenta un diagrama de este tipo para un ventilador centrífugo.

**Figura 2.11** Curva característica para selección de ventilador centrífugo.



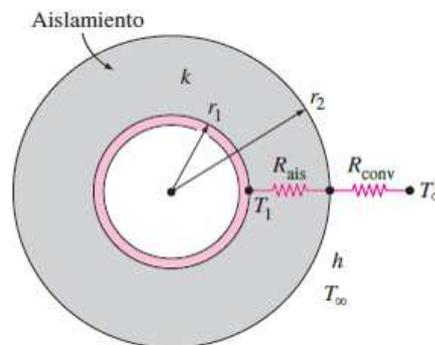
Nota: adaptado de CJBC Ventiladores centrífugos de baja presión.

[https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/CT02\\_baja\\_presion\\_2011ES.pdf](https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/CT02_baja_presion_2011ES.pdf)

## 2.4 Radio crítico de aislamiento

Imaginemos una pared plana cuya cara transversal al flujo de calor permanezca constante, entre mayor sea el grosor de la pared mayor será la resistencia que este ofrezca al flujo de energía en forma de calor por el mecanismo de conducción, aunque la transferencia de calor por convección entre la superficie de esta pared y el medio circundante se incremente o disminuya. Para un cilindro debe existir un punto de equilibrio, pues con el aumento de radio del elemento (espesor de la pared) aumenta la resistencia al flujo de calor por conducción, pero el cilindro aumenta su área de superficie de contacto con el medio y se puede incrementar la velocidad de flujo de calor por convección. Cuando se determina el radio crítico de aislamiento ( $R_c$ ) se busca finalmente es un espesor o radio mínimo a partir del cual al incrementar la película de material aislante no se aumente la flujo de calor por convección. En un análisis de  $R_c$  solo se considera la conducción para el material aislante y la convección externa, entonces el flujo de calor del sistema se puede representar mediante las siguientes ecuaciones para la figura 2.12.

**Figura 2.12** Radio crítico de aislamiento en ducto circular



Nota: adaptado de Tubo cilíndrico aislado expuesto a la convección desde la superficie exterior y la red de resistencias térmicas asociadas con él. (Cengel, 2008)

$$Q = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{ais} + R_{conv}}$$

Donde:

$T_1$ : Es la temperatura sobre la superficie interna del material aislante

$T_\infty$ : Temperatura fluido exterior

$R_{ais}$ : Resistencia térmica del material aislante por conducción  $\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi kL}$

$R_{conv}$ : Resistencia térmica del material aislante por convección  $\frac{1}{2\pi h_2 L r_2}$

Sustituyendo en la ecuación de calor del sistema de la figura 2.12 y considerando que el radio crítico es un valor máximo (pendiente cero), la expresión que se emplea para determinar el radio  $r_2$  a partir del cual el aislamiento térmico comienza a ser funcional se expresa como:

$$r_c = \frac{k_{ais}}{h_{\infty}}$$

## 2.5 Gas natural

Es un compuesto químico (Hidrocarburo) que se presenta de manera natural en yacimientos generalmente junto al petróleo en estado gaseoso formado principalmente por Metano hasta un 97% (CH<sub>4</sub>), dentro de sus características físicas es más liviano que el aire (entre un 35 y 40%), incoloro e insaboro. En la tabla 2.1 se presentan algunas propiedades físicas y químicas del gas natural empleado como combustible en el horno de secado en industrias GVR.

**Tabla 2.1** *Propiedades físicas y químicas del gas natural*

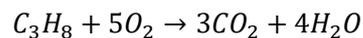
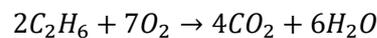
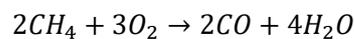
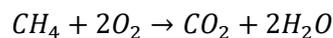
Propiedad	Propiedades físicas y químicas			
Fórmula química	CH <sub>4</sub>			
Peso molecular	18,2			
Relación de expansión	1 litro de líquido se convierte en 600 litros de gas			
Solubilidad en agua	Ligeramente soluble de 0,1 a 1%			
Composición del gas natural	Metano CH <sub>4</sub> 91%	Etano C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 6%	Propano C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> 0,3%	Nitrógeno N <sub>2</sub> 0,8%
Densidad a 15°C y 1 atmosfera de presión	0,737 kg/m <sup>3</sup>			
Poder calorífico superior PCS	11,98 kWh/Nm <sup>3</sup>			
Poder calorífico inferior PCI	10,83 kWh/Nm <sup>3</sup>			

Nota: adaptado de ¿Que es gas natural?, fuente: <https://preciogas.com/instalaciones/gas-natural/composicion>

### 2.5.1 Combustión del gas natural

Para que se presente combustión se requiere de oxígeno, calor y el combustible (gas en este caso), la proporción debe ser la correcta principalmente en la relación aire-gas, la cual debe contener entre un 4,5% y un 14,5% de gas en la mezcla, si se sobrepasa esta razón tampoco existirá combustión, la proporción ideal para una combustión optima es de 10% de gas natural y 90% de aire (METROGAS, 2021).

El gas natural presenta una estructura molecular más simple que la de otros gases por lo cual es preferido frente a otros combustibles fósiles, pues como resultado del proceso de combustión no se producen partículas sólidas ni azufre, perjudiciales para el medio ambiente, sin embargo se libera dióxido de carbono y otros óxidos perjudiciales para el ambiente. De la composición del gas natural presentada en la tabla 2.1, al presentarse la combustión el resultado son una serie de reacciones químicas que son presentadas de manera individual, teniendo en común que el producto de la combustión es mayoritariamente dióxido de carbono. (Villaflor , Morales, & Velasco, 2008)



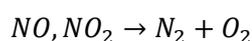
La tabla 2.2 presenta algunas de las propiedades presentes en los gases de combustión del gas natural y el aire atmosférico cuando este ingresa al quemador a 25°C y los gases alcanzan una temperatura de 300°C. (Villaflor , Morales, & Velasco, 2008)

**Tabla 2.2** *Propiedades de los gases de combustión del gas natural*

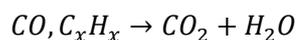
Propiedades	Gases de combustión
Peso molecular	27,72
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,5895
Cp kJ/kg°C	1,338
Viscosidad cP	0,002655
Conductividad calorífica W/mK	0,004254



En la actualidad se utilizan diferentes tipos de convertidores catalíticos, siendo los más empleados los de tres vías (gases sobre los cuales actúa, CO, HC y NOX). El convertidor utiliza dos tipos de catalizadores, uno de reducción y otro de oxidación. En una primera fase de reducción con la ayuda de sustancias como platino y rodio se actúa sobre los óxidos de nitrógeno atrapándolo y separando el átomo de oxígeno, el átomo libre de nitrógeno se une con otro estabilizando al elemento para ser liberado a la atmósfera. A continuación se presenta la reacción química de la primera fase:



En la segunda fase se lleva a cabo la oxidación por medio del platino y el paladio de los hidrocarburos y del monóxido de carbono para producir dióxido de carbono:



Existe una tercera fase la cual se encarga de controlar las emisiones por medio de un sensor de oxígeno localizado antes del convertidor catalítico, cuya función es el monitoreo de los gases de escape provenientes del sistema de combustión y emplea esta información para controlar el sistema de inyección de combustible del motor en el caso de máquinas de combustión interna. (Gascommunity, 2019)

## **2.7 Factor de Emisión del Sistema Interconectado SIN**

El Factor de Emisión (FE) se puede definir como un valor representativo que relaciona la cantidad de partículas contaminantes que se emiten a la atmósfera debido a una actividad asociada principalmente a la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, es decir, la relación entre partículas contaminantes (en peso) respecto a la energía que produce (kW). En particular para Colombia según UPME, el factor de emisión de CO<sub>2</sub> para generación eléctrica es de 164.38 gramos/kWh. (Bonilla Madriñan, Herrera Flórez, & Puertas González, 2017)

Cuando se emplea el FE del SIN se hace para dos aplicaciones: una, en proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y dos, en inventarios de emisiones de Gases Efecto Invernadero-GEI.

Para los MDL el FE se fundamenta en el “Tool to calculate the emission factor for an electricity system”, establecida en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre

Cambio Climático y cuyo objetivo es determinar el factor de emisión de CO<sub>2</sub> en proyectos que reemplacen la energía eléctrica producida por sistemas tradicionales basados en combustibles fósiles, por sistemas que generen energía con base en energías renovables.

El factor de emisión FE se determina a partir de la relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> que provienen del consumo de combustibles y la cantidad de energía generada.

$$FE = \frac{\textit{Emisiones totales de CO2 de la generación}}{\textit{Electricidad Generada}}$$

Donde:

Emisiones totales de CO<sub>2</sub> de la generación, en gramos

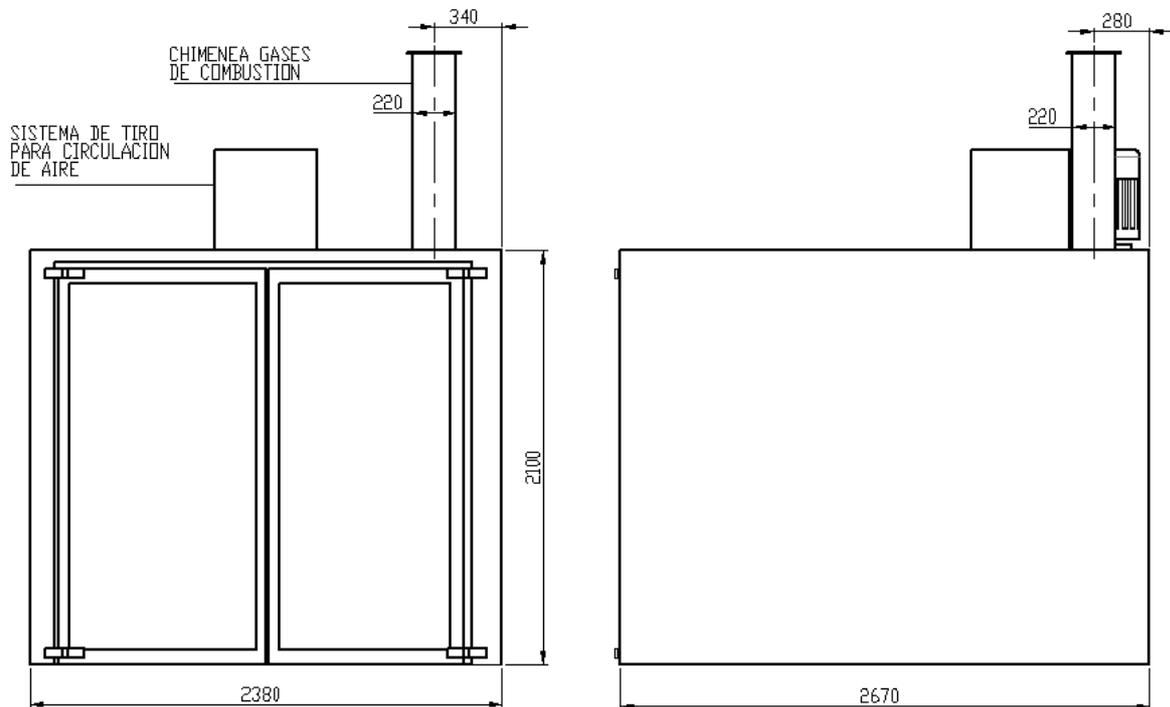
Electricidad Generada en KW

### 3. Ingeniería del proyecto

#### 3.1 Recolección de datos

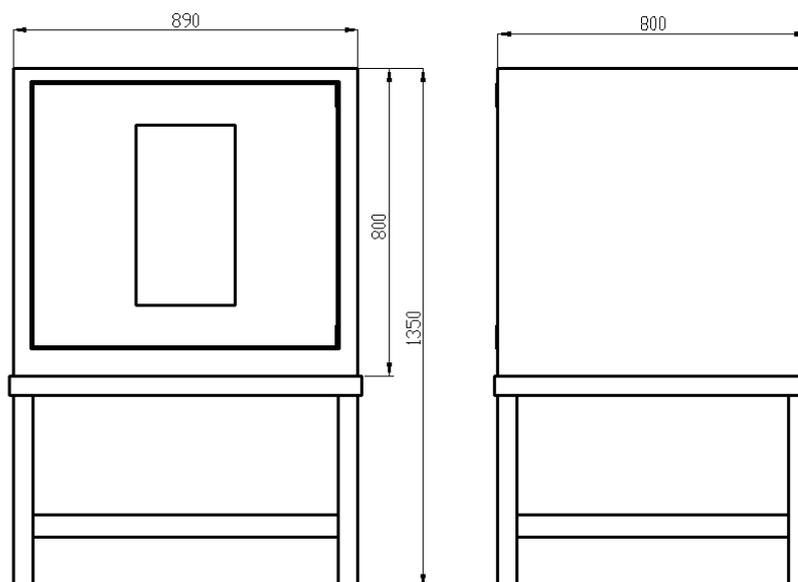
Aquí en este subcapítulo se presentan todas las mediciones de las variables necesarias para los cálculos de diseño y selección de equipos como, por ejemplo, cantidad de gas quemado, temperaturas de operación, geometría de los hornos, etc. Se acompaña de las imágenes y anexos correspondientes. Inicialmente se presentan en la figura 3.1 y 3.2 las dimensiones de los hornos de secado y curado. El horno de secado es de tipo industrial fabricado en la ciudad de Ibagué por industrias INOXICOL, anclado al piso y con la posibilidad de introducir carro de carga con piezas para el tratamiento de secado, los datos suministrados corresponden al manual de funcionamiento del equipo. El horno de curado es de fabricación artesanal, los datos suministrados son tomados en el sitio con multímetro o referenciados por el ingeniero de planta.

**Figura 3.1** *Horno de secado*



Nota: Dimensiones en mm, tomadas por el autor en el sitio. Potencia térmica de 81 a 220 kW. Gas natural (Familia 2) PCI 12 kWh/Nm<sup>3</sup>, presión min. 20 mbar- máx. 100mbar. Motor 220V/1,2A. Temperatura de trabajo hasta 150°C. Fuente (INOXICOL, 2021).

**Figura 3.2** *Horno de curado*



Nota: Dimensiones en mm, tomadas por el autor en el sitio. 2 resistencias de 1100W cada una. Consumo 10,7 A Temperatura de trabajo hasta 120°C. Fuente: el autor.

### 3.1.1 Caudal de productos de la combustión.

Para determinar el flujo de gases de combustión, se registró el consumo de gas natural durante un periodo de un mes (23 de enero a 22 de febrero de 2021, ver anexo 1) y se registró el número de horas en operación del horno de secado correspondiente a 42 horas para ese mismo periodo. Por otra parte, la proporción ideal de gas con aire para que se produzca una combustión óptima corresponde a 10% de gas natural y 90% de aire (METROGAS, 2021). En los gases de combustión del gas natural se pueden encontrar monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, hidrocarburos y material particulado, sin embargo cuando la combustión es completa la mayor proporción la toma el dióxido de carbono. Para efectos de cálculo se toman los valores presentados en la tabla 2.2 del subcapítulo 2.5.1 (gases de la combustión del gas natural). En la tabla 3.1 se presenta el caudal estimado de los gases de la combustión. Considerando una densidad para la mezcla de 0,5895 kg/m<sup>3</sup>

**Tabla 3.1** Flujo volumétrico de dióxido de carbono

A. Consumo de gas periodo registrado <sup>1</sup> m <sup>3</sup>	B. Volumen de aire en la mezcla <sup>2</sup> m <sup>3</sup>	C. Horas de funcionamiento periodo registrado h
183,11	1648	42
D. Flujo volumétrico de gas m <sup>3</sup> /s A/(Cx3600)	E. Flujo volumétrico de aire m <sup>3</sup> /s B/(Cx3600)	F. Flujo másico de gases de combustión kg/s (D+E) x densidad
0,00121	0,0109	0,00713

Nota 1: Para una presión de suministro en el horno de 100 mbar según el fabricante (INOXICOL, 2021)

Nota 2: El volumen de aire es nueve veces el volumen de gas natural

### 3.1.2 Caudal de aire para el horno de curado

El aire es tomado por un ventilador centrífugo a presión atmosférica y temperatura ambiente para ser introducido al intercambiador y de allí al horno de curado para al menos una renovación del volumen de horno por minuto siguiendo las recomendaciones del fabricante (INOXICOL, 2021). La densidad del aire para las condiciones de trabajo señaladas en el siguiente subcapítulo indica que la densidad es de 1,059 kg/m<sup>3</sup>. En la tabla 3.2 se presenta el caudal estimado para el aire.

**Tabla 3.2** Flujo volumétrico de aire para el horno de curado e intercambiador de calor

A. Volumen del horno de curado m <sup>3</sup>	B. Caudal de aire m <sup>3</sup> /s (Ax3)/60	C. Flujo másico del aire Kg/s B x densidad
0,57	0,0285	0,0301

### 3.1.3 Temperaturas de operación

La temperatura a la salida del horno de secado por la chimenea se denominará en adelante Temperatura del Gas de Entrada al intercambiador ( $T_{GE}$ ), y según lectura de la cámara termografía corresponde a 138°C (anexo 2); la temperatura del aire ambiente tomada para ser ingresada al intercambiador y posteriormente al horno de curado se denominara Temperatura del Aire de Entrada al intercambiador ( $T_{AE}$ ) que de acuerdo al IDEAM, 2020 para la ciudad de Ibagué corresponde en promedio a 26°C. La Temperatura deseada en el Aire a la Salida del intercambiador para ser ingresada al horno de curado es de 100°C ( $T_{AS}$ ); finalmente la Temperatura del Gas a la Salida del intercambiador ( $T_{GS}$ ) se estima a

partir del concepto que señala que el calor que pierde un fluido (Gas de combustión  $Q_G$ ) es el calor que gana el otro fluido (Aire  $Q_A$ ) y que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_G = Q_A$$

Donde:

$$Q_A = mC_P(T_{AS} - T_{AE})$$

$$Q_A = 2,24 \text{ kW}$$

$T_{AS}$ : 100°C; 373 K

$T_{AE}$ : 26°C; 299 K

$m$ : Flujo másico del aire, 0,0301 kg/s.

$C_p$ : Calor específico del aire a presión constante 1,008 kJ/kgK a temperatura promedio  $(T_{AE} + T_{AS})/2$

$dT$ : Diferencia de temperatura 74 K

Ahora conocido el calor ganado por el aire y reemplazándolo para el calor cedido por los gases de combustión se puede determinar la Temperatura de Salida del Gas  $T_{GS}$ .

$$Q_G = mC_P(T_{GE} - T_{GS})$$

$$T_{GS} = 96,8^\circ\text{C}$$

Donde:

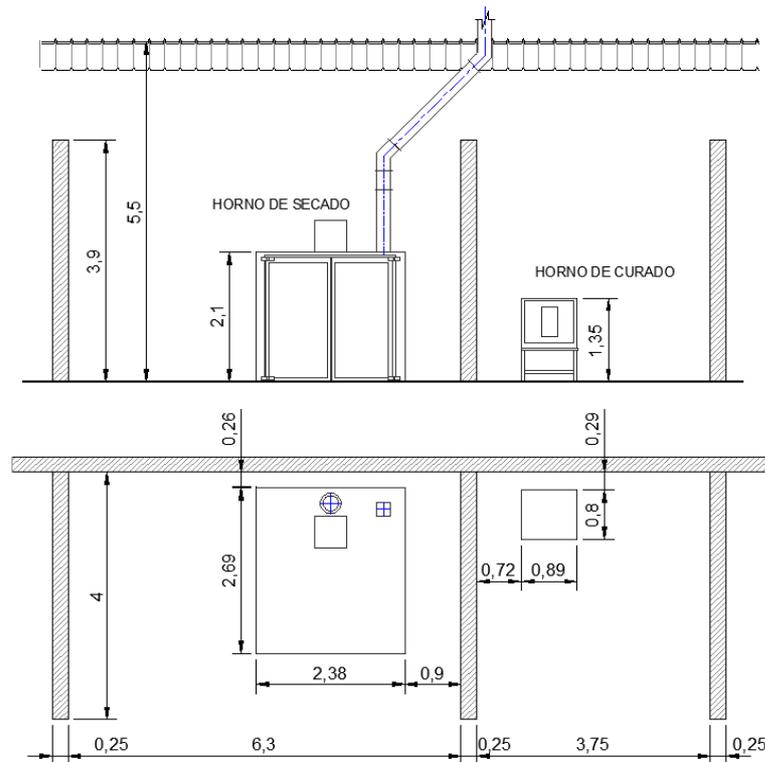
$Q_G = Q_A$ : 2,24 kW

$m$ : Flujo másico del gas, 0,00713 kg/s.

$C_p$ : Calor específico del aire a presión constante 1,338 kJ/kgK

### 3.1.4 Localización de los equipos

Los hornos de secado y curado ubicados en la planta de producción de industrias GVR S.A.S. se encuentran separados por una pared de 3,9 metros de altura, cada uno en un área específica en la línea de producción de la planta. La cubierta sobre los espacios está a 5,5 metros de altura, la chimenea de escape de los gases de combustión se localiza sobre este muro divisorio de dichos espacios tal como se puede apreciar en la figura 3.3.

**Figura 3.3** Localización de hornos en el edificio

Nota: Vista en alzado y en planta. Dimensiones en metros

## 3.2 Diseño y selección de equipos

### 3.2.1 Recuperador de calor

Consta de un intercambiador tipo tubo y coraza a contraflujo para un diámetro de tubo de 1" en acero galvanizado calibre 16 (Diámetro exterior 0,0329m, Área de flujo  $1,48 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ), los gases de combustión pasan por la coraza, mientras el aire pasa a través del tubo. El equipo para recuperación de calor se diseña por el Método de la Temperatura Media Logarítmica (*LMTD*), es la media logarítmica de la diferencia de temperatura entre los fluidos calientes y fríos en cada extremo del intercambiador (gases de combustión y aire atmosférico respectivamente). Cuanto mayor sea el *LMTD*, más calor se transfiere. La ecuación de calor para un intercambiador de calor se define mediante la siguiente expresión: (Cengel, 2008)

$$Q = UAs(LMTD)$$

Donde:

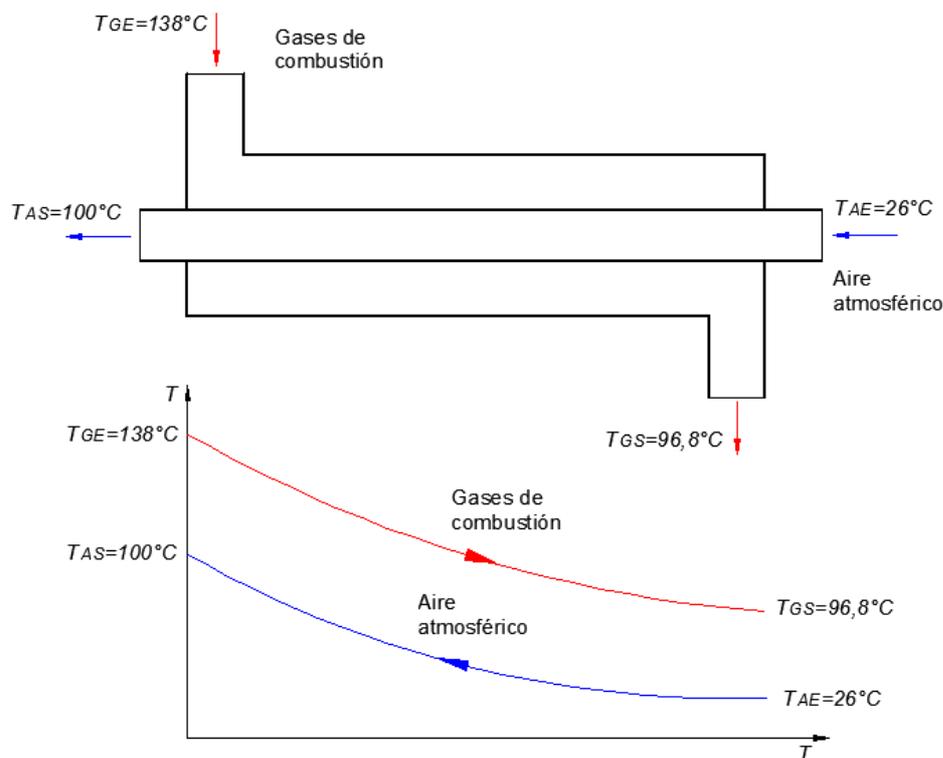
- La diferencia de temperaturas media logarítmica se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$\Delta T_1$ : Es la diferencia de temperaturas al costado izquierdo del intercambiador ( $38^\circ\text{C}$ ) de la figura 3.4

$\Delta T_2$ : Es la diferencia de temperaturas al costado derecho del intercambiador ( $70,8^\circ\text{C}$ ) de la figura 3.4

**Figura 3.4** Intercambiador de tubo y coraza a contraflujo



$$LMTD = 52,9^\circ\text{C}$$

- U: coeficiente total de transferencia de calor, el cual depende de los coeficientes convectivos de los fluidos sobre la superficie de intercambio de calor (tubo), que a su vez se determinan para cada fluido con los números adimensionales de Reynolds, Prandtl, Peclet, y Nusselt. Se define por la ecuación:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_A} + \frac{1}{h_G}\right)}$$

Donde:

$h_A$ : coeficiente convectivo entre el aire y el exterior de la superficie en  $W/m^2\text{°C}$

$h_G$ : coeficiente convectivo entre el gas y el interior de la superficie en  $W/m^2\text{°C}$

En la tabla 3.3 se presentan las propiedades térmicas para ambos fluidos (a temperatura media) y los resultados para los números adimensionales.

**Tabla 3.3** *Propiedades térmicas para el gas de combustión y para el aire atmosférico*

Propiedad	Gas de combustión	Aire atmosférico
Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,5895	1,059
Caudal (m <sup>3</sup> /s) (m <sup>3</sup> /h)	0,0121 (43,56)	0,029 (104,4)
Flujo másico $m$ (kg/s)	0,00713	0,0301
Velocidad <sup>1</sup> $V=m/\rho A$ (m/s)	81,72	192,04
Calor específico $C_p$ (kJ/kgK)	1,338	1,008
Viscosidad dinámica $\mu$ (kgm/s)	$1,841 \times 10^{-5}$	$2,008 \times 10^{-5}$
Número de Prandtl $Pr$	0,7464	0,7202
Conductividad térmica $k$ (W/m°C)	0,02257	0,02808
Numero de Reynolds <sup>2</sup> $Re = \rho V D / \mu$	86090,3	333211,3
Numero de Peclet $Pe = Re Pr$	64257,7	239978,8

Nota 1: El área de flujo para un tubo de 1" calibre 16 es de  $1,48 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>.

Nota 2: El diámetro del tubo es de 0,0329 m.

Nota 3: Datos tomados de los subcapítulos anteriores y de los apéndices de Transferencia de Calor de Cengel, 2008.

Ahora se determinan los coeficientes convectivos mediante el número de Nusselt para cada condición, por dentro del tubo  $h_A$  para el aire y  $h_G$  para los gases de combustión por sobre un tubo de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$Nu = \frac{hD}{k}$$

Despejando h:

$$h = \frac{Nuk}{D}$$

Para el aire, con flujo turbulento por el interior de un tubo según la ecuación de Dittus-Boelter (Chavez Mora & Diaz Avalos, s.f) con  $Re > 10000$  y  $0,7 < Pr < 160$ :

$$Nu = 0,0023Re^{0,8}Pr^a$$

Con  $a=0,4$  para calentamiento.

$$Nu = 52,83$$

Entonces el coeficiente convectivo para el aire será:

$$h_A = \frac{52,83 \times 0,02808 \frac{W}{m} ^\circ C}{0,0329 m}$$

$$h_A = 45,09 \frac{W}{m^2 ^\circ C}$$

Para el gas de combustión por el exterior del tubo se determina el número de Nusselt con la ecuación:

$$Nu = CRe^m Pr^{0,33}$$

Con  $C=0,193$  y  $m=0,616$  para  $Re$  entre 4000 y 40000, (Chavez Mora & Diaz Avalos, s.f)

$$Nu = 192,1$$

Entonces el coeficiente convectivo para el aire será:

$$h_G = \frac{192,1 \times 0,02257 \frac{W}{m} ^\circ C}{0,0329 m}$$

$$h_G = 131,7 \frac{W}{m^2 ^\circ C}$$

Ahora evaluamos el coeficiente total de transferencia de calor U:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_A} + \frac{1}{h_G}\right)}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{71,43} + \frac{1}{319,06}\right)}$$

$$U = 33,58 \frac{W}{m^2 ^\circ C}$$

- El calor Q corresponde a 2,24 kW (estimado en el subcapítulo 3.1.3), entonces:

$$2,24 kW = UAs(LMTD)$$

- El área superficial ( $A_s$ ) de transferencia de calor para una superficie cilíndrica está definida por la ecuación:

$$A_s = \pi DL$$

Reemplazando el área superficial en la ecuación de calor y despejando la longitud podemos determinar cuan largo debe ser nuestro intercambiador de calor para satisfacer los requerimientos térmicos del diseño:

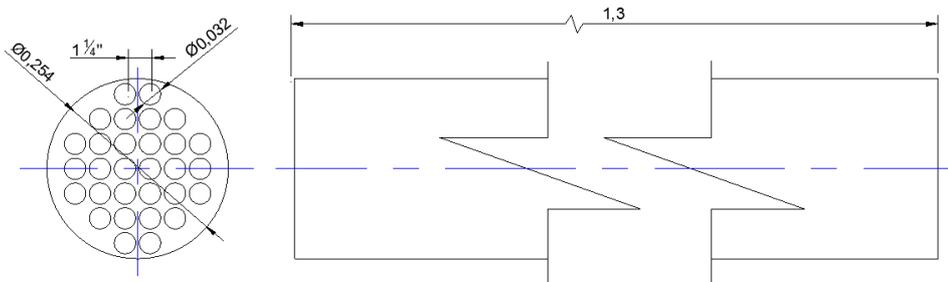
$$L = \frac{Q}{(LMTD)U\pi D}$$

$$L = \frac{2240 \text{ W}}{(52,09^\circ\text{C})(33,58 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}})\pi(0,0329)}$$

$$L = 38,9\text{m}$$

Lo que resultaría inapropiado en un solo tramo, sin embargo se da solución en un arreglo cuadrado (paso de 1 1/4") equivalente, con un haz de tubos de longitud 1,3 m, esto sería, 30 tubos en una coraza de diámetro interior 254 mm, de acuerdo al dimensionamiento de equipos de transferencia de calor (Ontiveros, s.f.) En la figura 3.5 se presenta una representación simplificada, los planos del equipo de recuperación de calor se presenta en el anexo 3.

**Figura 3.5** Arreglo de tubos cuadrado

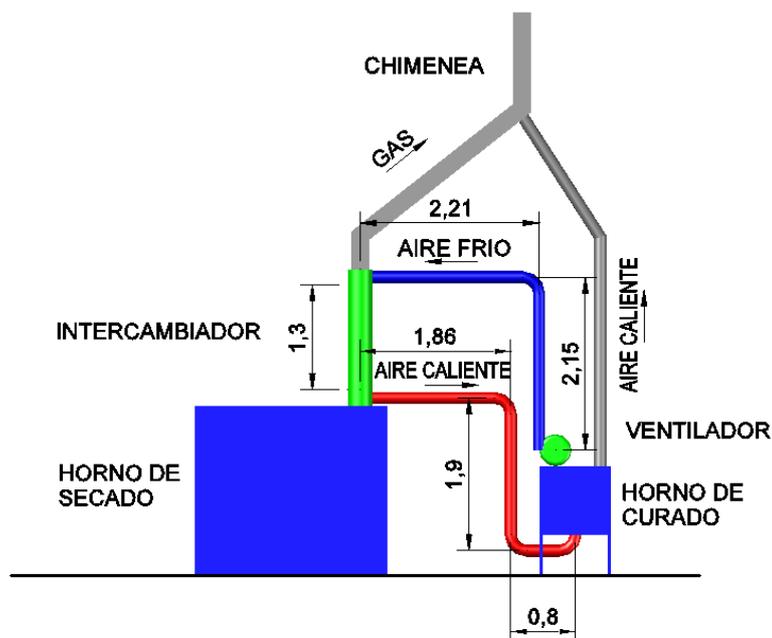


### 3.2.2 Diseño de ductos y selección de ventilador

El diseño hace referencia al sistema encargado de tomar el aire atmosférico, hacerlo pasar por el recuperador de calor e introducirlo en el horno de curado, se presenta en la figura 3.6 la distribución espacial a partir de la cual se estimarán las pérdidas y la posterior selección del ventilador y en la tabla 3.4 las variables del sistema.

Se asume un diámetro comercial y disponible en la planta. Los ductos son en tubo estructural redondo de 4" calibre 16, cuyo diámetro es de 109,5 mm y 0,0711 m<sup>2</sup> de área.

**Figura 3.6.** Sistema de ductos recuperación de calor del horno de secado



**Tabla 3.4** Datos para el cálculo del sistema de ductos

Variable	Valor
D diámetro del ducto (mm)	109,5
C caudal de aire (m <sup>3</sup> /h)	104,4
L longitud total del tubo <sup>1</sup> (m)	9,63
R radio de los codos (cm)	10
N número de codos	6

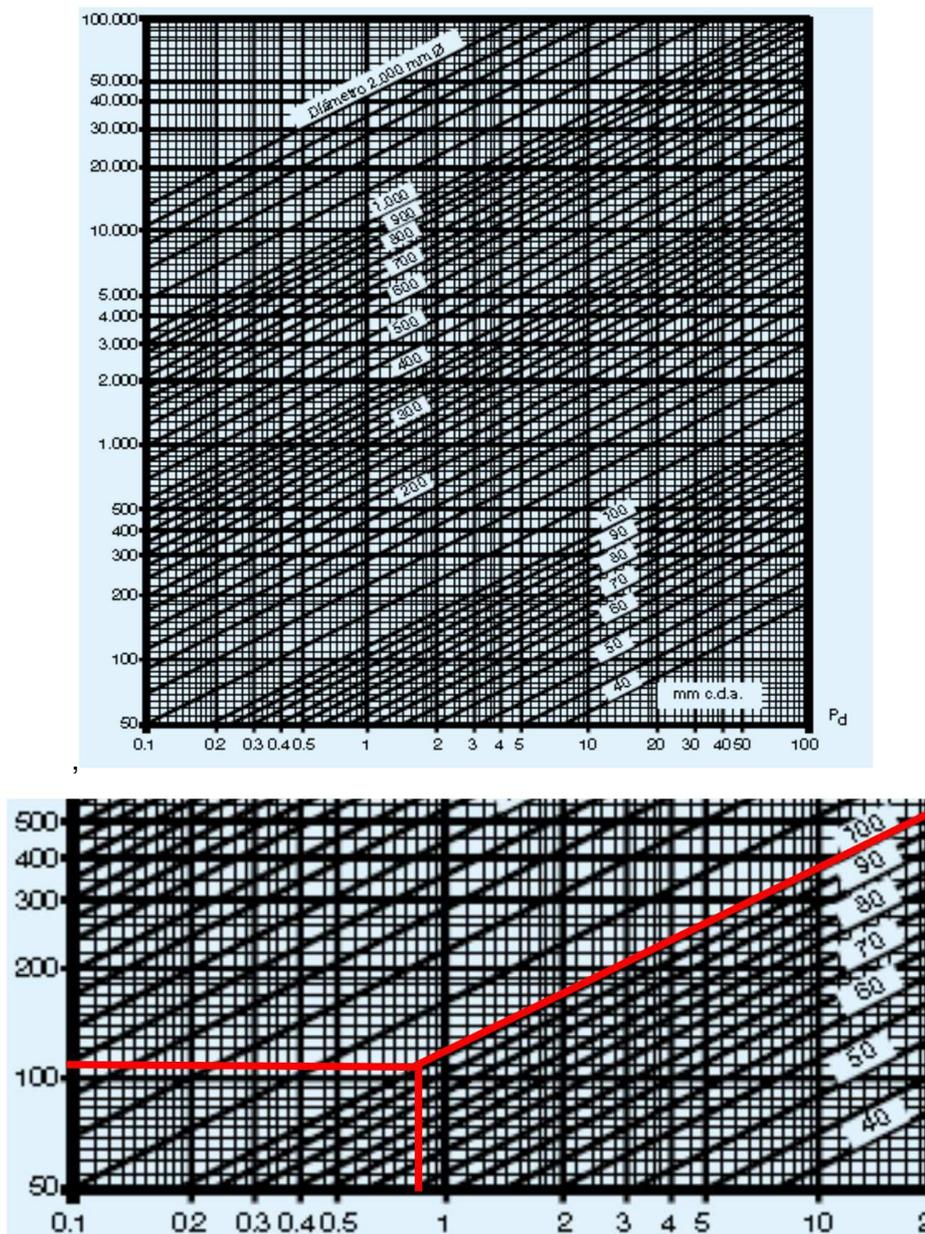
Nota 1: la longitud incluye el paso por el recuperador de calor

La pérdida de carga en los ductos se efectúa en función de la presión dinámica ( $Pd$ ) y de los coeficientes ( $n$ ) de proporcionalidad para cada accidente (accesorios, tubería o cualquier elemento que oponga resistencia al aire) de acuerdo a la forma y dimensiones (Soler y Palau ventilación Group, 2012), la pérdida de carga se expresa como:

$$\Delta P = nxPd \text{ (mm. c. d. a)}$$

La presión dinámica de nuestro sistema de recuperación de calor se determina por medio de la figura 3.7 a la cual accedemos con el caudal de aire  $104,4 \text{ m}^3/\text{h}$  (línea horizontal) y el diámetro del conducto  $109,5 \text{ mm}$ . (línea diagonal) resultando en  $P_d = 0,8 \text{ mm.c.d.a.}$

**Figura 3.7** Presión dinámica, caudal y diámetro en conducciones tubulares

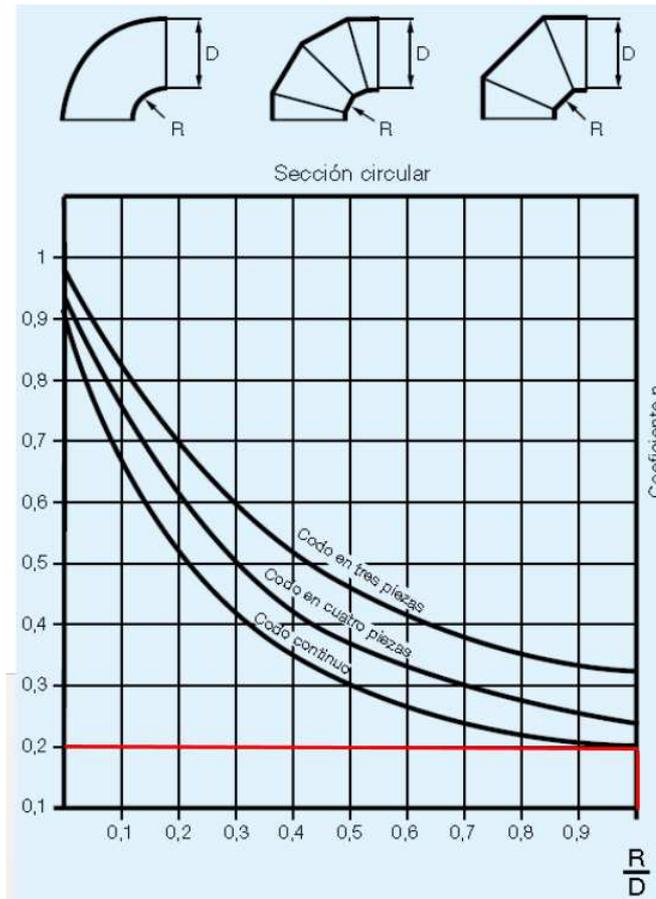


Nota: adaptado de Manual práctico de ventilación, Soler & Palau Ventilation Group, 2012.  
La grafica superior corresponde a una vista general del diagrama, la vista inferior a un detalle de la toma de lectura.



La pérdida de carga por codos se determina mediante la figura 3.9 para un codo continuo y cuya relación radio de curvatura(R), sobre diámetro de ducto (D) es de 1. Corresponde a 0,2 mm.c.d.a.

**Figura 3.9** Coeficientes *n* de pérdidas de carga codos



Nota: adaptado de Manual práctico de ventilación, Soler & Palau Ventilation Group, 2012.

La pérdida total de carga de sistema es la sumatoria de las pérdidas por ducto y accesorios y corresponde a:

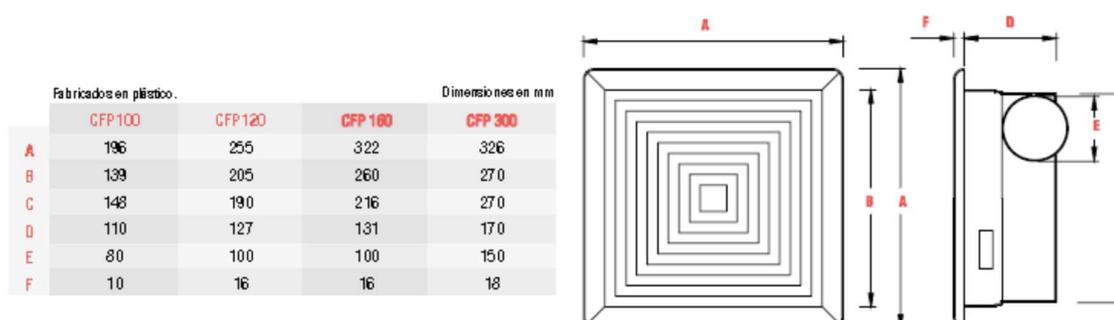
$$\Delta P = (2,02 \text{ mm. c. d. a}) + 6(0,2 \times 0,8 \text{ mm. c. d. a})$$

$$\Delta P = 2,98 (\text{mm. c. d. a})$$

Aproximadamente una pérdida de presión en el sistema de 30 Pascales, que resulta muy pequeña en comparación con la presión atmosférica, debido al caudal y las distancias tan cortas de transporte de fluido.

Una vez conocido el caudal de aire, y la pérdida de presión en el sistema procedemos a seleccionar un ventilador. Nos encontramos con diferentes modelos de ventiladores centrífugos para baja presión y caudal. Otra consideración es la temperatura de succión (26°C) a presión atmosférica. El ventilador seleccionado de marca Soler & Palau, modelo CFP 120, presenta una potencia de 20 W a una tensión de 120 Voltios y un caudal de 124 m<sup>3</sup>/h (el más aproximado al caudal de diseño), en el anexo 4 se presenta la ficha técnica del equipo. En la figura 3.10 se observan la forma y dimensiones del modelo 120, con el agregado que el diámetro de salida (E) del ventilador coincide con el diámetro del ducto, con lo que se evita el diseño e incorporación de un acople y su consiguiente pérdida de carga y aumento del valor de la instalación.

**Figura 3.10** Geometría del ventilador CFP 120.



Nota: adaptado de Catálogo general, Soler & Palau Ventilation Group, 2012.

La disposición y detalles de ensamblaje se presentan en el anexo de planos de montaje y fabricación (anexo 3).

Determinada las características térmicas y dimensiones del sistema de recuperación de calor se hacen necesario el aislamiento de los ductos que transportan el aire desde el intercambiador de calor, hasta el horno de curado para disminuir la pérdida de energía por las paredes del mismo, en el siguiente subcapítulo se hará la selección del material aislante y su espesor.

### 3.2.3 Diseño del sistema de aislamiento en ductos.

Para determinar el espesor del material aislante (fibra de vidrio por las propiedades térmicas y carácter comercial) se emplea el radio crítico de aislamiento  $R_c$ , considerando que el medio circundante es aire atmosférico a 26°C, a presión atmosférica y que solo se considera la conducción por el material aislante y la convección con el medio circundante, en la tabla 3.5 se presentan los datos necesarios para determinar el espesor de la capa en fibra de vidrio.

**Tabla 3.5** Datos para estimar espesor de material aislante

Variable	Valor
D diámetro del ducto (m)	0,1095
v velocidad del aire <sup>1</sup> (m/s)	0,1
P densidad del aire m <sup>3</sup> /kg	1,059
Viscosidad dinámica $\mu$ (kgm/s)	2,008x10 <sup>-5</sup>
$k_{ais}$ conductividad de la fibra de vidrio W/m°C	0,04
k conductividad del aire W/m°C	0,02808

Nota 1: La velocidad del aire en recintos cerrados puede llegar a ser cero, sin embargo, esta cifra en los cálculos señalaría un aislante de espesor cero, por lo cual se asume una velocidad por parte del diseñador.

$$r_c = \frac{k_{ais}}{h_{\infty}}$$

Para determinar el radio crítico es necesario la conductividad del aislante  $k_{ais}$  (la cual obtenemos de tablas) pero para determinar el coeficiente convectivo para el aire  $h_{\infty}$  lo logramos mediante los números adimensionales de Re, Pr y Nu, ya que:

$$h = \frac{Nuk}{D}$$

y

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

El número de Reynolds para el aire es:

$$Re = 577,5$$

Ahora el número de Nusselt:

$$Nu = C Re^m Pr^{0,33}$$

Con C=0,683 y m=0,466 para Re entre 40 y 4000, (Chavez Mora & Diaz Avalos, s.f)

$$Nu = 11,86$$

Podemos señalar entonces que el coeficiente convectivo para el aire circundante es de:

$$h_G = 3.04 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

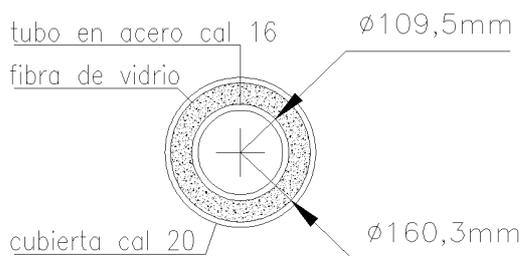
Finalmente podemos determinar el radio crítico o radio mínimo a partir del cual podemos agregar material aislante al ducto que conduce aire caliente al horno de curado.

$$r_c = 0,013m$$

Es decir, a partir de un radio de 13 mm aumentar el área superficial sobre el ducto no aumentara el flujo de calor por las paredes cilíndricas.

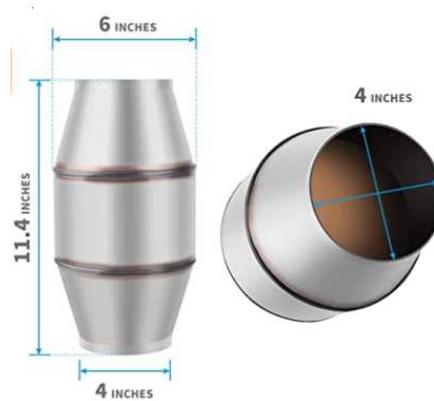
Se toma la decisión de emplear fibra de vidrio con un espesor de 1" sobre el ducto en acero estructural, con una cubierta protectora del material aislante en acero calibre 20.

**Figura 3.11** Disposición del material aislante sobre el ducto



### 3.2.4 Selección de filtro

Se requiere un filtro catalizador con al menos dos fases, una de reducción que actúe sobre los óxidos de nitrógeno atrapándolos y separándolos del átomo de oxígeno. Y una segunda fase de oxidación de los hidrocarburos y del monóxido de carbono para producir dióxido de carbono. Se utilizara un catalizador de uso industrial tipo universal marca AUTOSAVER88, referencia ATCC 0021 cuyas características constructivas se adecuan para ser acopladas al sistema de escape del horno de secado (diámetro de entrada y salida interior para acople de 3,9"=99,06 mm y diámetro exterior 4" =101,4mm), tanto la información técnica como dimensional es suministrada en el anexo 5.

**Figura 3.12** Convertidor catalítico ATCC 0021 para control de emisiones

Nota: adaptado de [www.autosaver88-universal-twc-catalytic-converter\\_63346a50-437e-43fc-bfa6-d0d01ba59180](http://www.autosaver88-universal-twc-catalytic-converter_63346a50-437e-43fc-bfa6-d0d01ba59180)

### 3.2.5 Cálculo de resistencia eléctrica

El horno de curado opera a 120°C, el recuperador le proporciona aire a 100°C, siendo necesario aportar 20°C (dT) por medio de una resistencia eléctrica. Una resistencia eléctrica en un horno se comporta como una carga resistiva pura, se rige bajo la Ley de Ohm. La energía eléctrica se transforma en calor, de tal manera que se puede estimar la potencia de dicha resistencia mediante la ecuación de calor (Cengel, 2008):

$$PT = Q = mC_p dT \text{ (W)}$$

Donde:

PT: Potencia total de la resistencia en W

m: Flujo masico de aire a ser calentado 0.0301 m<sup>3</sup>/s

Cp: Calor específico del aire a presión constante 1.008 kJ/kgK

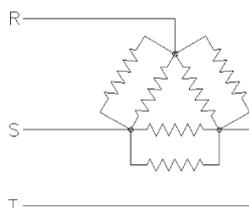
dT: Diferencia de temperaturas 20 K

$$PT = Q = \left(0.0301 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \left(1.008 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) (20\text{K})$$

$$PT = 0.606 \text{ kW}$$

Para determinar las características de la resistencia considerando una conexión en triángulo como el de la figura 3.13

**Figura 3.13 Resistencia conectada en triangulo**



Donde:

VL: Voltaje de línea 220V

VF: Voltaje de fase 220V

IL: Corriente de línea (A)

IF: Corriente de fase (A)

PF: Potencia de fase (W)

PT: Potencia total 606 W

R: Resistencia del elemento en Ohmios

Entonces:

$$PF = \frac{PT}{3} = \frac{606W}{3} = 202 W$$

$$IF = \frac{PF}{VL} = \frac{202W}{220V} = 0,917 A$$

$$IL = \sqrt{3} \times IF = \sqrt{3} \times 0,917A = 1,32A$$

$$Req = \frac{PT}{3IF^2} = \frac{606W}{3 \times 0,917^2} = 240,22\Omega$$

$$R = 2Req$$

$$R = 480,4\Omega$$

Es decir se requiere una resistencia de 480 Ohm, a 220 V y una corriente de 0,92 A, trifasica conectada en triangulo.

### 3.2.6 Calculo del CO2 equivalente

De los resultados presentados más adelante en el subcapítulo 5.2 (Balance energético) se establece que el ahorro o la energía dejada de consumir para un periodo de un mes debido a la implementación del sistema de recuperación de calor residual es de aproximadamente

133.7 kWh por mes, empleando la ecuación de Factor de Emisión FE, para determinar la cantidad de CO2 equivalente que se deja de emitir a la atmosfera tenemos:

$$FE = \frac{\text{Emisiones totales de CO2 de la generación}}{\text{Electricidad Generada}}$$

Siendo para Colombia el FE de 164.38 gramos/kW, despejando la cantidad de Emisiones totales de CO2 resulta:

$$\text{Emisiones totales de CO2 de la generación} = 164.38(\text{gr/kW}) \times 133.7\text{kW}$$

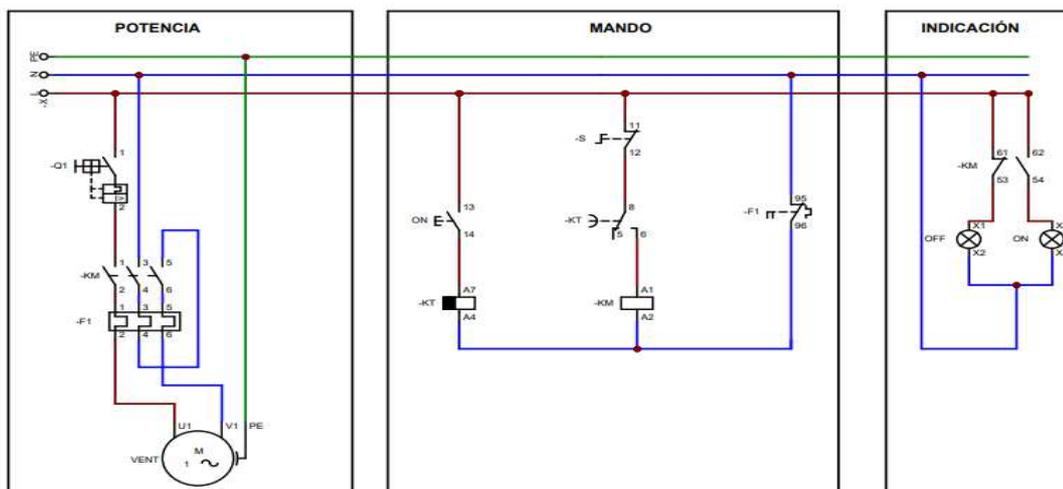
$$\text{Emisiones totales de CO2 de la generación} = 21.977.606 \text{ gr}$$

Es decir, un equivalente a 22 toneladas de CO2.

### 3.2.7 Sistema de control

El sistema de recuperación de calor está conformado por una fuente de energía primaria la cual es gas natural, cuyo proceso de combustión es controlado de forma independiente en el horno de secado (sistema motriz,) el horno tiene su propio sistema de ventilación para la expulsión de los gases de la combustión que atravesarán el recuperador de calor, mientras que el aire atmosférico será forzado por un ventilador centrífugo, dicho equipo (ventilador seleccionado de marca Soler & Palau, modelo CFP 120, presenta una potencia de 20 W a una tensión de 120 Voltios) requiere un sistema de control que puede ser encendido manualmente y apagado con temporizador. En la figura 3.14 se presenta el diagrama de control y en la figura 3.15 se presenta cada uno de los componentes para el ventilador.

**Figura 3.14** Diagrama de control con temporizador



**Figura 3.15** Elementos constitutivos del circuito de control

 <p>09290 a 09316 CE</p>	<p>Marca: EBCHQ            Breaker para montaje en riel      240/415 VAC            Ref 09300                                      6kA            1 polo                                              50/60 Hz            Voltaje Cap, Ruptura</p>
 <p>MS1A31 CE</p>	<p>Marca: Comepi            Relé de seguridad Serie MS1A31            Modo de operación: Inicio automático o inicio manual            Implementación : Para dispositivos de seguridad            Operación: 1 o 2 canales            Grado de protección: IP44            REF: MS1A31-120            Voltaje: 120VAC            Número de contactos: 3NO + 1NC + 2 indicadores de canal            Capacidad de contactos: 24VAC/DC (6A)230VAC (3A)            Material de contactos: Aleación de plata            Dimensiones (mm): 22.5*99*111,5.</p>
 <p>18801 18901            CE</p>	<p>Marca: EBCHQ            Pulsador de base metálica            Color: Verde            Contactos: 1 NA            Indicador LED no tiene</p>

 <p>76311 a 76322</p>	<p>Marca: EBCHQ          Temporizador análogo al reposo          Salida de control: 2* relé SPDT (NA+NC) temporizados          Tamaño: 48*48          Tipo de conexión: Base 8 pines (no incluida0)          REF: AT8PMN          Rango: 0.05-10 min          Alimentación: 100 a 120 VAC 50/60 Hz</p>
 <p>02304 CE</p>	<p>Marca: Chint          Bloque Auxiliar          REF: 02304          Usar con contactor ref: 00905-00892          Función: Contacto temporizado al reposo (0.1- 30s) (10-18s)          Contactos:          1NA+1NC          Montaje: Superior</p>
 <p>18700 CE</p>	<p>Marca: EBCHQ          Función: Pulsador base metálica emergencia 22mm          Color: Rojo          Contactos: 1NC          LED: no tiene</p>
 <p>17570 a 17574 CE</p>	<p>Marca: EBCHQ          REF: 17570          Diámetro: 22mm          Color: Rojo          Alimentación: 127 VAC</p> <p>Material: Plástico          Fuente de luz: Bloque LED fijo</p>
 <p>04220 CE</p>	<p>Marca: Noark          Bloque Auxiliar          REF: 04220          Usar con contacto REF: 04020- 04078          Función: Contacto auxiliar          Contactos: (1NA+1NC)          Montaje: Superior</p>
 <p>55400 a 55405          55407 a 55409          55412          Recubrimiento          Fibra de vidrio</p>	<p>Marca EBCHQ          REF:55405          Calibre: 14 AWG          Recubrimiento: Fibra de vidrio          Empaque: 100m</p>

## 4. Operación y mantenimiento

El presente subcapítulo tiene por objetivo presentar el procedimiento de recuperación del calor residual, para ser aplicado en el horno de curado para quitar la humedad de los aisladores, de los flejes de cobre o aluminio en la línea de producción y mantenimiento de transformadores de baja y alta tensión de la empresa Transformadores GVR Energy S.A.S, e igualmente el manual de mantenimiento para garantizar la operatividad y vida útil del sistema.

### 4.1 Seguridad general

Es responsabilidad de la empresa Transformadores GVR Energy. S.A.S. asegurarse que quien opere el sistema de recuperación de calor sea personal técnico, capacitado en este tipo de equipos. En general se deben considerar los siguientes aspectos:

- La velocidad de operación del ventilador no debe exceder la máxima señalada en el catálogo anexo a este documento.
- No modificar diámetros de ductos, disminuir espesores de materiales aislantes ni cambiar codos con radios de curvatura menores.
- No encender el sistema mientras la puerta del horno de curado se encuentre abierta, ni abrirla cuando aún este en operación el sistema de recuperación de calor.
- Durante cualquier operación de mantenimiento que implique el contacto físico con el sistema el switch de paso de corriente debe estar desenergizado.
- No manipular ninguna línea de conducción de aire, recuperador, ni ventilador durante la operación y al menos 15 minutos después de ella.

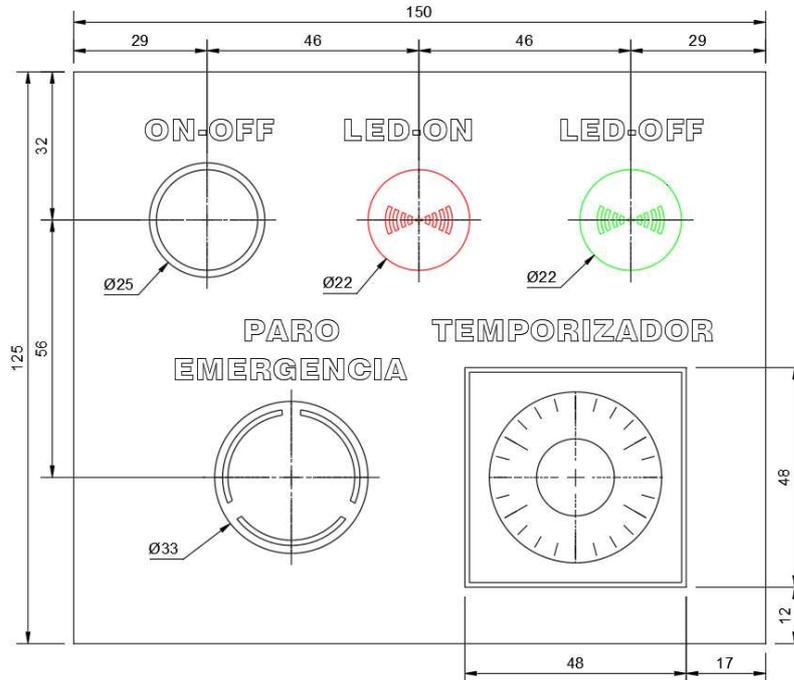
### 4.2 Operación

1. El horno de curado trabajando con el sistema de recuperación de calor debe ser encendido cerca de 15 minutos después que sea puesto en marcha el horno de secado (el cual provee la energía terminada al sistema) para que este alcance su régimen estacionario de trabajo (INOXICOL, 2021) siempre y cuando se programe para operar a su temperatura máxima de 150 °C y por más de 3 horas. La placa de

control se presenta en la figura 4.1, el circuito eléctrico se encuentra en la figura 3.14.

2. Si las condiciones de operación del horno de secado se cumplen, se enciende el sistema de recuperación de calor del horno de curado con el pulsador el cual enciende el sistema de tiro forzado (ventilador centrífugo) para hacer circular aire atmosférico por el recuperador de calor y de allí al horno de curado a aproximadamente 100°C, paralelamente se energiza la resistencia eléctrica de 606 W.
3. El sistema cuenta con luces indicadoras de encendido y apagado
4. Se debe programar el temporizador para el tiempo estimado de operación, el cual una vez cumplido este, apagará el sistema desenergizando, tanto el ventilador como la resistencia eléctrica.
5. Una vez apagado el sistema se debe esperar cerca de 15 minutos para abrir la puerta del horno de curado para que el aire caliente sea evacuado por convección natural por los ductos de aire de salida.

**Figura 4.1** Tablero de control sistema de recuperación de calor



Nota: la placa de control se localiza a un costado del horno de curado.

## **4.3 Mantenimiento**

El presente subcapítulo tiene por objetivo dar a conocer los cuidados y operaciones necesarias en relación al mantenimiento y limpieza del sistema de recuperación de calor residual de los gases de combustión del horno de secado. Se inicia con el recuperador de calor, ventilador centrífugo, líneas de conducción de aire y sistema eléctrico. Las acciones descritas corresponden al mantenimiento preventivo a realizar durante las paradas de la empresa y que deben ser coordinadas con la dependencia de mantenimiento.

### **4.3.1 Recuperador de calor**

El funcionamiento inadecuado del equipo puede tener su origen en:

- Exceso de suciedad. La formación de una capa de suciedad sobre los tubos puede disminuir el rendimiento del recuperador, también se puede manifestar con un aumento ligero en la caída de presión
- Bolsas ya sea de gas de combustión o de aire atmosférico por incorrecto conexionado o ausencia de viento en el recuperador. En todo caso antes de realizar cualquier operación de limpieza del haz de tubos se debe verificar si la disminución en el rendimiento no es propiciada por gases atrapados en los tubos.
- Corrosión en cualquier parte del recuperador: coraza, haz de tubos, acoples. Lo que generaría disminución en los espesores, porosidades y fugas.

#### **Mantenimiento recuperador de calor**

Se recomienda no exceder la capacidad del equipo, aumentando caudal, modificando diámetros de tubería u otra modificación que altere el diseño original. La inspección es exterior e interior.

- Exterior.

Tipo de inspección: visual

Descripción: cada vez que funcione el equipo, no requiere el paro del proceso, es mas se recomienda hacerlo durante la operación para observar posibles fugas, sonidos tipo silbido, olor a gas. Inspección visual de superficies o uniones corroídas.

Periodicidad: Durante la operación del equipo

- Interior.

Tipo de inspección: visual

Descripción: para observar corrosión, grietas, estados de las uniones soldadas, acumulación de suciedad. Se debe hacer inicialmente observación visual y solo en caso que así lo amerite, ensayos no destructivos (tales como tintas penetrantes o ultrasonido para medir espesores). En caso de desmonte, se debe despresurizar, ventear (sopletear) y purgar de cualquier residuo. Cuando no sea posible el desmonte, entonces se puede realizar prueba de presión, inyectando aire presurizado. La cual consiste en un ensayo hidrostático para observar posibles fugas. Otras pruebas que se pueden ejecutar dependiendo de la disponibilidad de herramientas es el uso de endoscopio.

Periodicidad: Anual

Limpieza de equipos. Con el objetivo de mantener la eficiencia y evitar puntos de formación de poros y óxidos. Se puede llevar a cabo por medios mecánicos, circulando aire a alta velocidad tanto por los tubos como por la coraza y con cepillos helicoidales de alambre.

### **4.3.2 Ventilador centrifugo**

En general hay que verificar el balanceo, lubricación y conexión eléctrica, en todo caso se debe suspender la energía en caso de intervención. Limpiar las piezas que están en contacto con el flujo de aire en particular los alabes, pues mucha acumulación de suciedad puede generar desbalances

- Partes estáticas

Tipo de inspección: visual

Descripción: Limpieza del interior de la carcasa y conductos de entrada y salida del ventilador.

Periodicidad: 6 meses

- Rotor

Tipo de inspección: visual

Descripción: limpieza de los alabes, verificar que no halla desbalanceo ni deformaciones que afecten el rendimiento.

Periodicidad: 6 meses

- Rodamientos

Tipo de inspección: visual

Descripción: de acuerdo al fabricante se debe lubricar con grasa a base de Litio ESSO Beacon 325 o en su defecto SHELL OIL-Alvania Greace R3. Hacer cambio de rodamientos cada 100000 horas de operación

Periodicidad: 6 meses

- Motor eléctrico

Se resume en una inspección periódica para verificar los estados de aislamientos, temperatura y desgaste acelerado de los rodamientos. La inspección se realiza con el sistema des energizado, efectuar limpieza externa de polvo y residuos de aceite.

Tipo de inspección: visual

Descripción: limpieza de carcaza con principal atención en rejillas de ventilación. Inspeccionar de manera visual el cableado de oxidación, ajustes, etc. Al cerrar cambiar empaques.

Periodicidad: 6 meses

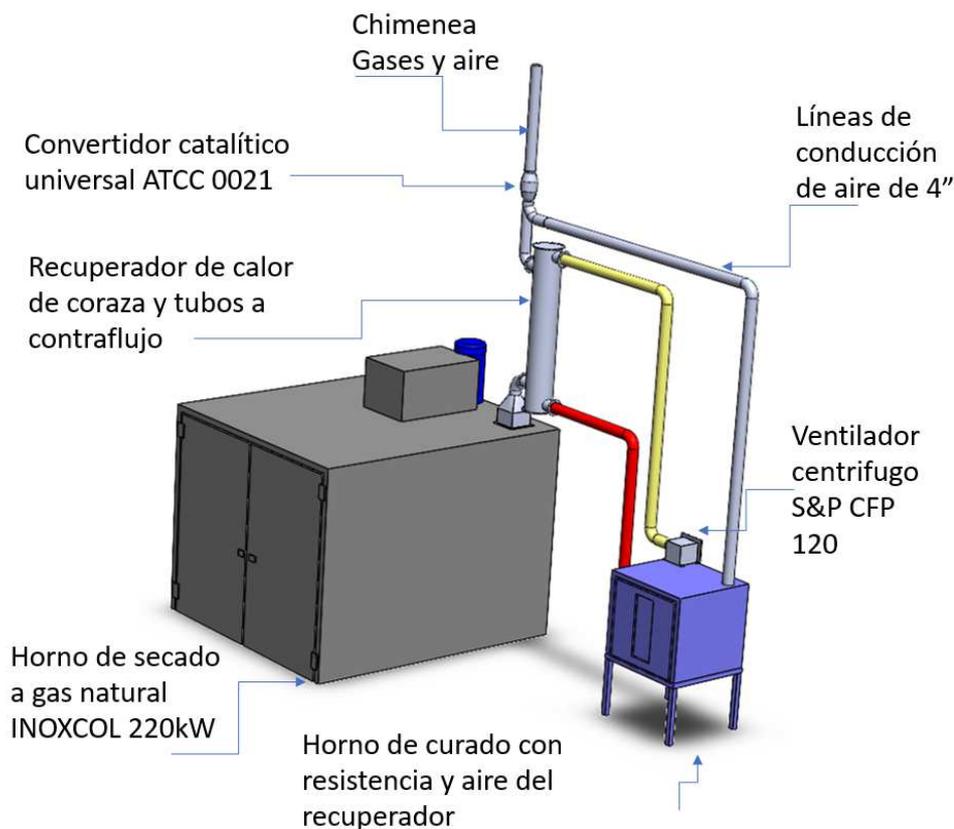
### **4.3.3 Líneas de conducción de aire y gas**

Básicamente se trata de inspección visual de las superficies para constatar que estén libres de corrosión, grietas y porosidades para prevenir fugas y pérdidas. Se debe efectuar limpieza de la parte externa e interna mediante aire a presión alta durante los paros programados. Verificar los aprietes de las uniones con brida.

## 5. Resultados

Una vez realizado el diseño presentamos los resultados del cálculo y selección de los diferentes componentes del sistema de recuperación de calor de los gases de la combustión del horno de secado en industrias GVR, así como los costos asociados a la fabricación y montaje, retorno a la inversión y análisis energético.. En la figura 5.1 se observa el horno de secado que funciona a una temperatura de 150°C y cuyos gases salen para pasar a través del recuperador a 138°C y salen a 96.8°C según se estableció en el capítulo anterior. La potencia térmica suministrada por el fabricante para el horno es de 220 kW. Los gases de combustión del gas natural ingresan al recuperador de calor a la coraza a una razón de 43.56 m<sup>3</sup>/h e intercambian energía en forma de calor (2.24 kW) con el aire quien ingresa por los tubos a razón de 104.4 m<sup>3</sup>/h y 26°C saliendo del equipo a 100°C para dirigirse al horno de curado.

**Figura 5.1** Sistema de recuperación de calor Transformadores GVR S.A.S



La línea de conducción de aire caliente del recuperador al horno de curado va aislada mediante fibra de vidrio con un espesor de 1" y cubierta protectora en acero para disminuir las pérdidas de calor. El aire ingresa por la parte inferior y sale por la parte superior del horno de curado para encontrarse con los gases del recuperador y pasar por el filtro, el cual es un convertidor catalítico universal que ejerce control sobre las moléculas de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. Se seleccionó un filtro ATCC 0021. Los gases que salen a la atmosfera por la chimenea son evacuados a una temperatura aproximadamente de 100°C menor a los 138°C con los que se expulsaban antes del sistema diseñado e igualmente más limpio.

El aire atmosférico es impulsado por un ventilador centrifugo S&P CFP 120 a 120V y 20 W de potencia por una línea de aire al recuperador de calor.

El horno de curado que debe trabajar a 120°C debe ser potenciado por una resistencia de 606 W, 480 Ohm, a 220 V y una corriente de 0,92 A, trifasica conectada en triangulo, para alcanzar la temperatura de operación y no por las dos resistencias de 1100W cada una con las que operaba originalmente.

El sistema es controlado manualmente mediante pulsadores de encendido-apagado y todo el grupo de protección eléctrica correspondiente.

## **5.1 Costo de la instalación**

El valor de la instalación de recuperación de calor asciende a siete millones cuatrocientos cuarenta mil pesos moneda legal representado en costo de materiales y equipos, los cuales ya incluyen el IVA y el transporte a la planta de Transformadores GVR. Los insumos eléctricos representan un 10% del costo de los materiales y equipos. La mano de obra para el montaje se estima en un 15% sobre los ítem anteriores (La fabricación, montaje y mano de obra corren por cuenta de la empresa). En la tabla 5.1 se presenta el costo total de la instalación de recuperación de calor residual a partir de los gases de la combustión.

**Tabla 5.1** Costos instalación recuperación de calor de gases residuales del horno de secado

Componente	Unidades	Precio	Subtotal
Ventilador centrífugo	1	\$ 339.900,00	\$ 339.900,00
Convertidor catalítico	1	\$ 591.000,00	\$ 591.000,00
Recuperador de calor	1	\$ 1.500.000,00	\$ 1.500.000,00
Acople horno-recuperador	1	\$ 300.000,00	\$ 300.000,00
Acople recuperador-chimenea	1	\$ 300.000,00	\$ 300.000,00
Aislamiento térmico	m2	\$ 129.000,00	\$ 129.000,00
Lamina protectora aislante térmico cal 23	m2	\$ 87.700,00	\$ 87.700,00
codos 90°	6	\$ 209.000,00	\$ 1.254.000,00
Tubería 4" cal 16	10m	\$ 135.666,00	\$ 1.356.660,00
Tornillería M6 Grado 8	24	\$ 966,66	\$ 23.199,84
Subtotal A			\$ 5.881.459,84
Protecciones		B=Ax0,1	
Pulsadores			
Conductores			
Resistencia			
Subtotal B			
Montaje e instalación		C=(A+B)x0,15	\$ 970.440,00
Total		A+B+C	\$ 7.440.044,84

## 5.2 Balance energético

El estudio se realiza para el horno de curado, ya que el horno de secado no es intervenido energéticamente hablando. Inicialmente el horno de curado funciona con dos resistencias de 1100 W cada una (2.2 kW) y un consumo de 10.7 A.

Luego de la intervención el horno funciona por parte del ventilador a 120 V y 20 W. por la resistencia eléctrica 606 W a 220 V y una corriente de 0,92 A. Tenemos entonces una potencia para el nuevo sistema de 626 W (0,626 kW).

Para hacer un calculo estimado de los consumos se asumira un funcionamiento de 3 horas diarias (mínimo) del horno de curado durante 30 días al mes, para ambas situaciones: calentamiento solo con resistencias (2,2 kW) y calentamiento con aire y resistencia (0,626 kW). Ver Tabla 5.2 y 5.3

**Tabla 5.2** *Calculo del consumo energético por mes sin recuperación de calor*

Sistema con dos resistencias de 1100W cada una	
Número de horas de operación al día	3
Días de operación al mes	30
Consumo mensual	190kWh

**Tabla 5.3** *Calculo del consumo energético por mes con recuperación de calor*

Sistema con aire y una resistencia de 626W	
Número de horas de operación	3
días de operación al mes	30
Consumo mensual	56,3kWh

Es decir que mensualmente se presenta un ahorro en consumo de energía eléctrica de 133,7 kWh. Que representa también dejar de emitir a la atmosfera 21,9 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes (En Colombia el factor de emisión de CO<sub>2</sub> por generación eléctrica es de 164,38 gramos por Kwh).

La eficiencia expresada en términos de consumo solo para el horno de curado mediante la recuperación de calor residual a partir de los gases de combustión del gas natural del horno de secado y la implementación de un sistema de ventilación y una resistencia eléctrica, tenemos:

$$n = \left(1 - \frac{\text{Consumo nuevo}}{\text{Consumo actual}}\right) \times 100\%$$

$$n = \left(1 - \frac{56,3}{190}\right) \times 100\%$$

$$n = 70\%$$

Es decir que con el sistema de recuperación de calor residual, en términos de consumo se logra una mejora del 70%.

### 5.3 Disminución de la radiación

La disminución de la radiación en la chimenea del horno de secado al aire ambiente se evidencia en el estudio, cuando la temperatura después del sistema de recuperación de

los gases de combustión es evacuado a 100°C y no a 130°C sin el sistema de recuperación.

La energía ganada por el aire debido a la diferencia de temperaturas entre la superficie del ducto de gases de combustión del horno de secado se determina mediante la ecuación de radiación (Cengel, 2008):

$$Q = \sigma \times \varepsilon \times A \times (T^4 - T_o^4)$$

Donde:

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann  $5.67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$\varepsilon$ : Emisividad del metal con pintura plateada 0.31

A: área superficial del ducto cuadrado para 1 m de longitud y lado 0.2m, 0.8m<sup>2</sup>

T: Temperatura del cuerpo radiante (ducto a aproximadamente 130°C=403K)

To: Temperatura ambiente del aire 26°C (299K)

$$Q = 257,3 \text{ W}$$

Cuando el sistema está funcionando, la temperatura T baja a 100°C (373K), empleando la misma ecuación, se determina que la energía en forma de calor irradiada al medio ambiente de:

$$Q = 159,8 \text{ W}$$

Es decir, la energía en forma de radiación que deja de emitirse a la atmosfera es de 97,5 W esto es un 37% aproximadamente menos de radiación de calor por cada metro lineal de ducto expuesto al medio ambiente.

## 5.4 Recuperación de la inversión

El valor por kWh en la factura de energía (Celsia Colombia S.A E.S.P) es de mil trescientos pesos (\$1300), sin considerar otros conceptos. El costo de funcionamiento promedio al mes del horno de curado es de doscientos cuarenta y siete mil pesos (\$247.000.00 pesos, para un consumo de 190kWh) que para un año asciende a cerca de tres millones de pesos (\$2.964.000.00). Con el sistema diseñado, el valor mensual para un consumo de 56,3 kWh es de setenta y tres mil ciento noventa pesos (\$73.190.00), unos ochocientos setenta y ocho mil doscientos ochenta pesos (\$878.280.00) anuales, lo que indicaría que con la

implementación del sistema de recuperación de calor, a la actualidad se tendría un ahorro de dos millones, ochenta y cinco mil, setecientos veinte pesos (\$2.085.720.00) o beneficio anual (Ci).

Para determinar en cuantos años se obtiene el equilibrio emplearemos la metodología del Valor Actual Neto (VAN), el cual considera que cuando el VAN=0 o un valor positivo se presenta retorno a la inversión:

$$Co = \frac{Ci}{(1 + 0,05)^n}$$

Donde:

Co: es el valor actualizado del beneficio anual

Ci: es el valor del beneficio actual

0,05: corresponde a un valor asumido para efectos de inflación, interés o devaluación del 5% anual.

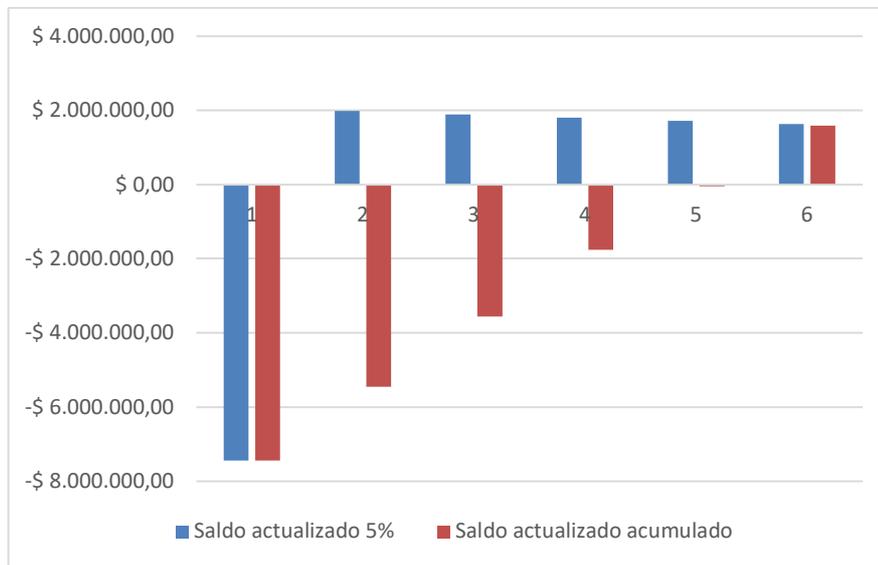
n: es el número del periodo (anual)

En la tabla 5.4 se presenta un proyección respecto al VAN y los periodos correspondientes en años, para estimar en cuál de ellos se logra el retorno a la inversión.

**Tabla 5.4 Retorno a la inversión VAN**

Periodo anualizado		1	2	3	4	5
FF	-\$ 7.440.000,00	\$ 2.085.720,00	\$ 2.085.720,00	\$ 2.085.720,00	\$ 2.085.720,00	\$ 2.085.720,00
Saldo actualizado 5%	-\$ 7.440.000,00	\$ 1.986.400,00	\$ 1.891.809,52	\$ 1.801.723,36	\$ 1.715.927,01	\$ 1.634.216,20
Saldo actualizado acumulado	-\$ 7.440.000,00	-\$ 5.453.600,00	-\$ 3.561.790,48	-\$ 1.760.067,12	-\$ 44.140,11	\$ 1.590.076,09

La figura 5.2 presenta de forma gráfica el VAN, donde se observa que la recuperación de la inversión se inicia a los cinco años de la implementación del proyecto.

**Figura 5.2** *Retorno a la inversión*

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1 Conclusiones**

Con el desarrollo de este trabajo de investigación se ha logrado diseñar un sistema que permite aprovechar de manera efectiva los gases emitidos durante la combustión del gas natural en el horno de secado (Fuente motriz) de la empresa Transformadores GVR Energy S.A.S de la ciudad de Ibagué. Los gases de la combustión salen a 138°C del horno de secado, el aire atmosférico empleado para ser introducido en el horno de curado ingresa a temperatura ambiente y salen del recuperador a 100°C, restando unos 20°C para alcanzar la temperatura de 120°C de operación.

El diseño alcanzado emplea los principios sobre los cuales se rigen los sistemas de cogeneración permitiendo aprovechar los gases de combustión del Gas Natural (Fuente primaria de energía) de la cual se logran establecer sus principales características físicas y químicas para determinar posteriormente los caudales y temperaturas de operación de un sistema de recuperación de calor (tipo coraza y tubo a contraflujo de 1,3m de longitud). El sistema es complementado por un ventilador centrifugo marca S&P CFP 120 a 120V y 20 W, que toma aire atmosférico, lo introduce al recuperador de calor para ganar energía y ser introducido en el horno de curado, el cual para alcanzar su temperatura optima de trabajo (120°C) requiere de una resistencia eléctrica de unos 606 W de potencia y 480Ω.

El consumo final del horno de curado pasa de los 190 kWh al mes a tan solo 56,3 kWh con lo que se consigue un ahorro energético de 133,7 kWh (un 70%), que también se ve reflejado tanto en las finanzas de la empresa como en las emisiones de CO2 equivalentes que so arrojadas a la atmosfera (21,9 toneladas mensuales), el ahorro mensual es de \$ 2.085.720 pesos.

El costo final de la instalación se estima en \$7.440.044 pesos, el cual incluye los materiales, equipos, sistema de control y mano de obra necesaria para el montaje el cual será llevado a cabo por la empresa (un horno industrial a gas con las mismas características está en el orden de los nueve millones de pesos). El retorno a la inversión se lograría a los cinco años de implementado de acuerdo a la metodología del Valor Actual Neto.

Para finalizar, es claro que desde la ingeniería es posible aportar al incremento de la eficiencia en procesos energéticos, al mismo tiempo contribuir con los propósitos y metas

medioambientales para disminuir las emisiones que afectan al medio ambiente, pues se baja de 138 °C a 100°C los gases de escape por la chimenea y al mismo tiempo se actúa mediante un filtro catalizador sobre los monóxidos de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno que no eran intervenidos antes de esta propuesta de diseño.

## **6.2 Recomendaciones**

Se espera que la empresa haga efectivo el estudio para poder evaluar los resultados del diseño y hacer la respectiva retroalimentación.

Igualmente se recomienda no hacer modificación de los equipos, líneas de conducción de aire y gas, pues esto implica cambios en los resultados y en la eficiencia del sistema de recuperación de calor.

Instalar un contador para consumo eléctrico en el horno de curado antes y después de la implementación del proyecto para verificar la reducción del consumo y proyectar de forma más exacta el tiempo de recuperación de la inversión.

Ajustar las acciones de mantenimiento del sistema de recuperación de calor a los paros programados por la empresa.

## Anexo 1: Factura Alcanos S.A.S. ESP para el periodo enero-febrero 2021

**Alcanos de Colombia S.A. E.S.P.**  
 NIT 891.101.577-4 www.alcanosesp.com  
 ESTABLECIMIENTO DE SERVICIOS PÚBLICOS DE GAS  
 AUTORIZADO POR LA COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA Y SECTORES AFILIADOS (CRESA) EN VIRTUD DEL ARTÍCULO 143 DE LA LEY 143 DE 1994 Y DECRETOS 2161 DE 1992 Y 2161 DE 1992 Y 2161 DE 1992 Y 2161 DE 1992

CÓDIGO USUARIO Y/O REFERENCIA DE PAGO ELECTRÓNICO: **837997**

FACTURA No. **118353552**

TOTAL A PAGAR: **\$419,040**

Pago Oportuno Hasta: **16-MAR.-2021**

Fecha de Suspensión: **17-MAR.-2021**

Fecha de Expedición: **22-FEB.-2021 07:30**

Días Facturados: **31**

Periodo Facturado: **ENE.-2021-22-FEB.-2021**

Ultimo Pago: **16-FEB.-2021**

VALORES EN RECLAMACIÓN  
 VALORES PROCESO  
 \$0

**DATOS DEL SUSCRITOR**  
 GILDARDO VARGAS RIOS TRANSFORMADOS RES GVR  
 CR 4 # 23 - 51  
 EL CARMEN  
 IBAGUE

Estrato: IND Ruta: 501817999900  
 Clase de Uso: 54 Medidor No.: 000005631136515  
 Ciclo: 0 Interes de mora %: 1.965  
 Atraso: 0 Interes Corriente %: 1.965

**DESCRIPCIÓN DEL COBRO**

Consumo	\$414,896.13
Ajuste decena	\$1.13
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>\$418,865</b>
Interes por Mora	\$175.17
<b>TOTAL A PAGAR</b>	<b>\$419,040</b>

**DATOS DE MEDICIÓN**  
 CONSUMO MES: **183.11**  
 Causa Cobro  
 Consumo Prom. 18762  
 Lectura Anterior 18965  
 Lectura Actual 203.00  
 Consumo M3 0.902 x  
 Factor 183.11  
 Consumo Corregido 1143.82  
 Consumo Calorífico 2168.02  
 Consumo Kw / H 11.84  
 Valor Kw / H

**CONSUMOS**

Rango	Cons. m <sup>3</sup>	Vr. m <sup>3</sup>	Vr. Parcial
0 - 1000	183.11	\$2,265.83	\$414,896.13

**TARIFAS DE CONSUMO POR RANGO**

COMPONENTES TARIFARIOS

CUm.J	2459.510
CUm.J	3967.570
CUm.J	876.440
Trm.J	658.030
PCm.J	1.140
Cm.J	3967.570
Cm.J	0.000
Trm	876.710
Cm.J	0.000
D	0.560%
FRM	3559.460
FRM	184.300
%S1	60.000
%S2	50.000
afa1	0.000%
afa2	0.000%
afa3	0.000%
afa4	0.000%
%Cy6	20.000
%Cr	8.900
Daur	746.800
Daur	448.560

**CONSUMOS ANTERIORES M3.**

Mes	ENE	DIC	NOV	OCT	SEP	AGO
M3	140.47	120.23	71.34	405	175.89	2.71
	67.65					

**INDICADORES DE CALIDAD**  
 DES: IPL: IO: IRST:

**ESTADO DEL CRÉDITO**

Medido por Alcanos de Colombia S.A. E.S.P. NIT 891.101.577-4

PAGUE SOLO EN COPIAS Y PUNTOS AUTORIZADOS POR LA EMPRESA

El consumo de gas natural durante el periodo de un mes corresponde a 183,11 m<sup>3</sup>, para un tiempo de encendido del horno de secado de 42 horas.

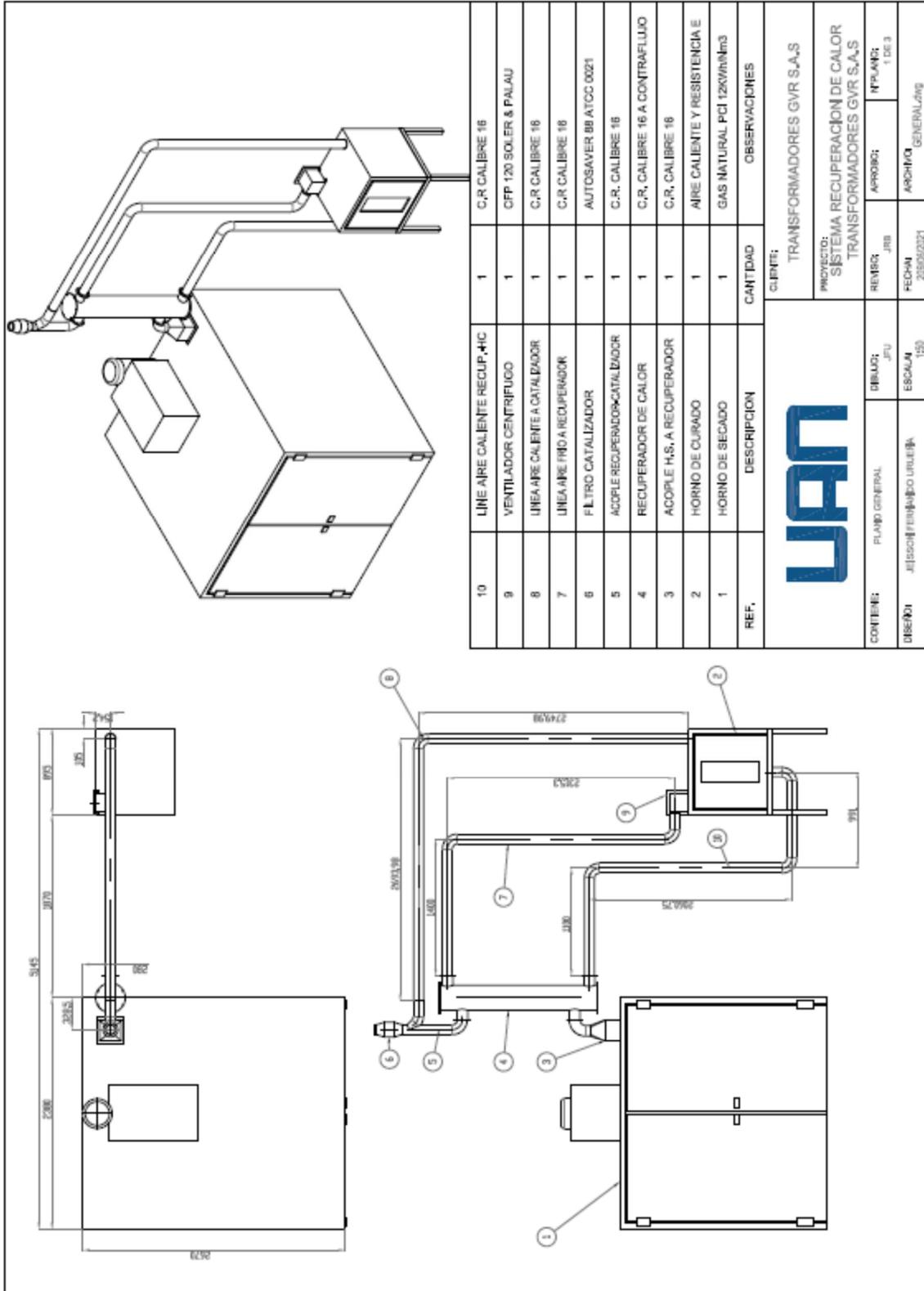


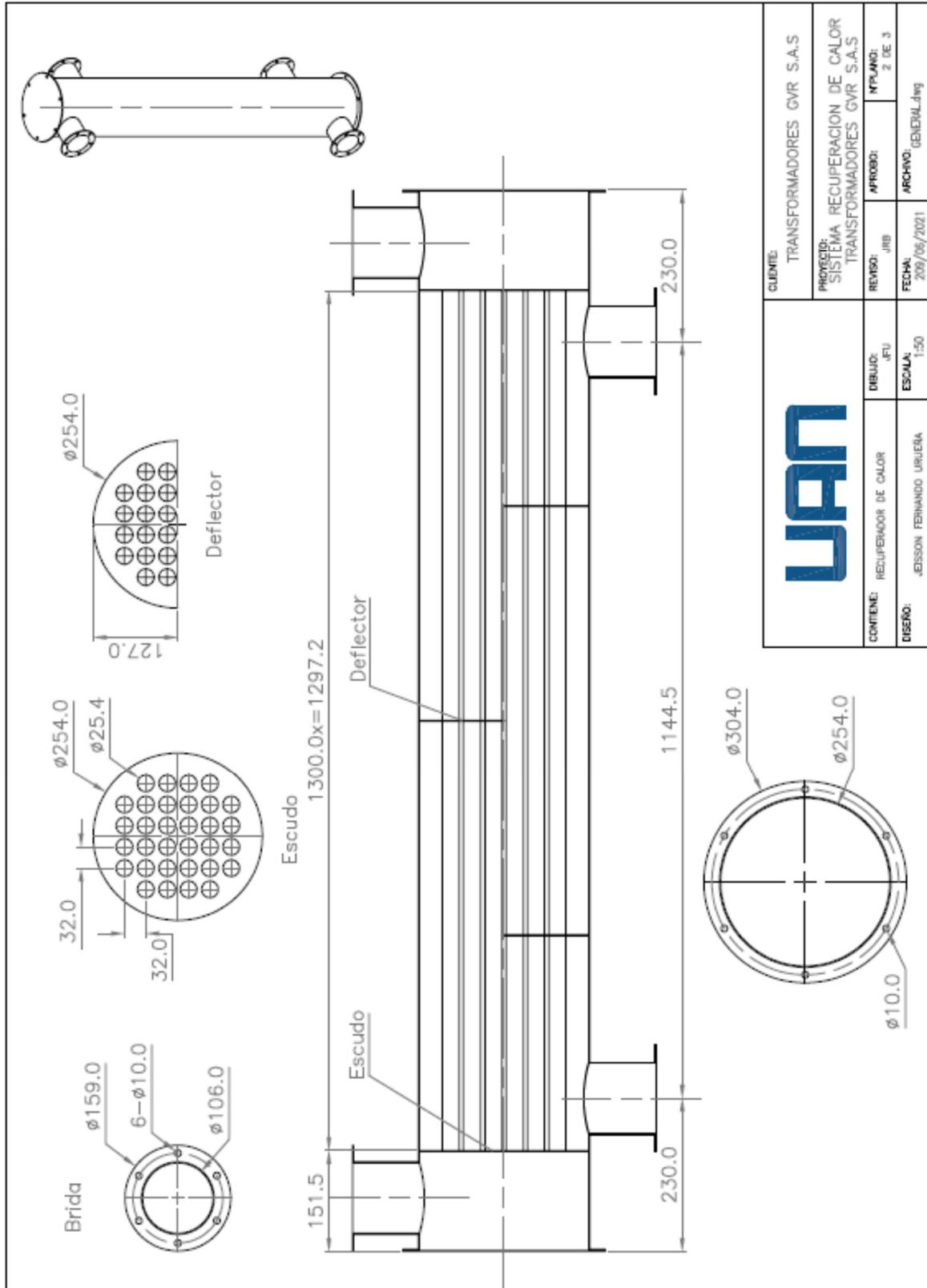
## Anexo 2: Imágenes cámara termográfica

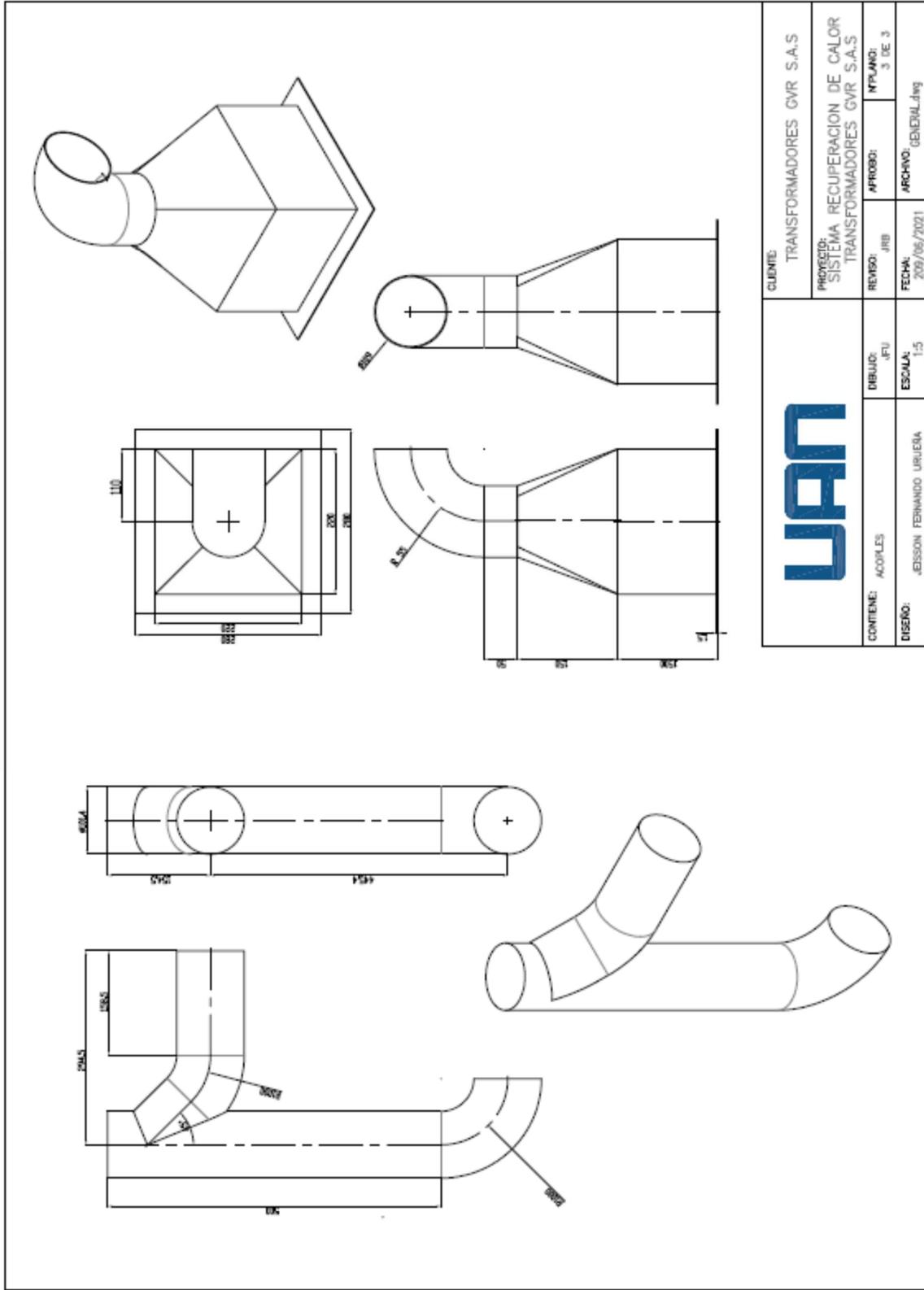


Las lecturas fueron tomadas por el autor el día 17 de abril de 2021 con una cámara termográfica industrial FLIR TG267.

### **Anexo 3: Planos**







### Anexo 4: Ficha técnica ventilador centrifugo

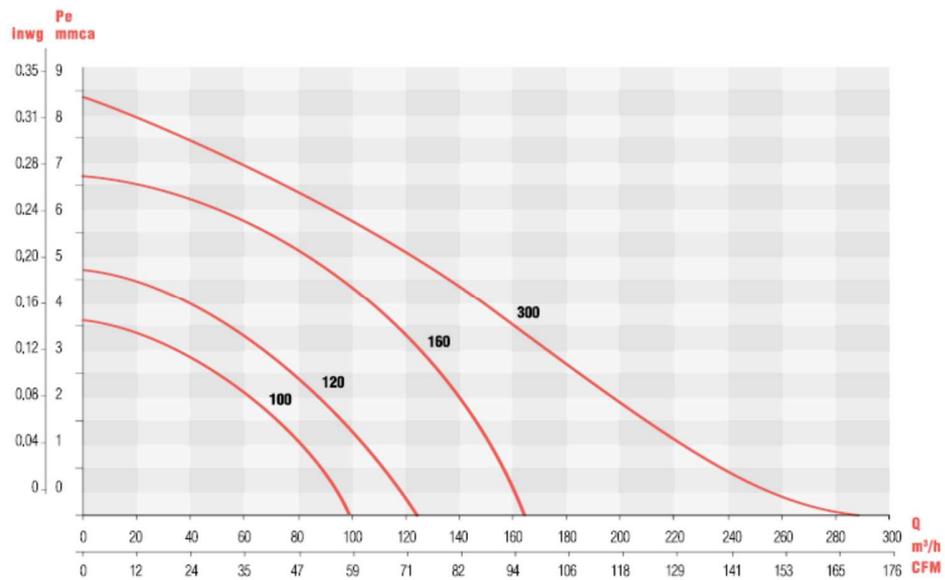
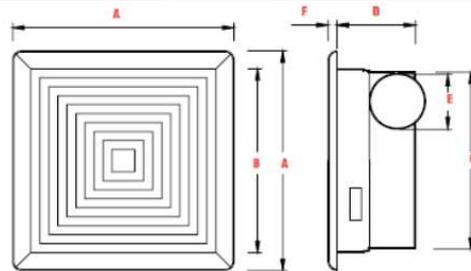


— CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

\* Nivel sonoro medido de acuerdo con las normas AMCA 30005 y 30105

Modelo	Material	Potencia W	Tensión Volts	Caudal a descarga libre m <sup>3</sup> /hr / CFM	Presión sonora dB (A)*	Peso aprox. kg	Frecuencia Hz
CFP 100	Plástico	22	127	100 / 59	30	1.0	60
CFP 120	Plástico	20	127	124 / 73	39	1.5	60
CFP 160	Plástico	32	127	160 / 94	41	2.1	60
CFP 225	Metal	29	127	226 / 133	36	3.2	60
CFP 300	Plástico	39	127	290 / 171	45	2.2	60
CFP 500	Metal	35	127	490 / 288	38	6.4	60
CFP 600	Metal	45	127	605 / 356	42	8.0	60
CFP 900	Metal	105	127	880 / 518	47	9.0	60

Fabricados en plástico.		Dimensiones en mm			
	CFP 100	CFP 120	CFP 160	CFP 300	
A	196	255	322	326	
B	139	205	260	270	
C	148	190	216	270	
D	110	127	131	170	
E	80	100	100	150	
F	10	16	16	18	



**Bibliografía**

Bonilla Madriñan, M., Herrera Flórez, H., & Puertas González, Y. (2017). *Factor de Emisión del Sistema Interconectado Nacional SIN*. UPME.

Cengel, Y. A. (2008). *Transferencia de calor*. Mc GrawHill.

Chavez Mora, M., & Diaz Avalos, A. (s.f). Correlaciones para la conveccion forzada. *Transmision de calor por conveccion*.

Cualtero. (s.f.). *slideplayer*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/122520/>

*Diferentes formas de cogeneracion*. (2019). Obtenido de [tecnoblog.com](https://tecnoblog.com): [https://cdn.shortpixel.ai/client/q\\_glossy,ret\\_img,w\\_830,h\\_460/https://www.tecnoblog.com/wp-content/uploads/2019/12/ciclo-combinado-cogas.jpg](https://cdn.shortpixel.ai/client/q_glossy,ret_img,w_830,h_460/https://www.tecnoblog.com/wp-content/uploads/2019/12/ciclo-combinado-cogas.jpg)

*Eficiencia en un sistema de cogeneracion*. (s.f.). Obtenido de <https://img2.freepng.es/20180502/fwe/kisspng-cogeneration-energy-conservation-efficiency-tecnic-residual-5ae95286637112.7031960515252404544073.jpg>

energeticos.com, c. (s.f.). *soluciones eficiencia energetica*. Obtenido de <https://www.certificadosenergeticos.com/micro-cogeneracion-viviendas-generar-agua-caliente-electricidad>

europa, N. (s.f.). *Slideshare*. Recuperado el 09 de 04 de 2021, de <https://es.slideshare.net/herameca/calderos-combustion-gas-natural>

Fraile, D. (2008). *Google académico*. Recuperado el 08 de 04 de 2021, de [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=ciclo+combinado+sistema+de+cogeneraci%C3%B3n&oq=cogeneracion+sistema](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=ciclo+combinado+sistema+de+cogeneraci%C3%B3n&oq=cogeneracion+sistema)

FUNIBER. (2015). *Introduccion a las energias renovables*. España.

Gascommunity. (2019). Obtenido de <https://gascommunity.com/como-funciona-el-convertidor-catalitico-o-catalizador/>

INOXICOL. (2021). *Máquinas y montajes para industria alimentaria*. Ibagué, Tolima.

Jimenez Carballo, C. (2018). *Dinamica de fluidos ideales*.

Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo S.A.

METROGAS. (2021). *combustion*. Obtenido de [http://www.metrogas.cl/industria/asesoria\\_tecnica\\_1](http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1)

Ontiveros, J. (s.f.). *Dimensionamiento de equipos de transferencia de calor*.

Sogomar. (2017). *Ventilador centrifugo de alta presion*. Obtenido de [https://es.made-in-china.com/co\\_sogomar-2017/product\\_9-19-High-Pressure-Centrifugal-Blower-Fan-for-Exhausting-and-Ventilating\\_rnuihuog.html](https://es.made-in-china.com/co_sogomar-2017/product_9-19-High-Pressure-Centrifugal-Blower-Fan-for-Exhausting-and-Ventilating_rnuihuog.html)

Soler y Palau ventilación Group. (Abril de 2012). *manual práctico de ventilación*. Obtenido de [www.solerpalau.es](http://www.solerpalau.es)

UPME. (2019). *Plan Energético Nacional 2020-2050*. Obtenido de Documento de consulta: [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_documento\\_para\\_consult](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consult)

Villaflor , G., Morales, G., & Velasco, J. (2008). Variables significativas del proceso de combustión del gas natural. *Información Tecnológica*, 19(4).

wixsite.com. (2016). *Energías renovables*. Obtenido de <https://lidiaperezrubio.wixsite.com/arquitecturayenergia/single-post/2016/08/12/energ%C3%ADas-renovables-4-cogeneraci%C3%B3n>

Bonilla Madriñan, M., Herrera Flórez, H., & Puertas González, Y. (2017). *Factor de Emisión del Sistema Interconectado Nacional SIN*. UPME.

Cengel, Y. A. (2008). *Transferencia de calor*. Mc GrawHill.

Chavez Mora, M., & Diaz Avalos, A. (s.f). Correlaciones para la conveccion forzada. *Transmision de calor por conveccion*.

Cualtero. (s.f.). *slideplayer*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/122520/>

*Diferentes formas de cogeneracion.* (2019). Obtenido de tecnoblog.com:  
[https://cdn.shortpixel.ai/client/q\\_glossy,ret\\_img,w\\_830,h\\_460/https://www.tecnoblog.com/wp-content/uploads/2019/12/ciclo-combinado-cogas.jpg](https://cdn.shortpixel.ai/client/q_glossy,ret_img,w_830,h_460/https://www.tecnoblog.com/wp-content/uploads/2019/12/ciclo-combinado-cogas.jpg)

*Eficiencia en un sistema de cogeneracion.* (s.f.). Obtenido de  
<https://img2.freepng.es/20180502/fwe/kisspng-cogeneration-energy-conservation-efficiency-tecnic-residual-5ae95286637112.7031960515252404544073.jpg>

Energeticos.com, c. (s.f.). *soluciones eficiencia energetica.* Obtenido de  
<https://www.certificadosenergeticos.com/micro-cogeneracion-viviendas-generar-agua-caliente-electricidad>

Europea, N. (s.f.). *Slideshare.* Recuperado el 09 de 04 de 2021, de  
<https://es.slideshare.net/herameca/calderos-combustion-gas-natural>

Fraile, D. (2008). *Google académico.* Recuperado el 08 de 04 de 2021, de  
[https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=ciclo+combinado+sistema+de+cogeneraci%C3%B3n&oq=cogeneracion+sistema](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=ciclo+combinado+sistema+de+cogeneraci%C3%B3n&oq=cogeneracion+sistema)

FUNIBER. (2015). *Introduccion a las energias renovables.* España.

Gascommunity. (2019). Obtenido de <https://gascommunity.com/como-funciona-el-convertidor-catalitico-o-catalizador/>

INOXICOL. (2021). *Máquinas y montajes para industria alimentaria.* Ibagué, Tolima.

Jimenez Carballo, C. (2018). *Dinamica de fluidos ideales.*

Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máuinas hidráulicas.* Madrid: Ediciones del Castillo S.A.

METROGAS. (2021). *combustion.* Obtenido de  
[http://www.metrogas.cl/industria/asesoria\\_tecnica\\_1](http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1)

Ontiveros, J. (s.f.). *Dimensionamiento de equipos de transferencia de calor.*

- 
- Sogomar. (2017). *Ventilador centrifugo de alta presion*. Obtenido de [https://es.made-in-china.com/co\\_sogomar-2017/product\\_9-19-High-Pressure-Centrifugal-Blower-Fan-for-Exhausting-and-Ventilating\\_rnuihruog.html](https://es.made-in-china.com/co_sogomar-2017/product_9-19-High-Pressure-Centrifugal-Blower-Fan-for-Exhausting-and-Ventilating_rnuihruog.html)
- Soler y Palau ventilación Group. (Abril de 2012). *manual práctico de ventilación*. Obtenido de [www.solerpalau.es](http://www.solerpalau.es)
- UPME. (2019). *Plan Energético Nacional 2020-2050*. Obtenido de Documento de consulta: [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_documento\\_para\\_consult](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consult)
- Villaflor , G., Morales, G., & Velasco, J. (2008). Variables significativas del proceso de combustión del gas natural. *Información Tecnológica*, 19(4).
- wixsite.com. (2016). *Energías renovables*. Obtenido de <https://lidiaperezrubio.wixsite.com/arquitecturayenergia/single-post/2016/08/12/energ%C3%ADas-renovables-4-cogeneraci%C3%B3n>