



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA DE UN  
GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT PARA LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA GENERADOR  
DE VAPOR PARA APLICACIONES TÉRMICAS**

**AUTORES: QUIÑÓNEZ IBUJES, ALEX FERNANDO**

**TAIPE UNAPUCHA, CRISTHIAN FERNANDO**

**DIRECTOR: ING. AYALA TACO JAIME PAÚL**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA DE UN GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA GENERADOR DE VAPOR PARA APLICACIONES TÉRMICAS" realizado por el señor **QUIÑÓNEZ IBUJÉS ALEX FERNANDO** y el señor **TAIPE UNAPUCHA CRISTHIAN FERNANDO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto, me permito acreditarlo y autorizar al señor **QUIÑÓNEZ IBUJÉS ALEX FERNANDO** y al señor **TAIPE UNAPUCHA CRISTHIAN FERNANDO** para que lo sustenten públicamente.

**Sangolquí, 2 de marzo del 2017**

Atentamente,

Ing. Paúl Ayala  
Director



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **QUIÑÓNEZ IBUJÉS ALEX FERNANDO**, con cédula de identidad N° 100333770-4, y **TAIPE UNAPUCHA CRISTHIAN FERNANDO**, con cédula de identidad N° 172255163-5, declaramos que este trabajo de titulación **"OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA DE UN GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA GENERADOR DE VAPOR PARA APLICACIONES TÉRMICAS"** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 2 de marzo del 2017**

Atentamente,

Quiñónez Ibjés Alex Fernando

CC: 100333770-4

Taipe Unapucha Cristhian Fernando

CC: 172255163-5



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **QUIÑÓNEZ IBUJÉS ALEX FERNANDO**, y **TAIPE UNAPUCHA CRISTHIAN FERNANDO** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA DE UN GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA GENERADOR DE VAPOR PARA APLICACIONES TÉRMICAS”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

**Sangolquí, 2 de marzo del 2017**

Atentamente,

Quiñónez Ibugés Alex Fernando

CC: 100333770-4

Taipe Unapucha Cristhian Fernando

CC: 172255163-5

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de tesis a Dios, porque es lo importante en mi vida.

A mi madre, por dedicarme gran parte de su vida.

A mi padre, por su lucha y esfuerzo.

Cristhian Fernando Taípe Unapucha

## DEDICATORIA

*Dedico este proyecto de tesis a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.*

*A mis padres, por apoyarme todo este tiempo y que siempre creyeron en mí.*

*A mis hermanas que siempre están a mi lado y a pesar de yo ser el mayor ellas me enseñan mucho a mí.*

*Y a una persona muy especial que siempre estará en mi corazón, que me motivó a ser mejor cada día*

*Alex Fernando Quiñónez Ibujes*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme seguir con vida para superarme cada día.

A mis padres por su esfuerzo diario y por no dejarme desviarme del camino correcto.

A mi hermano que siempre me mira como su ejemplo a seguir y eso me motiva a ser mejor cada día.

A mi compañero de tesis Alex Quiñónez que gracias a su gran aporte diario logramos conseguir lo propuesto.

A toda mi familia y amigos que ayudaron para que logre culminar el proyecto y la carrera.

A los Ingenieros Paúl Ayala y Roberto Gutiérrez quienes apoyaron con sus conocimientos durante todo este proyecto de tesis.

Cristhian Fernando Taipe Unapucha

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a largo de mi carrera profesional.

A mis padres por ser mis guías y apoyarme en todo momento de mi vida, a mi madre por darme palabras de aliento y nunca dejar que me rinda, a mi padre que me enseñó a ser un hombre responsable.

A mis hermanas que siempre me han cuidado y han estado a mi lado, siempre seré un buen ejemplo para ellas y nunca les fallaría.

A mi compañero de tesis Cristhian Taipe que a pesar de los problemas pudimos cumplir nuestro objetivo planteado.

A toda mi familia que directa o indirectamente puso su granito de arena durante mi formación profesional.

A mi Director de tesis Ing. Paúl Ayala, quien me apoyó y guió durante todo este proyecto de tesis.

*Alex Fernando Quiñónez Ibujes*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |      |
|--|------|
| CERTIFICACIÓN.....                               | i    |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....                 | ii   |
| AUTORIZACIÓN.....                                | iii  |
| DEDICATORIA .....                                | iv   |
| DEDICATORIA .....                                | v    |
| AGRADECIMIENTO .....                             | vi   |
| AGRADECIMIENTO .....                             | vii  |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS .....                       | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                           | x    |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                           | xi   |
| RESUMEN.....                                     | xiii |
| ABSTRACT .....                                   | xiv  |
| CAPÍTULO 1 .....                                 | 1    |
| ESTADO DEL ARTE.....                             | 1    |
| 1.1 Objetivos.....                               | 2    |
| 1.1.1 Objetivo General.....                      | 2    |
| 1.1.2 Objetivo Específico.....                   | 2    |
| 1.2 Alcance del proyecto .....                   | 2    |
| 1.3 Justificación .....                          | 3    |
| 1.4 Antecedentes.....                            | 5    |
| 1.4.1 La cogeneración en el Ecuador .....        | 6    |
| 1.5 Conceptos termodinámicos .....               | 7    |
| 1.5.1 Gasificación .....                         | 7    |
| 1.5.2 Gasificador Updraft.....                   | 8    |
| 1.5.3 Gasificador Downdraft .....                | 8    |
| 1.5.4 Proceso de Gasificación en el Reactor..... | 9    |
| 1.5.5 Reacciones en la gasificación .....        | 12   |
| 1.5.6 Transferencia de calor .....               | 12   |
| 1.5.7 Mecanismos de Transferencia de Calor ..... | 13   |
| 1.5.8 Conducción.....                            | 13   |

|   |    |
|---|----|
| 1.5.9 Convección.....   | 14 |
| 1.5.10 Radiación.....   | 15 |
| 1.5.11 Intercambiador de Calor .....  | 16 |
| 1.5.12 Generadores de vapor.....  | 16 |
| 1.5.13 Clasificación de los Intercambiadores de Calor .....                   | 16 |
| 1.5.14 Recipientes encamisados.....   | 17 |
| 1.5.15 Cogenerar.....   | 18 |
| 1.5.16 Disposición tecnológica de cogeneración.....                           | 18 |
| 1.5.17 Cogeneración con turbina de gas en ciclo simple .....                  | 19 |
| 1.5.18 Cogeneración con turbina de vapor.....                                 | 20 |
| 1.5.19 Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas .....               | 21 |
| 1.5.20 Cogeneración con motor alternativo de gas o fuel en ciclo simple ..... | 21 |
| 1.6 Conceptos Electrónicos .....  | 22 |
| 1.6.1 Sensores .....  | 22 |
| 1.6.2 Sensor de temperatura.....  | 23 |
| 1.6.3 Termómetros de dilatación .....   | 23 |
| 1.6.4 Termómetros sensibles a la resistencia.....                             | 23 |
| 1.6.5 Termopares .....  | 24 |
| 1.6.6 Tipos de termopares.....  | 24 |
| 1.6.7 Método sin contacto.....  | 25 |
| 1.6.8 Sensor de caudal o caudalímetros .....                                  | 25 |
| 1.6.9 Actuador .....  | 26 |
| 1.6.10 Microcontrolador .....   | 26 |
| 1.6.11 Sistema de control.....  | 27 |
| CAPÍTULO 2.....   | 28 |
| PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN.....   | 28 |
| 2.1 Reactor de gasificación .....   | 28 |
| 2.2 Ciclón de Gasificación .....  | 29 |
| 2.3 Filtro de gas.....  | 30 |
| 2.4 Sistema de transmisión de gas.....  | 31 |
| 2.5 Quemador.....   | 32 |
| 2.6 Diseño Térmico.....   | 33 |
| 2.6.1 Diseño del encamisado térmico.....                                      | 33 |

|  |    |
|--|----|
| 2.6.2 Análisis matemático de la transferencia de calor.....                            | 34 |
| 2.7 Diseño Eléctrico.....  | 38 |
| 2.7.1 Magnitudes físicas de interés .....  | 38 |
| 2.7.2 Selección del sensor de temperatura .....  | 39 |
| 2.7.3 Acondicionamiento de la termocupla tipo K.....                                   | 40 |
| 2.7.4 MAX31855 termopar tipo K .....   | 41 |
| 2.7.5 Selección del sensor de Caudal .....   | 42 |
| 2.7.6 Selección del actuador .....   | 46 |
| 2.7.7 Electroválvula .....   | 46 |
| 2.7.8 Selección del microcontrolador.....  | 47 |
| CAPÍTULO 3.....  | 49 |
| IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....   | 49 |
| 3.1 Adquisición de datos.....  | 49 |
| 3.2 Planta del sistema .....   | 51 |
| 3.3 Validación de los Datos .....  | 53 |
| 3.4 Función de transferencia .....   | 54 |
| 3.5 Diseño del Controlador.....  | 58 |
| 3.5.1 Fórmula empírica para la sintonización de controladores de Ziegler-Nichols ..... | 60 |
| 3.6 Plan Financiero.....   | 64 |
| Bibliografía.....  | 65 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Tipos de termocuplas.....   | 24 |
| Tabla 2 Temperaturas medidas en las zonas del reactor de gasificación.... | 29 |
| Tabla 3 Rangos de medición de Caudalímetros .....                         | 43 |
| Tabla 4 Especificaciones técnicas Arduino.....                            | 47 |
| Tabla 5 Adquisición de datos.....   | 50 |
| Tabla 6 Fórmulas de sintonización de Ziegler-Nichols.....                 | 61 |
| Tabla 7 Presupuesto en dólares. ....                                      | 64 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Gasificador tipo downdraft .....   | 5  |
| Figura 2 Gasificador Updraft.....   | 8  |
| Figura 3 Gasificador Downdraft.....   | 9  |
| Figura 4 Esquema de proceso de gasificación .....   | 10 |
| Figura 5 Reacciones presentes en la gasificación .....  | 12 |
| Figura 6 Flujo de calor a través de una pared .....   | 13 |
| Figura 7 Clasificación de los Intercambiadores de Calor .....   | 17 |
| Figura 8 Recipiente Enchaquetado.....   | 18 |
| Figura 9 Planta de cogeneración con turbina de gas.....   | 19 |
| Figura 10 Planta de cogeneración con turbina de vapor.....  | 20 |
| Figura 11 Planta de cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas .                                    | 21 |
| Figura 12 Planta de cogeneración con motor alternativo .....  | 22 |
| Figura 13 Funcionamiento de una termocupla.....   | 24 |
| Figura 14 Placa de obstrucción para la medida de caudal empleando un<br>sensor de presión diferencial ..... | 26 |
| Figura 15 Reactor del Gasificador .....   | 28 |
| Figura 16 Ciclón del Gasificador.....   | 30 |
| Figura 17 Filtro del Gasificador .....  | 30 |
| Figura 18 Sistema de transmisión de gas .....   | 31 |
| Figura 19 Quemador.....   | 32 |
| Figura 20 Gasificador con un nuevo sistema de filtrado y transmisión de gas<br>.....                        | 33 |
| Figura 21 Camisa Térmica del Gasificador.....   | 37 |
| Figura 22 Medidas de la camisa térmica .....  | 37 |
| Figura 23 Termocupla Tipo K.....  | 39 |
| Figura 24 Módulo SEN-30004: MAX31855.....   | 40 |
| Figura 25 Módulo SEN-30004, conexión a Arduino.....   | 41 |
| Figura 26 Sensor de flujo YF-S201.....  | 43 |
| Figura 27 Conexión del sensor de flujo YF-201 con Arduino.....  | 45 |
| Figura 28 Electroválvula de agua Inlet AC 110V.....   | 46 |
| Figura 29 Arduino UNO .....   | 47 |
| Figura 30 Sistema de Adquisición de Datos .....   | 50 |
| Figura 31 Valores de Caudal y Temperatura importados a MATLAB®.....   | 52 |
| Figura 32 Importación de datos a IDENT.....   | 52 |
| Figura 33 a) Temperatura de vapor en función del tiempo b) Entrada de<br>Caudal tipo escalón.....           | 53 |
| Figura 34 Validación de Datos .....   | 54 |
| Figura 35 Respuesta de Procesos a una entrada Escalón .....   | 55 |
| Figura 36 Modelamiento de la Planta con dos Polos, un Zero y sin Retardo                                    | 56 |
| Figura 37 Modelamiento de la Planta con dos Polos, sin Zero y sin Retardo<br>.....                          | 56 |
| Figura 38 Modelos Matemáticos de la Planta .....  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 39 Curva característica “S” de la salida ante una entrada escalón...   | 60 |
| Figura 40 Sistema en Lazo Abierto.....  | 61 |
| Figura 41 Obtención de los valores $a$ , $k$ , $L$ y $T$ , del modelo de la planta ante entrada escalón en lazo abierto ..... | 61 |
| Figura 42 Sistema Lazo Cerrado .....  | 62 |
| Figura 43 Diagrama de bloques del Sistema Controlado.....   | 63 |
| Figura 44 Respuesta del Sistema Controlado en función del tiempo.....   | 63 |

## RESUMEN

El siguiente proyecto está conformado por el estudio, análisis y diseño de un sistema de vapor con el objetivo de optimizar el funcionamiento termodinámico de un gasificador tipo downdraft para un Jeep Willys 1974, junto con la cooperación de los docentes del departamento de energía y mecánica y del departamento de eléctrica y electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. La importancia de este proyecto radica en la necesidad de innovar y mejorar diseños preestablecidos, en este caso el gasificador, el cual trabaja a altas temperaturas para producir gas a partir de biomasa, por lo que se plantea aprovechar la temperatura con la que el gasificador trabaja para también utilizarla en el funcionamiento de un sistema de vapor instalado en el mismo gasificador donde es necesario establecer las dimensiones y los componentes necesarios para adaptarlos y añadirlos al gasificador ya que también se necesita un sistema de flujo de agua controlado mientras el gasificador mantenga una temperatura óptima para producir vapor, todo a partir de un estudio previo de las características del funcionamiento del gasificador, también el estudio de transferencia de calor, análisis de señales y control de las mismas.

### **Palabras clave:**

- **GASIFICADOR**
- **SISTEMA**
- **DOWNDRAFT**
- **CONTROL**
- **OPTIMIZACIÓN**

## **ABSTRACT**

The following project consists of the study, analysis and design of a steam system with the objective of optimizing the thermodynamic performance of a downdraft gasifier for a Jeep Willys 1974, together with the cooperation of the department of energy and mechanics and Of the department of electrical and electronics of the University of the Armed Forces ESPE. The importance of this project lies in the need to innovate and improve pre-established designs, in this case the gasifier, which works at high temperatures to produce gas from biomass, so it is proposed to take advantage of the temperature with which the gasifier works To also use it in the operation of a steam system installed in the same gasifier where it is necessary to establish the dimensions and components necessary to adapt them and add them to the gasifier since a controlled water flow system is also needed while the gasifier maintains a temperature Ideal to produce steam, all from a previous study of the characteristics of the gasifier operation, also the study of heat transfer, signal analysis and control thereof.

### **Keywords:**

- **GASIFIER**
- **SYSTEM**
- **DOWNDRAFT**
- **CONTROL**
- **OPTIMIZATION**

## CAPÍTULO 1

### ESTADO DEL ARTE

A partir del gasificador tipo downdraft que se implementó en el laboratorio de energías renovables del DECEM-ESPE, se aprovechará la energía térmica para la producción de vapor, se propone implementar un sistema de transferencia de calor. Que permite aprovechar el calor producido en la zona de combustión del gasificador. El sistema contará de 4 partes descritas a continuación:

- **Zona de Gasificador:** Esta zona se encuentra ubicada en la estructura del gasificador. Se realizaron pruebas de medición en las zonas del gasificador, para determinar donde se produce la mayor cantidad de calor. Las zonas de trabajo con mayor temperatura fueron: en la combustión y la de reducción.
- **Encamisado Térmico:** El sistema de transferencia de calor adecuado para la aplicación es una camisa térmica, ya que en esta se produce la mayor conducción de calor por área de contacto.
- **Sistema de alimentación de agua:** Es necesario para la producción del vapor disponer de un sistema de alimentación de agua para tener un flujo constante de vapor, el cual será controlado mediante la variación de caudal de agua según sea necesario.
- **Sistema de Control:** En el presente proyecto se procederá a la identificación experimental del modelo matemático del sistema de gasificación y generador de vapor, con el que se determinará la planta, a la cual se aplicarán medidas de control lineal en puntos determinados del sistema. Al depender de las necesidades del control a implementar se determinará el microcontrolador adecuado.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

- Diseñar e implementar un sistema de cogeneración en el gasificador tipo downdraft para aplicaciones térmicas.

### **1.1.2 Objetivo Específico**

- Diseñar e implementar la estructura mecánica del sistema intercambiador de calor para el sistema cogenerador en el gasificador downdraft.
- Diseñar un sistema para la adquisición de datos de las señales de temperatura y caudal.
- Diseñar un control de temperatura en el intercambiador de calor.
- Realizar pruebas de funcionamiento para garantizar el óptimo desempeño del sistema cogenerador.

## **1.2 Alcance del proyecto**

Tener al gasificador en funcionamiento y disponer de un sistema alternativo de vapor que se desea diseñar y construir. Si se tiene como punto de partida el sistema mecánico, que en este caso será el gasificador tipo downdraft perteneciente al Jeep Willys, del laboratorio de Motores de Combustión Interna, de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, el cual será facilitado como objeto de investigación, experimentación y pruebas, mismo al que se le instalará un sistema de vapor de agua, dotado de una tubería de cobre o camisa de acero, a través de la cual habrá una alimentación continua

de agua la cual se evaporará a una determinada temperatura, presión y caudal. La variable controlada electrónicamente permitirá al controlador determinar la cantidad necesaria de caudal de agua para poner en marcha el sistema de vapor.

### 1.3 Justificación

Al tener en cuenta el grado de contaminación de los combustibles fósiles es importante desarrollar aplicaciones con energías renovables. Ya que el cuidado ambiental es prioritario en nuestros días.

En el proceso de investigación que se realiza en la ESPE en el área de Energías Renovables, se han desarrollado varios proyectos como: paneles solares, proyectos de energía térmica, y gasificadores. Ahora se piensa desarrollar un control automatizado para el uso óptimo de la energía calórica y disminuir la pérdida energética que se da en el proceso de gasificación donde dicha pérdida acarrea un costo monetario alto.

Algunas de las aplicaciones más importantes basadas en la gasificación y cogeneración son:

- **Calefacción:** Producción de calor que se da a partir de la gasificación por medio de una caldera para usos industriales, residenciales o servicios.
- **Electricidad:** A través de motores alternativos, turbinas de gas, turbinas de vapor, cogeneración, gasificación integrada en ciclo combinado - GICC y pilas de combustible (en la que el combustible es el hidrógeno obtenido a partir del gas generado en la gasificación).
- **Transporte** El uso del gas pobre directamente en un motor de combustión interna obtenido mediante gasificación.

Existe, sin embargo, un gran potencial a desarrollar en el sector terciario (uso personal), tanto en el área doméstica (calor y frío de distrito,

cogeneración de pequeña escala y micro cogeneración) como en actividades comerciales (hospitales, hoteles, centros comerciales). (INER, 2015)

Se puede establecer como ventajas de uso de la cogeneración a: su versatilidad, que es la posibilidad de obtener la energía en el momento que ésta se requiera; la menor contaminación ambiental, ya que se obtiene calor a partir de la combustión de biomasa sólida; y la disminución del impacto por la reducción de gases de efecto invernadero (cuando lo que se gasifica es biomasa y no carbón u otro combustible de origen fósil). (Gomelsky, 2013)

Además al tener en cuenta que en el proceso de gasificación, el gasificador tipo downdraft en su etapa de pirólisis, que es un proceso de descomposición térmica que ocurre entre 300 y 500 °C, se ve la necesidad de aprovechar la energía desperdiciada en forma de calor para reutilizarla y adaptarla a un sistema para generar vapor, y evaluar así el impacto de la reutilización de la temperatura del gasificador para generar nuevos modelos replicables y también poder evaluar la sostenibilidad del proyecto ejecutado.

Así mismo es impresionante la mejora tecnológica que se ha desarrollado en el campo de la cogeneración, que aún no ha terminado, y si bien parecería imposible investigar nuevas mejoras. Existen nuevos equipos que permiten realizar instalaciones donde antes no se podía o no era rentable hacerlo, es posible que se observen muchos progresos en el campo de la cogeneración.

Finalmente, como la meta del proyecto se plantea aprovechar la temperatura del gasificador y aumentar sus aplicaciones. Además, se pueden realizar proyectos sociales en donde se podrá llevar la máquina a zonas agrícolas en donde la disposición de hidrocarburos sea limitada, es decir zonas donde se dispone de biomasa en grandes cantidades.

#### 1.4 Antecedentes

El proyecto inicial del gasificador tipo downdraft del DECEM, funcionaba en dos etapas: la primera, que es el proceso termoquímico en un ambiente con presencia de oxígeno bajo control que transforma biomasa (madera) en gas combustible; y la segunda etapa, que consistía en usar el gas combustible como alternativa a la gasolina en un Jeep Willys 1974 (Haro & Yarad, 2013).



**Figura 1 Gasificador tipo downdraft**

Para el presente proyecto se utiliza la primera etapa del equipo como se muestra en la figura 1, es decir se hará uso de la generación de gas combustible, y la segunda etapa no se aplicará. El primer diseño, entonces, se enfocó en adecuar el equipo para la nueva aplicación, que consiste en aprovechar la energía térmica del gasificador para la generación de vapor y obtener así un equipo de cogeneración.

La cogeneración es un proceso industrial por el que se produce conjuntamente energía eléctrica y energía térmica, o gas y energía térmica, al obtener un elevado rendimiento energético de la instalación. Por lo tanto, es una técnica que tiene por finalidad permitir la satisfacción de las necesidades

energéticas a sus usuarios, con un coste de producción inferior al que se consigue de forma independiente. (Cogeneración, 2016).

#### **1.4.1 La cogeneración en el Ecuador**

Existen algunas industrias ecuatorianas dentro del campo de la agricultura que producen energía eléctrica y vapor en un esquema de cogeneración, que responden a la necesidad nacional de diversificar la matriz energética con energía renovable, y venden los excedentes a la red interconectada. Dichas industrias están vinculadas a la producción azucarera, todas ellas realizan cogeneración con bagazo de caña. Las más importantes son: Ecoelectric produce 36,5 MW, utiliza bagazo y otros residuos agrícolas; San Carlos produce 35 MW y Ecudos produce 29,8 MW. (Gomelsky, 2013).

Según datos del Balance Energético Nacional realizados por el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos en el 2015, Ecuador desde el 2014 cuenta con una capacidad instalada de generación eléctrica de 5299 MW de potencia, que se distribuyen en; 51% térmica; 47% hidráulica y 2% de otras fuentes renovables correspondiente a eólica, solar y biomasa. Las centrales hidráulicas contribuyeron con la producción de 2.241 MW y las térmicas de 3011 MW, de los cuales 136 MW corresponden a generación con bagazo de caña. (Delgado, 2015)

Si bien la tecnología de cogeneración ya está en uso en el sector industrial con instalaciones que brindan elevadas potencias. Por un lado, el nivel de desarrollo en el sector residencial y terciario es aún desconocido, donde ambos sectores podrían hacer uso de cogeneración en los sistemas de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria. Al tener en cuenta que ambos sectores suponen cerca del 17% del consumo de la energía final en el Ecuador (Delgado, 2015). Por otro lado, no se puede negar que la

incorporación de sistemas de cogeneración involucraría importantes ahorros de consumo de energía para el país y económicos para los usuarios.

Además, no solo las grandes instalaciones térmicas centralizadas son susceptibles de utilizar la cogeneración para mejorar la eficiencia de la instalación, sino que también, en pequeñas instalaciones residenciales, comerciales y todo equipo que trabaje con combustión de biomasa y produzca algún tipo de energía, ya sea térmica o eléctrica, se puede hacer uso de lo que se denomina micro-cogeneración para lograr beneficios parecidos a los de aquellas grandes instalaciones. (Millán, 2010).

## **1.5 Conceptos termodinámicos**

Dentro del proyecto que se desarrolla existen varios procesos que se llevan a cabo, para que se produzca un correcto funcionamiento del mismo, los cuales deben ser estudiados y aplicados a lo largo del proyecto. Los procesos más importantes de los que se deriva todo el trabajo son: gasificación, cogeneración y control eléctrico, los cuales están relacionados y también tienen que ver con la transferencia de calor, y desde allí parte el diseño del proyecto.

Antes de detallar el diseño se definirá algunos conceptos importantes que se aplican al proyecto.

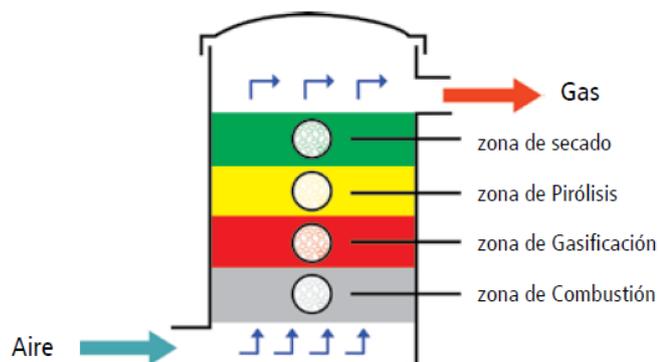
### **1.5.1 Gasificación**

La gasificación es un proceso termoquímico que ha sido desarrollado hace más de cien años, sirve para producir “Sinter gas” o “gas pobre”, mediante la combustión de residuos sólidos también llamados biomasa, tales como: madera, residuos agrícolas, y todo tipo de materia orgánica seca. El “gas

pobre” producido sirve para encender motores de combustión interna, turbinas de gas, y todo tipo de equipos que utilizan gas para funcionar. (ESTRADA, 2004). Los dos tipos de gasificadores más importantes son:

### 1.5.2 Gasificador Updraft

En el gasificador updraft la biomasa se ingresa por una tolva en la parte superior, el aire entra por la parte baja del gasificador y este circula en contracorriente con la biomasa. El gas pobre producido sale por la parte superior. La ventaja es que este tipo de gasificador admite materiales con mayor humedad debido a que el gas pobre producido seca en su trayecto hacia arriba, como desventaja el contenido en alquitranes que se produce es muy elevado. (ESTRADA, 2004)



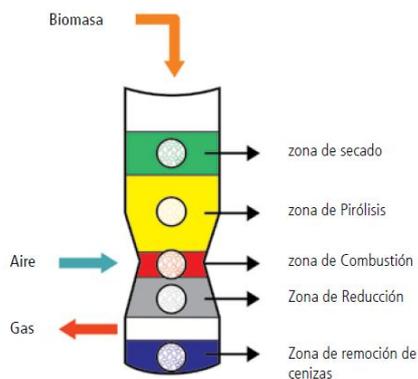
**Figura 2 Gasificador Updraft.**

(Rearte, 2016)

### 1.5.3 Gasificador Downdraft

En el gasificador downdraft la biomasa se ingresa por una tolva en la parte superior, el aire entra por la parte media del gasificador y este circula en forma descendente. El gas pobre producido sale por la parte inferior del gasificador.

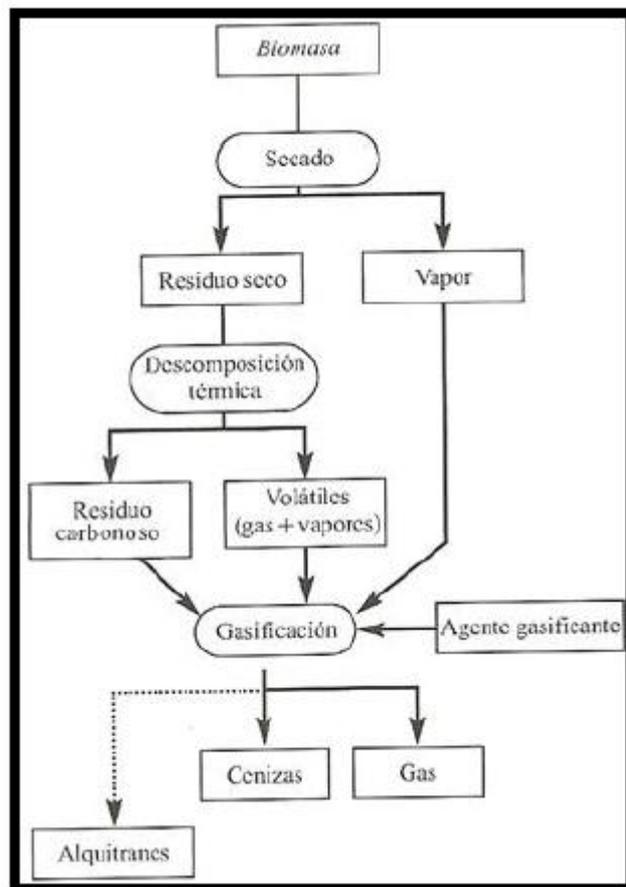
La ventaja en este tipo de gasificador es que el gas producido tiene un contenido en alquitranes muy bajo, como desventaja el gas producido tiene menor contenido energético. (ESTRADA, 2004).



**Figura 3 Gasificador Downdraft.**  
**(Rearte, 2016)**

#### 1.5.4 Proceso de Gasificación en el Reactor

Al diseñar los nuevos componentes que permiten el funcionamiento del gasificador, se deben comprender los procesos que se generan en el equipo, como indica en la figura 4,



**Figura 4 Esquema de proceso de gasificación**

(Nogues, García Galindo , & Rezeau, 2010)

En la gasificación se produce el proceso termoquímico de conversión de la biomasa sólida en un gas combustible compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno. La biomasa que ingresa al gasificador se somete a un proceso de secado, luego ingresa a la zona de descomposición térmica o zona de Pirólisis. En la siguiente etapa, se ingresa en un proceso de Combustión y posteriormente a la zona de Reducción (Garay, Guevara, & Sorto, 2008). Los procesos en el gasificador se desarrollan en varias etapas como sigue:

- **Secado**

En esta primera etapa, la biomasa que es ingresada por una tolva queda acumulada y antes de ser completamente combustionada, es primero calentada y secada ya que existe agua contenida en la biomasa en forma de humedad cerca del 7% y 20%, y es removida en forma de evaporación a una temperatura superior a los 100 °C. (ESTRADA, 2004).

- **Pirólisis**

En esta etapa es en dónde la biomasa sufre una descomposición térmica a una temperatura de 300 a 500 °C en ausencia de oxígeno. En esta etapa se desprenden gases combustibles muy volátiles. Los gases que no se queman por la ausencia de oxígeno se convierten en alquitranes, algunos de los gases producidos, entre los más importantes son: vapor de agua, Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Di hidrógeno (H<sub>2</sub>), y Monóxido de Carbono (CO). (ESTRADA, 2004).

- **Combustión u oxidación**

En este proceso, se incorpora un agente oxidante que generalmente, y para la aplicación es el aire. El agente oxidante sirve para generar la energía suficiente para las etapas de pirólisis y de reducción. Además, en la combustión, la oxidación parcial de los productos genera el monóxido de carbono, el cual es un gas deseado en la producción de combustibles sintéticos (Ruiz, Juárez , Morales, Muñoz, & Mendívil, 2013).

- **Reducción o gasificación**

En la etapa de reducción se produce una conversión de la biomasa en un gas combustible, las reacciones se producen de forma paralela con la etapa

de combustión, son numerosas las reacciones químicas a alta temperatura que se producen. De todas estas reacciones, las reacciones de gasificación del residuo carbonoso que se producen en la pirolisis son las más importantes debido a que son muy reactivas. (ESTRADA, 2004).

### 1.5.5 Reacciones en la gasificación

Las reacciones químicas que suceden en esta etapa de la gasificación están detalladas en la figura 5,

| Proceso                        | Reacción                             |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| Combustión                     | $C + O_2 \rightarrow CO_2$           |
|                                | $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ |
| Gasificación                   | $C + O_2 \rightarrow CO_2$           |
|                                | $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$          |
|                                | $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$      |
| Shift (formación de hidrógeno) | $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$   |
| Metanización                   | $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$  |

**Figura 5 Reacciones presentes en la gasificación**

(Ruiz, Juárez , Morales, Muñoz, & Mendivil, 2013)

### 1.5.6 Transferencia de calor

En termodinámica se realiza el estudio de las transiciones cuantitativas y reacomodos de la forma de energía de calor en los distintos cuerpos. La transferencia de calor está ligada a la razón de intercambio de calor entre los cuerpos denominados calientes y fríos o también conocidos como fuente y receptor. El cuerpo caliente es aquel que emite el calor al cuerpo frío (Kern, 1998).

### 1.5.7 Mecanismos de Transferencia de Calor

Existen tres formas en las cuales el calor puede transferirse de la fuente al receptor, que son: conducción, convección y radiación, que generalmente en aplicaciones de ingeniería son combinaciones de dos o tres de ellas. (Kern, 1998).

### 1.5.8 Conducción

Esta forma de transferencia se da principalmente en los cuerpos sólidos y el flujo de calor es desde los puntos de mayor temperatura hacia los de menor temperatura sin desplazamiento apreciable de la materia. (Kern, 1998).

El calor se transmite a través de un material fijo tal como la pared estacionaria, como se muestra en la figura 6. Además, la dirección en la que el flujo de calor viaja a través de la pared se da en ángulos rectos si las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo. (Kern, 1998).

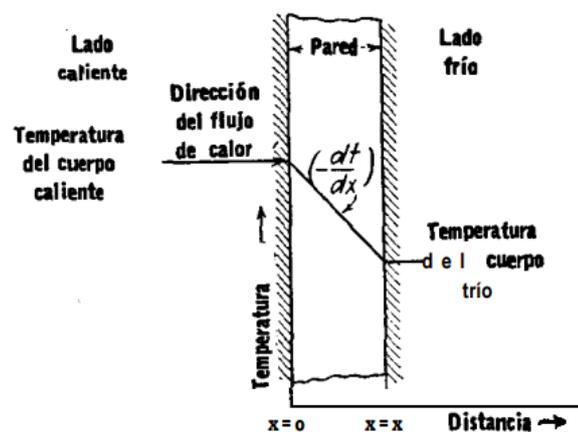


Figura 6 Flujo de calor a través de una pared

Figura (Kern, 1998)

En la figura 6 se analiza el caso de tener una fuente de calor en la parte izquierda de la pared y en la parte derecha existe el receptor. En el texto (Kern, 1998) se conoce y se demuestra por derivación, que el flujo de calor es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y el área de la pared  $A$ . Si  $T$  es la temperatura en cualquier punto de la pared y  $x$  es el espesor de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor  $dQ$  es dada por:

$$dQ = -kA \left( \frac{dt}{dx} \right) \quad [W] \text{ ó } [Btu/hora] \quad (1.1)$$

El término  $-dt/dx$  toma el nombre de gradiente de temperatura y posee un signo negativo, al suponer una temperatura mayor en la cara de la pared en donde  $x=0$  y una temperatura menor en la cara donde  $x=X$ , cómo se indica en la figura 6. Por añadidura la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura  $dt$  que impulsa el calor a través de la pared de espesor  $dx$ . La constante de proporcionalidad  $k$  es particular de la conducción de calor por conductividad, se la conoce como conductividad térmica y depende del material de la pared estacionaria (Kern, 1998).

### 1.5.9 Convección

Para comprender este fenómeno se debe entender que la transferencia de calor sucede entre una superficie sólida y el líquido o un gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido. A mayor movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. Por un lado, si en el sistema no existe movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. Por otro lado, este criterio se aplica en el sistema de gasificación, por lo cual se analizó únicamente los

modos de transmisión de calor de conducción y radiación en el diseño de la camisa térmica (Cengel Yunus, 2007).

Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación, denominada Ley de enfriamiento de Newton, que está dada por:

$$dQ = hAdt \quad [W] \text{ ó } [Btu/hora] \quad (1.2)$$

Donde el término **h** es la constante de proporcionalidad que está dada por la naturaleza del fluido y la forma de agitación, que se evalúa experimentalmente. A (1.2), se le conoce como la ley de enfriamiento de Newton (Kern, 1998).

#### 1.5.10 Radiación

Es la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor, en donde parte de la energía se absorbe por el receptor y parte es reflejada por el mismo. En base a la segunda ley de la termodinámica, Boltzmann establece la velocidad de una fuente de calor como:

$$dQ = \sigma \epsilon dA T^4 \quad [W] \text{ ó } [Btu/hora] \quad (1.3)$$

A (1.3) se le conoce como la ley de la cuarta potencia, en donde **T** es la temperatura absoluta, **σ** es la constante de Stefan-Boltzmann, **ε** es la emisividad que es un factor peculiar a la radiación. La emisividad, igual que la conducción térmica **k** o el coeficiente de calor **h**, se determina experimentalmente (Kern, 1998).

### **1.5.11 Intercambiador de Calor**

Los intercambiadores de calor son equipos de transferencia de energía térmica, empleados en aplicaciones de ingeniería. Si se desea calentar un fluido, se emplean calentadores que usan fluidos calientes o fuentes de calor. Los enfriadores cumplen funciones opuestas a la anterior, empleándose agua y aire como medios principales de refrigeración (Mahuli González, 2015).

Los tipos de equipos de transferencia de calor según el tipo de servicio son: enfriador, calentador, refrigerador, condensador, evaporador, vaporizador, rehervidor, generadores de vapor y sobrecalentador. (Mahuli González, 2015)

Para la aplicación del proyecto de optimización del gasificador tipo downdraft, el enfoque del intercambiador es en los generadores de vapor, ya que se desea subir la temperatura del agua mediante la transferencia de calor del reactor y producir vapor saturado a la salida del intercambiador de calor.

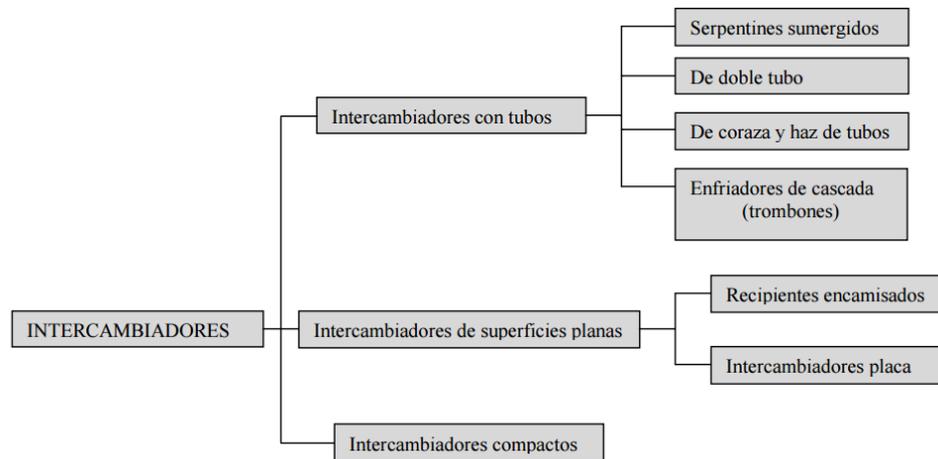
### **1.5.12 Generadores de vapor**

Son un tipo especial de vaporizadores usados para producir vapor de agua. Como fuente de calor se utiliza generalmente el calor en exceso que no se requiere para el proceso (Mahuli González, 2015).

### **1.5.13 Clasificación de los Intercambiadores de Calor**

En la industria, estos equipos son muy utilizados y la forma de clasificarlos es muy diversa; pero para la aplicación de gasificación se puede considerar de acuerdo al tipo de superficie. Dado que el intercambiador está en contacto directo con el reactor y se desea aprovechar la mayor transferencia de calor,

al cubrir la mayor superficie de contacto. Se plantea la siguiente clasificación al cubrir.



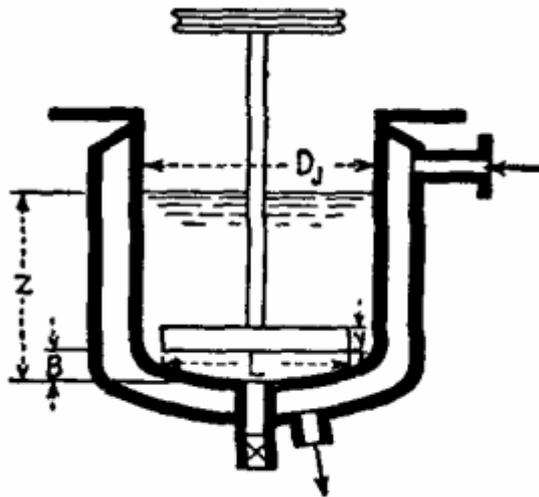
**Figura 7 Clasificación de los Intercambiadores de Calor**

(Radiadores Gallardo, 2016)

En la figura 7, se indican los tipos de intercambiadores que se pueden implementar en la generación de vapor.

#### 1.5.14 Recipientes encamisados

El encamisado realiza el recubrimiento de la superficie donde se transfiere el calor producido desde el interior del gasificador, con el propósito de cubrir una mayor área que un serpentín u otro intercambiador de tubos. La desventaja de este equipo es que es bastante difícil de limpiar mecánicamente, porque el acceso al interior de la camisa es muy complejo. (Thermoequipos C.A., 2014)



**Figura 8 Recipiente Enchaquetado**

(Thermoequipos C.A., 2014)

### 1.5.15 Cogenerar

Cogenerar es transformar un tipo de energía en dos tipos de energía como mínimo (Martín, 2003), como en el proyecto en desarrollo, el gasificador además de producir gas a partir de la combustión de biomasa, también va a producir vapor luego de la implementación de un intercambiador de calor enchaquetado.

### 1.5.16 Disposición tecnológica de cogeneración.

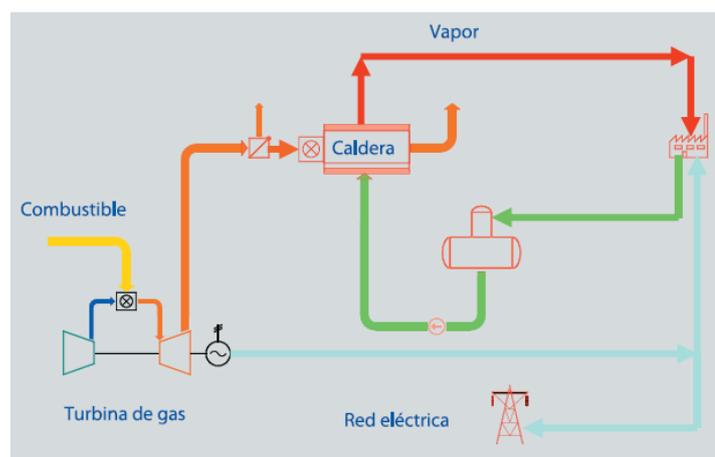
La gran mejora que se ha producido en la cogeneración tanto en los equipos principales, como en las instalaciones auxiliares, permiten mejorar las prestaciones y aumentar la disponibilidad de la tecnología en las últimas décadas. Las mejoras más significativas han ocurrido tanto en rendimiento como en emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto indica que el desarrollo de cogeneración es

un ejemplo de compatibilidad entre aumento de la rentabilidad y de la protección medioambiental. (Millán, 2010)

Cabe destacar que se tienen varias tecnologías de transformación de energía en el Ecuador con respecto a la generación térmica como: sistemas turbogas (ciclo termodinámico de gas), motor de combustión interna (ciclo termodinámico Otto y Diésel) y turbovapor (ciclo termodinámico de vapor) la base de la oferta de electricidad generada por estas plantas que alimentan al país es predominantemente con una generación térmica del 49,1%. (Delgado, 2015). Algunos tipos de plantas de cogeneración existentes son:

### 1.5.17 Cogeneración con turbina de gas en ciclo simple

Se conoce como ciclo simple, en este tipo de cogeneración, cuando se dispone de una única turbina de gas, donde el aprovechamiento térmico para generar vapor se da en una caldera de recuperación del calor generado por los gases de escape provenientes de la combustión. La recuperación de calor no es directa por lo que puede tener una cámara adicional de combustión de post combustión para generar un vapor de mayor calidad. (Martín, 2003)



**Figura 9 Planta de cogeneración con turbina de gas**

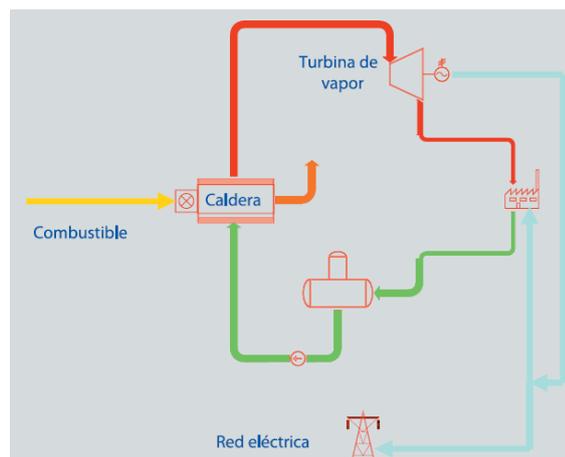
(Millán, 2010)

### 1.5.18 Cogeneración con turbina de vapor

Este tipo de sistemas fue el primero que se usó en cogeneración, la energía mecánica se produce por la expansión del vapor de alta presión procedente de una caldera. El vapor se usa, en un principio, para producir energía eléctrica y el excedente de vapor se utiliza en otras aplicaciones térmicas. (Martín, 2003)

La presión de salida del vapor de la turbina no siempre es la misma, por lo que las turbinas se clasifican en: turbinas a contrapresión, en donde esta presión está por encima de la atmosférica; y las turbinas a condensación, en las que la presión está por debajo de la atmosférica. (Millán, 2010)

En estos días, la aplicación de estos sistemas ha sido reducida como complemento para ciclos combinados o para aquellas instalaciones donde se utilizan combustibles residuales, como biomasa y residuos agrícolas. La aplicación característica de cogeneración es con turbina de vapor a contrapresión, donde, se utiliza el vapor excedente que escapa de la turbina. (Millán, 2010)



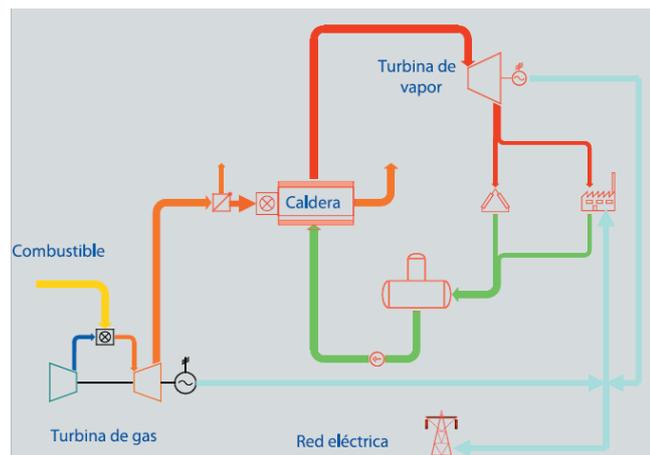
**Figura 10 Planta de cogeneración con turbina de vapor**

(Millán, 2010)

### 1.5.19 Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas

La aplicación en donde se combina una turbina de gas y una turbina de vapor es lo que se conoce como ciclo combinado. En el ciclo combinado se combinan dos ciclos: el ciclo de gas de la turbina de gas (ciclo Bryton) y el ciclo agua-vapor de la turbina de vapor (ciclo Rankine). (Millán, 2010).

Al utilizar los gases de escape de la turbina de gas que sirven de suministro de combustible de un generador de vapor, se produce vapor a alta presión en la cámara de recuperación del mismo. Este vapor se expande en una turbina de vapor el cual produce energía eléctrica. (Martín, 2003)



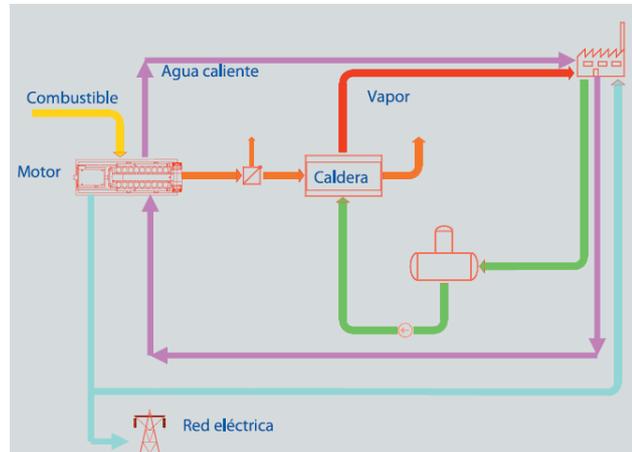
**Figura 11 Planta de cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas**

(Millán, 2010).

### 1.5.20 Cogeneración con motor alternativo de gas o fuel en ciclo simple

En el ciclo simple se usa un motor alternativo que utiliza gas, gasóleo o fuel-oil como combustible de manera similar a las anteriores aplicaciones. Los gases de escape del motor ayudan a la cogeneración que se da en una

caldera de recuperación para la producción de vapor a baja presión (hasta 10 bares). (Millán, 2010)



**Figura 12 Planta de cogeneración con motor alternativo**  
(Millán, 2010)

## 1.6 Conceptos Electrónicos

El proyecto que se desarrolla, tiene una parte mecánica y otra electrónica, la cual ayuda a tener una mejor comprensión del comportamiento del sistema y para que se produzca un correcto funcionamiento del mismo. La medición y control de parámetros, se llevan a cabo gracias a dispositivos electrónicos, tales como: sensores, actuadores, tarjetas electrónicas, los cuales deben ser estudiados y aplicados a lo largo del proyecto. Antes de detallar el diseño se definirán algunos conceptos importantes que se aplican al proyecto.

### 1.6.1 Sensores

Los sensores son objetos que detectan magnitudes físicas o químicas, denominadas variables de instrumentación, para después transformarlas en variables eléctricas. (Sotillo, 2013). Son como una ampliación de los sentidos

para adquirir mayor información de magnitudes físicas que por sus características no pueden ser detectadas fácilmente por los sentidos. Ayudan principalmente a la vigilancia o seguimiento de procesos. (Pallas, 2005)

### **1.6.2 Sensor de temperatura**

Es un dispositivo que transforma las variaciones de temperatura en cambios de señales eléctricas que son procesadas por un equipo eléctrico, existen algunos tipos de sensores de temperatura: los termómetros, termistores, los RTD y los termopares. (Sotillo, 2013).

### **1.6.3 Termómetros de dilatación**

El principio de funcionamiento de este tipo de termómetros, se basa en medir la diferencia entre el coeficiente de dilatación de los materiales empleados, ya sea un líquido o un metal. Los tipos de termómetros de dilatación son: los de vidrio, de bulbo y los bimetálicos. Estos sensores son puramente mecánicos (Bordóns , 2016).

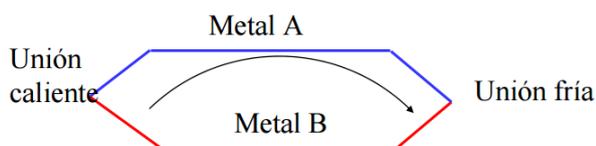
### **1.6.4 Termómetros sensibles a la resistencia**

Estos sensores basan su funcionamiento en medir la variación de resistencia al cambio de temperatura, en algunos casos son lineales. Estos sensores son: los de resistencia metálica (RTD), que manejan un rango que va de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $500^{\circ}\text{C}$  como el PT100 y el PT1000; los termistores también son sensibles a la resistencia como el termistor de coeficiente negativo (NTC) y el termistor de coeficiente positivo (RTC). Estos sensores no son lineales y son de bajo costo, pequeños y de menor precisión. Este tipo de sensores son

eléctricos, pero necesitan una etapa de acondicionamiento de señal debido a los valores muy pequeños de variación de resistencia (Bordóns , 2016).

### 1.6.5 Termopares

Son sensores activos que usan el efecto Seebeck, por el cual existe una circulación de corriente cuando hilos de metales distintos se unen y calienta uno de los extremos. Se mide la tensión que es proporcional a la variación de temperatura. Este tipo de sensor también requiere un acondicionamiento de la señal. Soportan altas temperaturas, óptimos para calderas y además son bastante lineales. (Bordóns , 2016)



**Figura 13 Funcionamiento de una termocupla**

(Bordóns , 2016)

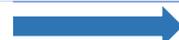
### 1.6.6 Tipos de termopares

**Tabla 1**

#### Tipos de termocuplas

|   |  |
|---|--|
| <b>Termopar J: Hierro y Constanan<br/>(Cu-Ni)</b>   | <b>Afectado por corrosión<br/>Rango: 0°C a 750°C<br/>Precisión: 0.5%</b> |
| <b>Termopar K: Cromo y Alumel<br/>(Al-Ni)</b>       | Buena resistencia a la oxidación<br>Rango: 0°C a 1300°C<br>Precisión: 1% |
| <b>Termopar R: Platino y Platino-<br/>13% Rodio</b> | Rango de medida más amplio (0°C a 1600°C), pero más costosos             |

**Continua**



|   |  |
|---|--|
| <b>Termopar S: Platino y Platino-10% Rodio</b>              | Precisión: 0.5%  |
| <b>Termopar W: Wolframio-5% Renio y Wolframio-26% Renio</b> | Rango: 0°C a 2800°C en atm.<br>Inertes o vacío.<br>Precisión: 1% |

Fuente: (Bordóns , 2016)

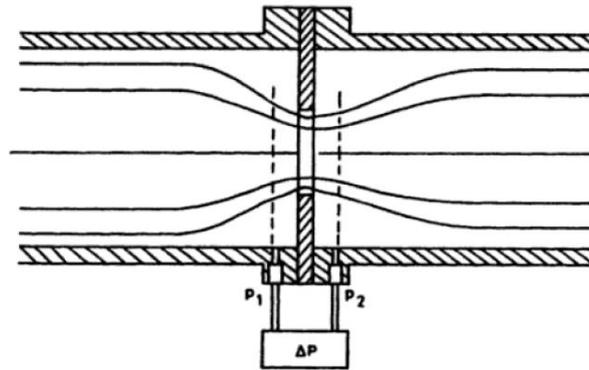
### 1.6.7 Método sin contacto

Este método sin contacto tiene como representantes principales a los: pirómetros de radiación, pirómetros ópticos, pirómetros de radiación total y pirómetros de dos colores. Los pirómetros consisten en un sistema óptico que recoge la energía radiada y la concentra en un detector, el cual genera una señal proporcional a la temperatura. (Bordóns , 2016).

### 1.6.8 Sensor de caudal o caudalímetros

La mayoría de los sensores de caudal se basan en métodos de medida indirectos y, en particular, en la detección de diferencias de presión provocadas por la inserción de un elemento en el conducto donde se desea medir. (Pallas, 2005)

Los caudalímetros de obstrucción, son los que usan con más frecuencia, en la obstrucción se produce una caída de presión que depende del flujo, en donde la medida del caudal será una medida de presión diferencial. (Pallas, 2005)



**Figura 14 Placa de obstrucción para la medida de caudal empleando un sensor de presión diferencial**

**(Pallas, 2005)**

### **1.6.9 Actuador**

Son dispositivos inherentemente mecánicos, que cumplen la función de proporcionar fuerza para mover o actuar otro dispositivo mecánico. La fuerza provocada por el actuador puede provenir de tres tipos de fuentes: presión neumática, presión hidráulica y fuerza motriz (motor eléctrico o solenoide). En dependencia del origen de la fuerza, el actuador se denomina: neumático, hidráulico o eléctrico (Vildósola , 2016).

### **1.6.10 Microcontrolador**

Un microcontrolador es un circuito integrado digital que contiene todos los elementos de un procesador digital secuencial síncrono programable; se caracteriza porque su sistema físico se adapta a las características del sistema al que se conecta cuando se le aplican las señales eléctricas adecuadas. (Mandado, 2007).

### **1.6.11 Sistema de control**

Sistema de control es un conjunto de varios dispositivos (sensores, actuadores, microcontroladores) encargados de dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de disminuir los fallos y obtener los resultados deseados. (Ñeco, 2003).

## CAPÍTULO 2

### PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

En el proyecto que se desarrolla la parte mecánica es la primera que se diseña debido a que se deben obtener variables físicas que se puedan cuantificar y monitorear mediante dispositivos electrónicos, para ello el intercambiador de calor en el gasificador es el sistema requerido para empezar con el proyecto.

#### 2.1 Reactor de gasificación

En la figura 15, se muestra el reactor del gasificador, elemento fundamental del proceso ya que en este se dan las etapas de secado, pirolisis, combustión y reducción. Al realizar pruebas, el reactor necesitó de un mantenimiento para ser funcional.



**Figura 15 Reactor del Gasificador**

Una vez operativo el gasificador se procedió a encender el reactor para verificar todas las etapas que en él se realizan, y después se colocó un sensor de temperatura, termocupla tipo K para medir la temperatura en las zonas de secado, pirólisis, combustión y reducción. En la tabla 1, se aprecia que en las zonas de combustión y reducción se da la mayor temperatura. Por lo tanto, en estas secciones será colocado el sistema de transferencia de calor para la generación de vapor de agua.

**Tabla 2**

**Temperaturas medidas en las zonas del reactor de gasificación**

| Proceso de gasificación | Temperatura medida [°C] |
|-------------------------|-------------------------|
| <b>Secado</b>           | 80                      |
| <b>Pirólisis</b>        | 200                     |
| <b>Combustión</b>       | 600                     |
| <b>Reducción</b>        | 500                     |

## 2.2 Ciclón de Gasificación

Al obtener el gas de síntesis en el reactor, este se dirigió al ciclón de la figura 16. La función del ciclón es de separar las partículas más grandes que viajan conjuntamente con el gas. Aquí, el condensado y las partículas se depositan en la parte inferior del ciclón. Este proceso se realiza con el fin de eliminar la mayor cantidad de partículas antes del secado para evitar la obstrucción en el filtro, que se indica en la figura 17.



**Figura 16 Ciclón del Gasificador**

### **2.3 Filtro de gas**

El gas después de pasar por el ciclón va a un filtro como se muestra en la figura 17, anteriormente el equipo no contaba con este filtro, por lo que para la nueva aplicación se instaló esta etapa de filtrado, lo que permite eliminar la conexión al Jeep Willys 1974. El filtrado es muy importante, ya que aquí se eliminan gran parte de los alquitranes producidos en la zona de pirólisis que no se disolvieron en la combustión. En la parte superior del filtro se extrae el gas combustible que es de mayor calidad, debido a las etapas del ciclón y filtrado.



**Figura 17 Filtro del Gasificador**

## 2.4 Sistema de transmisión de gas

Este sistema se implementó con la finalidad de extraer el gas pobre y de permitir el ingreso de aire a presión, para que actué como agente oxidante y aumentar la energía en las etapas del reactor. Las partes con la que consta el sistema se indica en la figura 18.

Para el ingreso de aire y la extracción del gas se implementó un eyector Venturi que ayuda a la transmisión, velocidad de los gases y mezcla el aire con el gas de síntesis. (Ruiz, Juárez , Morales, Muñoz, & Mendívil, 2013). El eyector funciona, al proporcionar aire comprimido a 100 PSI mediante la boquilla del eyector. La relación de aire comprimido y de gas para la bengala es de sólo 25%. Una válvula manual mezcla previamente el gas justo antes del eyector Venturi, que permite la entrada del aire necesario para la relación aire/combustible que el quemador requiere. Mientras que el eyector Venturi puede funcionar en una amplia gama de caudales, sin partes móviles, este sistema de accionamiento tiene una demanda de potencia más alta para un flujo dado y puede no ser apropiado para aplicaciones fuera de la red para el sistema de liberación para esta aplicación (Castro, 2015).



**Figura 18 Sistema de transmisión de gas**

## 2.5 Quemador

La llama se podrá observar al obtener gas que salga por el tubo del quemador de la figura 19. Al observar el gas que sale del filtro será necesario colocar la flama de un soplete de gas butano a través del orificio pequeño ubicado en la parte superior, para así generar el fuego en la antorcha y cumplir con el objetivo de la aplicación (Castro, 2015).



**Figura 19 Quemador**

El equipo fue modificado en referencia al original, como se muestra en la figura 1, adecuándolo con un sistema de filtrado, transmisión de gas y un recipiente de dónde sale agua a presión, como si indica en la figura 20,



**Figura 20 Gasificador con un nuevo sistema de filtrado y transmisión de gas**

## **2.6 Diseño Térmico**

En función de los datos que se obtuvieron en la experimentación y que se resumen en la tabla 2, la mayor temperatura ocurre en las zonas de combustión y reducción, por ende, en estas etapas sucede la mayor transferencia de calor del gasificador. Con el fin de aprovechar la energía térmica que se produce en el reactor, se diseñó y construyó una camisa térmica que absorbe la máxima cantidad de calor producido. Por este sistema térmico se ingresará agua que, al entrar a la camisa, su temperatura se eleva, cambiando de fase a vapor saturado, para su posterior empleo.

### **2.6.1 Diseño del encamisado térmico**

En el sistema de gasificación se tomaron datos con un sensor de temperatura, termocupla tipo K, donde las zonas que alcanzaron mayor

temperatura fueron las de combustión y reducción como se muestra en la tabla 2. Los datos experimentales mostraron temperaturas entre 500 y 600°C. En el encamisado del reactor se produce la mayor transferencia de calor.

Para la aplicación de este proyecto termodinámico se tiene presente los procesos de transferencia de calor por conducción de calor y radiación.

Además, la transferencia de energía de calor por conducción, está presente ya que en la zona de combustión se encuentra la fuente de calor, el espesor del reactor es la pared estacionaria, y la zona exterior al cilindro del reactor, es donde se construyó el recipiente enchaquetado.

Por un lado, el proceso de convección es mínimo, ya que el movimiento de flujo del gas al interior del reactor es lento, por lo que no se tomó en cuenta en el diseño.

Por otro lado, la zona de oxidación transfiere calor a las paredes del reactor, y este se da por radiación de la combustión.

### 2.6.2 Análisis matemático de la transferencia de calor

Para el diseño del encamisado térmico, se parte de la ecuación de transferencia de calor por conducción:

$$\frac{Q}{t} = -kA \frac{T_c - T_f}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Donde:

$\frac{Q}{t}$ : Calor por conducción transferido en el tiempo [watts], es la fuente de calor que genera la zona de combustión en el reactor.

**K**: Coeficiente de conducción térmica [watts/m°C] , el reactor está construido de hierro.

**A:** Área transversal [ $m^2$ ], es el área de contacto de la camisa térmica con la zona de combustión del gasificador.

**T<sub>c</sub>:** Temperatura caliente [ $^{\circ}C$ ], es la temperatura en la parte interna del reactor, este valor se midió con la termocupla tipo K, el valor fué 500  $^{\circ}C$ .

**T<sub>f</sub>:** Temperatura fría [ $^{\circ}C$ ], es la temperatura en la parte externa del reactor, el valor fué 200  $^{\circ}C$ .

**$\epsilon$ :** Espesor [m] de la plancha de hierro del reactor.

**Además, se realiza el cálculo del calor por conducción (camisa interna); mediante:**

$$K_{Fe} = 51 \text{ [W/m}^{\circ}\text{K]}$$

$$A = 6.5 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$T_c = 500 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$T_f = 200 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$\epsilon = 0.0025 \text{ [m]}$$

Con lo que se obtiene:

$$\frac{Q}{t} = -51 \left[ \frac{W}{m^{\circ}K} \right] \times 6.5 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]} \times \frac{500 - 200 \text{ [}^{\circ}\text{C}]}{0.0025 \text{ [m]}}$$

$$\frac{Q}{t} = -39780 \text{ [W]}$$

El valor de la fuente de calor  $Q/t$  de 39780 [W], es el flujo térmico que se genera en la zona de combustión del gasificador, en la camisa térmica. En la ecuación de calor (2.2), se determina la tasa de flujo que se necesita para garantizar la generación de vapor de una limitada cantidad de masa de agua.

$$\frac{Q}{t} = m \times c_e \times \Delta T \quad (2.2)$$

donde:

$\frac{Q}{t}$  : Cantidad de calor requerida para evaporar la masa de agua.

$c_e H_2O = 1 [ cal/g ^\circ C ] = 4.18 [ J/g ^\circ C ]$  : Calor específico del agua.

$$\Delta T = T_{eq} - T_{inicial}$$

$T_{eq}$  : Temperatura de equilibrio térmico, es el valor que alcanzará el agua después de pasar por la camisa térmica (Temperatura de salida de vapor).

$T_{inicial}$  : Temperatura del agua con la que ingresa al encamisado térmico (Temperatura ambiente).

$m$ : masa de agua

Para determinar la masa de agua que ingresa en la camisa térmica, se calcula el volumen del encamisado, luego al multiplicar por la densidad se obtiene la masa, de la ecuación.

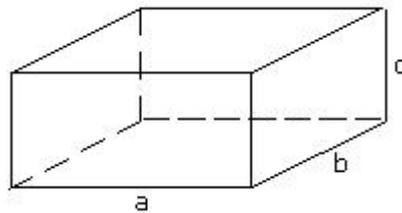
$$\rho = m V \quad (2.3)$$

Debido a que el reactor del gasificador ya estaba diseñado, sus parámetros de construcción eran valores definidos, además por problemas de construcción e implementación; como sueldas y montaje de la camisa térmica, únicamente se construyó en un tercio del diámetro del gasificador interno como se muestra en la figura 21.



**Figura 21 Camisa Térmica del Gasificador**

Al aproximar la forma de la camisa a un paralelepípedo como la figura.



**Figura 22 Medidas de la camisa térmica**

donde:

$$a = 0.13m$$

$$b = 0.01m$$

$$c = 0.08m$$

$$V_{camisa} = a \times b \times c$$

$$V = 0.13 \times 0.01 \times 0.08 = 1.04 \times 10^{-4} [m^3]$$

De la ecuación (2.3) se reemplaza el volumen de la camisa y la densidad del agua que es  $1000 [kg/m^3]$  :

$$m = \rho \times V$$

$$m = 1000 [kg/m^3] \times 1.04 \times 10^{-4} [m^3] = 0.104kg$$

$$m_{AGUA} = 104 [g]$$

El valor de masa se reemplaza en la ecuación (2.2):

$$\frac{Q}{t} = m \times c_e \times \Delta T$$

$$\frac{Q}{t} = 104 [g] \times 4.18 [J/g \text{ } ^\circ C] \times (100 [^\circ C] - 25 [^\circ C])$$

$$\frac{Q}{t} = 32650 \left[ \frac{J}{s} \right]$$

$$\frac{Q}{t} = 32650 [W]$$

La cantidad de energía para producir vapor es 39780 W y la cantidad de energía necesaria para generar vapor es 32650 W, con lo cual se obtiene una eficiencia del 82%.

## 2.7 Diseño Eléctrico

En el diseño eléctrico se consideró los sensores a emplear, al analizar su tipo, sus características, ventajas y desventajas. Luego los actuadores que intervienen en el proceso de la generación de vapor. Y finalmente el microcontrolador que realizará el control del proceso.

### 2.7.1 Magnitudes físicas de interés

Para la aplicación del proyecto, las magnitudes físicas a medir son: la temperatura, ya que es un proceso termoquímico; el caudal de agua que se transformará a vapor; y la presión en algunos puntos de interés del proceso.

### 2.7.2 Selección del sensor de temperatura

En el proceso de gasificación, las etapas de combustión y reducción alcanzan temperaturas de hasta 1000°C, por lo que el sensor debe tener un rango igual o mayor a este. Otro criterio de selección es la precisión, el acondicionamiento eléctrico y el precio. Los termómetros de dilatación no tienen el rango deseado y son puramente mecánicos, los termómetros por resistencia manejan rangos cercanos de temperatura del proceso, pero no son lineales, sus protecciones son mínimas, no serían eficaces en el proceso del gasificador, los pirómetros funcionan por radiación y su costo es muy elevado.

Por lo que, los sensores óptimos para la aplicación del proyecto son los termopares o termocuplas, que son recomendados para procesos térmicos industriales por su linealidad y protecciones que manejan.

Finalmente, para el proyecto de generación de vapor, para aprovechar la energía de calor del gasificador, el sensor seleccionado fue una termocupla tipo K como se observa en la figura 22, y como indica la tabla 1, maneja rangos de hasta 1300 °C, lo que permite una operación fuera e riesgo en el gasificador.



**Figura 23 Termocupla Tipo K**

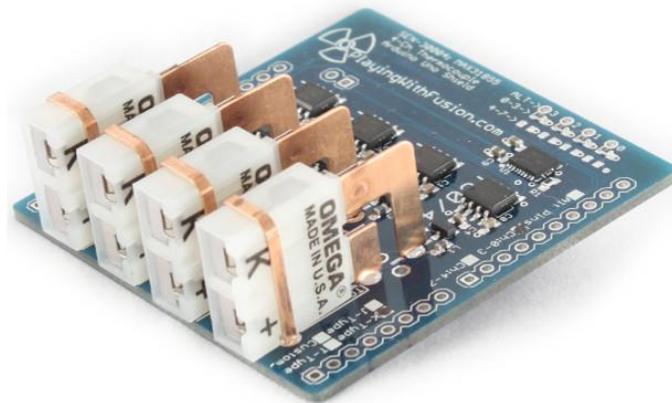
(Larssystem, 2016)

### 2.7.3 Acondicionamiento de la termocupla tipo K

Las termocuplas miden la variación de tensión entre diferentes metales, que es proporcional al cambio de temperatura. Pero estos voltajes son mínimos por lo que necesitan ser acondicionados para ser leídos por una tarjeta electrónica.

Para acondicionar la señal de la termocupla el circuito electrónico es un Puente de Wheatstone, que sirve para elevar las señales de bajo valor que entrega la termocupla. Actualmente existen módulos que acondicionan la señal de la termocupla, además, eliminan los ruidos de las señales y permiten la conexión con tarjetas electrónicas para la adquisición de datos.

En el presente proyecto se usó el módulo SEN-30004: MAX31855, que cumple con las características anteriormente mencionadas, además, de su fácil adquisición, cómodo precio y permite la fácil conexión con la plataforma Arduino.



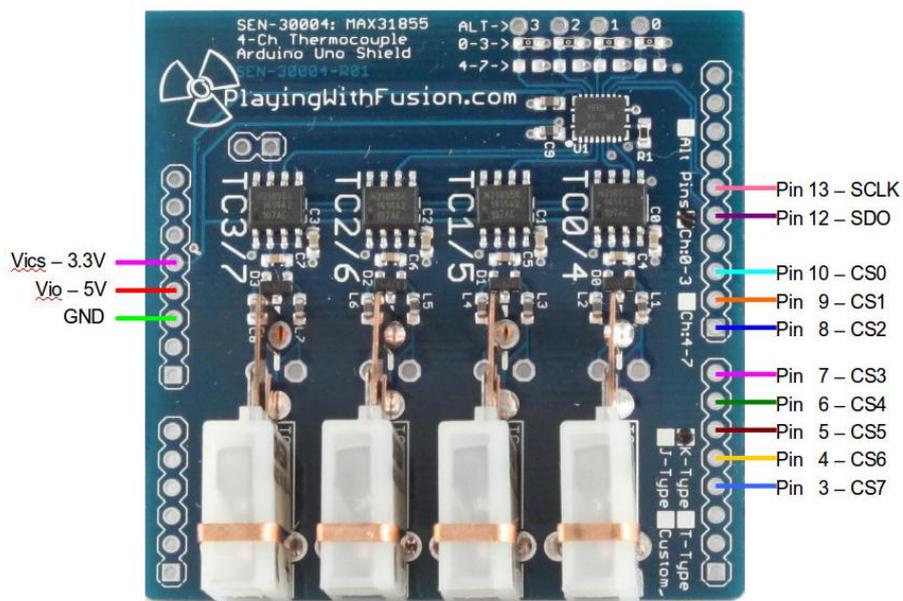
**Figura 24 Módulo SEN-30004: MAX31855**

(Playingwithfusion, 2016)

## 2.7.4 MAX31855 termopar tipo K

Es una placa de acondicionamiento de señal para termocuplas tipo K, posee cuatro canales digitales termopar MAX31855 Arduino Shield, cuya hoja técnica está en el Anexo A. Este integrado soporta un rango de temperatura de  $-270^{\circ}\text{C}$  a  $1372^{\circ}\text{C}$ , sus características térmicas son conocidas y tiene una resolución de  $0.25^{\circ}\text{C}$ , los conectores del termopar vienen incluidos. (Playingwithfusion, 2016).

La tarjeta SEN-30004 está interconectada a través de tres o cuatro hilos mediante una Interfaz Periférica Serial (SPI) y un cambiador de nivel de alta velocidad, que se incluye, para permitir la conexión con un Arduino Uno (Playingwithfusion, 2016).



**Figura 25 Módulo SEN-30004, conexión a Arduino.**

(Playingwithfusion, 2016)

**Características:**

- Conectores de termopar verticales de tamaño miniatura (figura 25).
- Posee cuatro canales de termopar, alcance extendido completo.
- Hasta ocho canales de termopar puede estar conectado a un Arduino.
- Interfaz SPI de 14 bits.
- Se conecta directamente a un Arduino Uno.
- Detecta corto circuitos.
- Detecta que el termopar está abierto.
- Otras versiones disponibles (K, J, T y abastecido).
- Orificios de montaje para tornillos de tamaño 4-40.
- Las conexiones están separadas por pines de 0,1”.
- Convertidor de 14 bits analógico-digital incorporado

El plano eléctrico del módulo de acondicionamiento MAX31855 se puede visualizar en el Anexo B.

**2.7.5 Selección del sensor de Caudal**

Para la selección de un caudalímetro que cumpla su función en el proyecto, se consideró los siguientes criterios:

- Rango de caudales para analizar (tabla 3).
- Precisión requerida (debe especificarse para todo el rango).
- Ambiente en que se realizará la medición.
- Costo del instrumento.
- Costo de la energía necesaria para operarlo
- Tipo de fluido a medir.
- Velocidad de respuesta.

Tabla 3

## Rangos de medición de Caudalímetros

| Caudalímetro     | Rango            |
|------------------|------------------|
| Ultrasónico      | 0.1 a 20 cc/s    |
| Másico           | 15 – 230 lt/s    |
| Electromagnético | 266 lt/h         |
| Ruedas ovaladas  | 30 lt/h          |
| Vortex           | 300 – 30000 lt/h |
| Turbina          | 1.2 – 760 L/min  |

Fuente: (Necochea, 2016)

Para la medición del caudal de flujo de agua que ingresa a la camisa térmica se eligió el sensor de flujo YF-S201, ya que cumple con los requerimientos del sistema, entra en el rango del caudal, soporta las condiciones del proceso, es de fácil adquisición, bajo costo y permite la conexión a una tarjeta electrónica para la adquisición de datos mediante comunicación serial.



**Figura 26 Sensor de flujo YF-S201**

(Hobbytronics, 2016)

Este sensor se acopla a cualquier tubería, tiene un sensor de molino para medir el volumen de líquido por unidad de tiempo, posee un sensor magnético de tipo Hall que manda un impulso eléctrico con cada revolución. El sensor de efecto Hall está sellado herméticamente para evitar que tenga contacto con el líquido. (Mecatronics Chips, 2016).

El sensor viene con tres cables: rojo (energía 5-24VDC), negro (tierra) y amarillo (salida de impulsos eléctricos de efecto Hall). Con los pulsos de la salida del sensor, se puede determinar el flujo de agua. Cada pulso es de aproximadamente 2.25 mililitros. Se debe tomar en cuenta que no es preciso el sensor, ya que la frecuencia del pulso varía dependiendo de la velocidad de flujo, presión del fluido y la orientación del sensor. (Mecatronics Chips, 2016).

La señal de pulso es una simple onda cuadrada, así que es bastante fácil de registrar y convertir en litros por minuto al emplear la fórmula de relación de la frecuencia y el caudal del sensor de flujo.

$$\frac{\text{Frecuencia de pulsos [Hz]}}{7} = \text{Caudal} \left[ \frac{L}{min} \right] \quad (2.4)$$

#### **Características del sensor de caudal:**

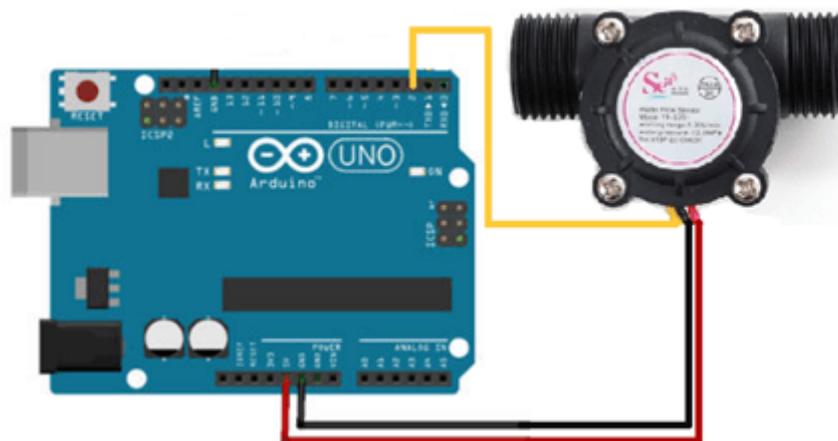
- Modelo: YF-S201
- Tipo de Sensor: Efecto Hall
- Voltaje Nominal: 5 to 18V DC (Voltaje Mínimo Requerido 4.5V)
- Máxima Corriente de operación: 15mA @ 5V
- Tensión de Salida: 5V TTL
- Velocidad de Flujo: 1 a 30 Litros/Minuto
- Rango de Temperatura: -25 a +80°C
- Rango de Humedad: 35%-80% RH
- Precisión: ±10%

- Máxima Presión de Agua: 2.0 MPa
- Salida del Ciclo de Trabajo: 50% +/-10%
- Pulsos por Litro: 450
- Durabilidad: Mínimo 300,000 ciclos
- Largo del Cable: 15cm
- Conectores nominales tubería de 1/2"
- Diámetro externo de 0.78"
- Rosca de 1/2"
- Tamaño: 2.5" x 1.4" x 1.4"

### Montaje para el sensor de caudal

#### Componentes:

- Arduino Uno
- Sensor de Flujo YF-S201
- 2 conectores de ½ pulgada
- 1 pedazo de manguera de ½ pulgada
- 1 embudo
- Teflón para evitar fugas en los conectores



**Figura 27 Conexión del sensor de flujo YF-201 con Arduino**

(Mecatronics Chips, 2016)

### 2.7.6 Selección del actuador

Para el proceso de generación de vapor, el actuador que se requiere en el sistema es uno de tipo eléctrico. Este actuador controla el caudal que ingresa a la camisa térmica, en función de una tensión, por lo tanto, una electroválvula cumple estas condiciones.

### 2.7.7 Electroválvula

Conocida como válvula solenoide, se abre y cierra dependiendo del campo magnético que genera un electroimán o solenoide. (Panelserver, 2016).

Para el control de flujo de agua que ingresa en el enchaquetado térmico se seleccionó una electroválvula Water Inlet Valve AC 110V, ya que sus características de solidez y fiabilidad son ideales para aplicaciones industriales. Se adaptan particularmente para el control de agua, aire, gases inertes, vapor y en general de fluidos no agresivos. Las soluciones técnicas adoptadas permiten tener espacio reducidos, tiempo de instalación rápidos e intervenciones de mantenimiento específicas (Panelserver, 2016).



**Figura 28 Electroválvula de agua Inlet AC 110V**

(Adison, 2016)

### 2.7.8 Selección del microcontrolador

Para la aplicación del proyecto, el microcontrolador es usado para la lectura de los sensores, adquisición de los datos generados por la termocupla y el sensor de flujo, además del control digital que se aplique. La tarjeta electrónica que se eligió para el proyecto es un Arduino UNO, ya que los sensores se conectan con facilidad a la tarjeta, el tiempo de adquisición de datos es el adecuado para las características del sistema, es de bajo de costo y la arquitectura es abierta. (Arduino, 2016).



**Figura 29 Arduino UNO**

(Arduino, 2016)

**Tabla 4**

#### Especificaciones técnicas Arduino

|   |  |
|---|--|
| <b>microcontrolador</b>                     | <b><u>ATmega328P</u></b>                     |
| <b>Tensión de funcionamiento</b>            | 5V   |
| <b>Voltaje de entrada<br/>(recomendado)</b> | 7-12V  |
| <b>Voltaje de entrada (límite)</b>          | 6-20V  |
| <b>E / S digitales prendedores</b>          | 14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM) |
| <b>PWM digital pines I / O</b>              | 6  |

Continua



|  |  |
|--|--|
| <b>Pines de entrada analógica</b>        | 6  |
| <b>Corriente continua para Pin I / O</b> | 20 mA  |
| <b>Corriente CC para Pin 3.3V</b>        | 50 mA  |
| <b>Memoria flash</b>                     | 32 KB (ATmega328P)<br>de los cuales 0,5 KB utilizado por el gestor de arranque |
| <b>SRAM</b>                              | 2 KB (ATmega328P)  |
| <b>EEPROM</b>                            | 1 KB (ATmega328P)  |
| <b>Velocidad de reloj</b>                | 16 MHz   |
| <b>LED_BUILTIN</b>                       | 13   |
| <b>Longitud</b>                          | 68,6 mm  |
| <b>Anchura</b>                           | 53,4 mm  |
| <b>Peso</b>                              | 25 g   |

Fuente: (Arduino, 2016)

## **CAPÍTULO 3**

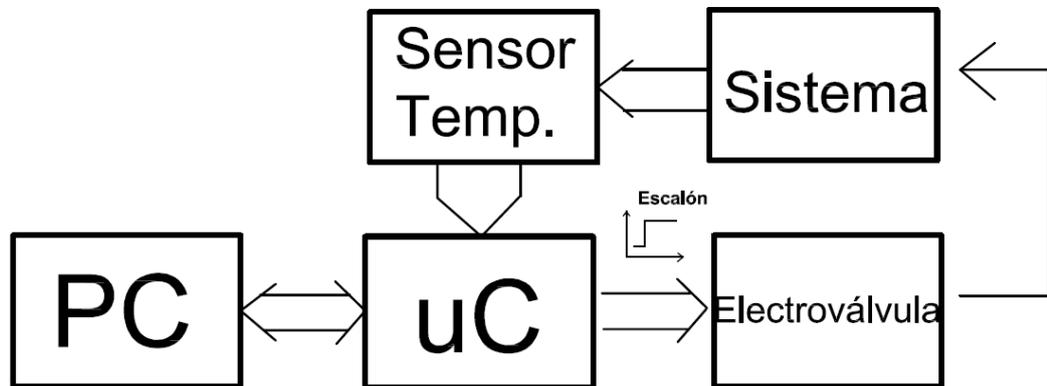
### **IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN**

Para el diseño del controlador digital en el sistema de generación vapor se aprovechará la disponibilidad de herramientas digitales como el computador y el microcontrolador, debido a las ventajas de trabajar con señales digitales que prestan estos equipos como: mayor productividad, mínimo costo, consumo mínimo de energía, mejor tiempo de respuesta de los sistemas dinámicos y la flexibilidad en los programas de control (Ogata, 2000).

En la aplicación se definen primero los tipos de variables que intervienen, en este caso la variable controlada o de salida es la temperatura de vapor de agua, medida con un termopar tipo K cuyo valor ingresa al microcontrolador. La variable manipulada o de entrada, es el Caudal de agua que ingresa a la camisa térmica, ya que es la variable que se modifica con el fin de afectar la variable controlada (Temperatura), el Caudal se mide con el sensor de flujo YF-201, este valor también ingresa al microcontrolador.

#### **3.1 Adquisición de datos**

Una vez definidos los tipos de variables de entrada y salida que intervienen en el sistema, se obtienen los datos del proceso en funcionamiento. Para definir el modelo matemático de la Planta, se realizó la adquisición de datos entrada/salida mediante el esquema de la figura 30.



**Figura 30 Sistema de Adquisición de Datos**

La adquisición de datos se lo realiza por medio del microcontrolador ATmega328P de Arduino, cuyos valores se exportan a una hoja de Excel, el tiempo de adquisición es de 500 ms en base a experimentos anteriores. Se obtiene la temperatura de vapor a la salida de la camisa térmica por medio de la termocupla tipo K en grados Celsius y del caudal de entrada en litros/hora por el sensor de flujo YF-S201, como se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5**

**Adquisición de datos**

| Fila | Hora     | Temp_vapor[°C] | Caudal [l/h] |
|------|----------|----------------|--------------|
| 1    | 12:28:22 | 81,00          | 75           |
| 2    | 12:28:22 | 80,75          | 75           |
| 3    | 12:28:23 | 84,75          | 75           |
| 4    | 12:28:23 | 91,00          | 75           |
| 5    | 12:28:24 | 91,75          | 75           |
| 6    | 12:28:24 | 92,00          | 75           |
| 7    | 12:28:25 | 91,75          | 75           |
| 8    | 12:28:25 | 92,50          | 75           |

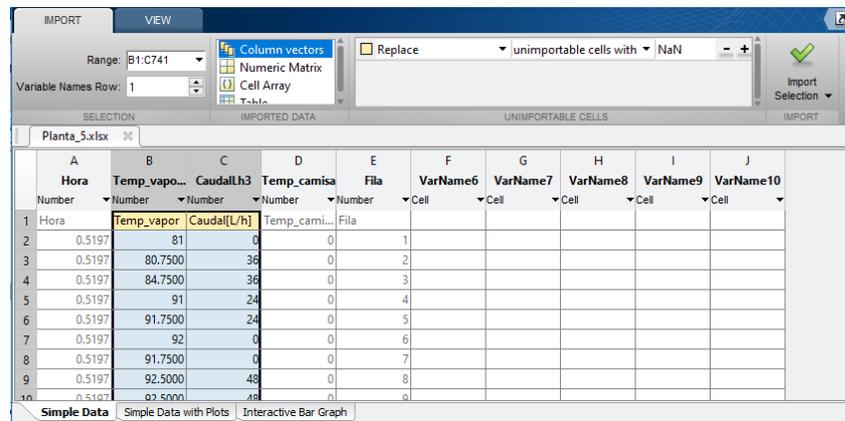
Continua



|    |          |       |    |
|----|----------|-------|----|
| 9  | 12:28:26 | 92,50 | 75 |
| 10 | 12:28:26 | 92,50 | 75 |
| 11 | 12:28:27 | 92,75 | 75 |
| 12 | 12:28:27 | 92,75 | 75 |
| 13 | 12:28:28 | 92,75 | 75 |
| 14 | 12:28:28 | 92,75 | 75 |
| 15 | 12:28:29 | 92,75 | 75 |
| 16 | 12:28:29 | 93,00 | 75 |
| 17 | 12:28:30 | 92,75 | 75 |
| 18 | 12:28:30 | 93,00 | 75 |
| 19 | 12:28:31 | 93,00 | 75 |
| 20 | 12:28:31 | 93,00 | 75 |
| 21 | 12:28:32 | 93,00 | 75 |
| 22 | 12:28:32 | 93,00 | 75 |

### 3.2 Planta del sistema

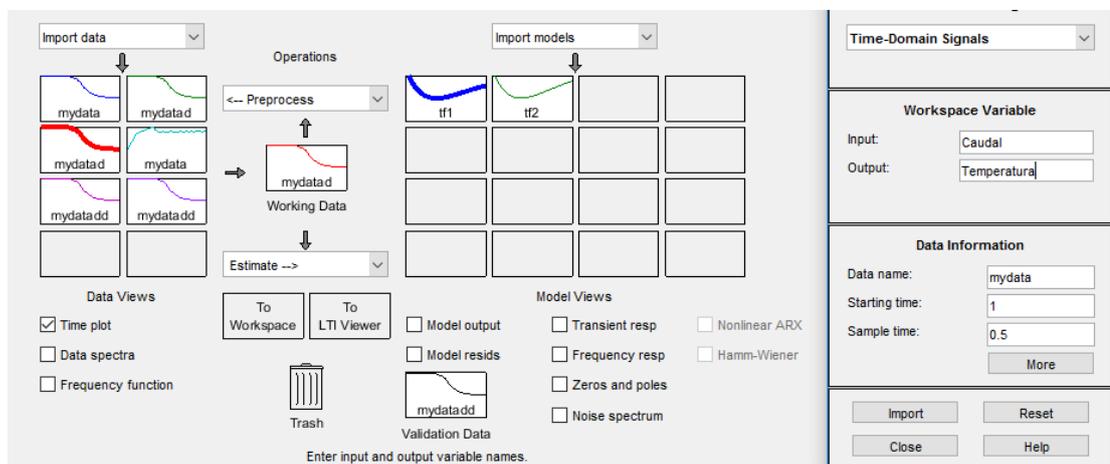
Los datos obtenidos se exportan a MATLAB® creando un vector de entrada del caudal y otro vector de salida de temperatura como se muestra en la figura 31. Para visualizar la respuesta de la temperatura en función del caudal.



| Variable    | Unit   | Value   |
|-------------|--------|---------|
| Hora        | Number | 0.5197  |
| Temp_vapor  | Number | 81      |
| Caudal      | Number | 80.7500 |
| Temp_camisa | Number | 36      |
| Filas       | Number | 0       |

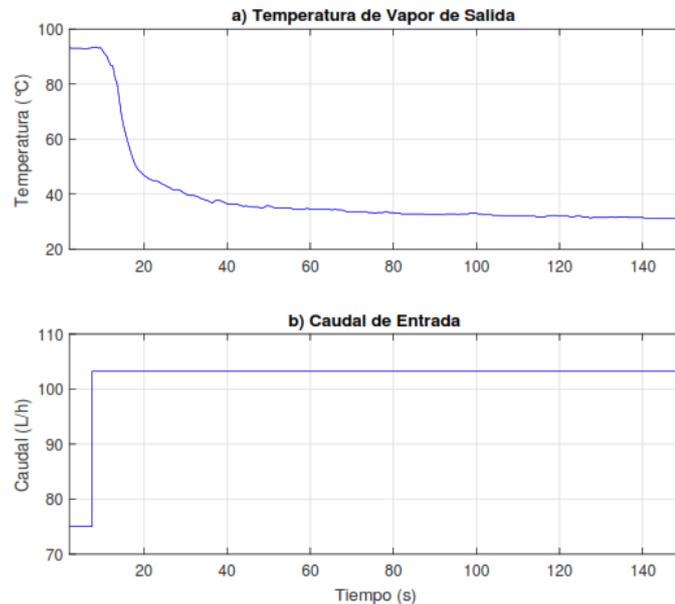
**Figura 31 Valores de Caudal y Temperatura importados a MATLAB®**

Con la ayuda de la herramienta IDENT de MATLAB se importa los datos de entrada y salida, con un tiempo de muestreo de 500 ms, además se eliminan las medias y las tendencias como se indica en la figura 32, con estos datos se trabajan para obtener la función de transferencia.



**Figura 32 Importación de datos a IDENT**

Con los datos obtenidos se tiene una respuesta de la temperatura de vapor ante la entrada tipo escalón de caudal. En el software se grafica las variables en función del tiempo como se indica en la figura 33.

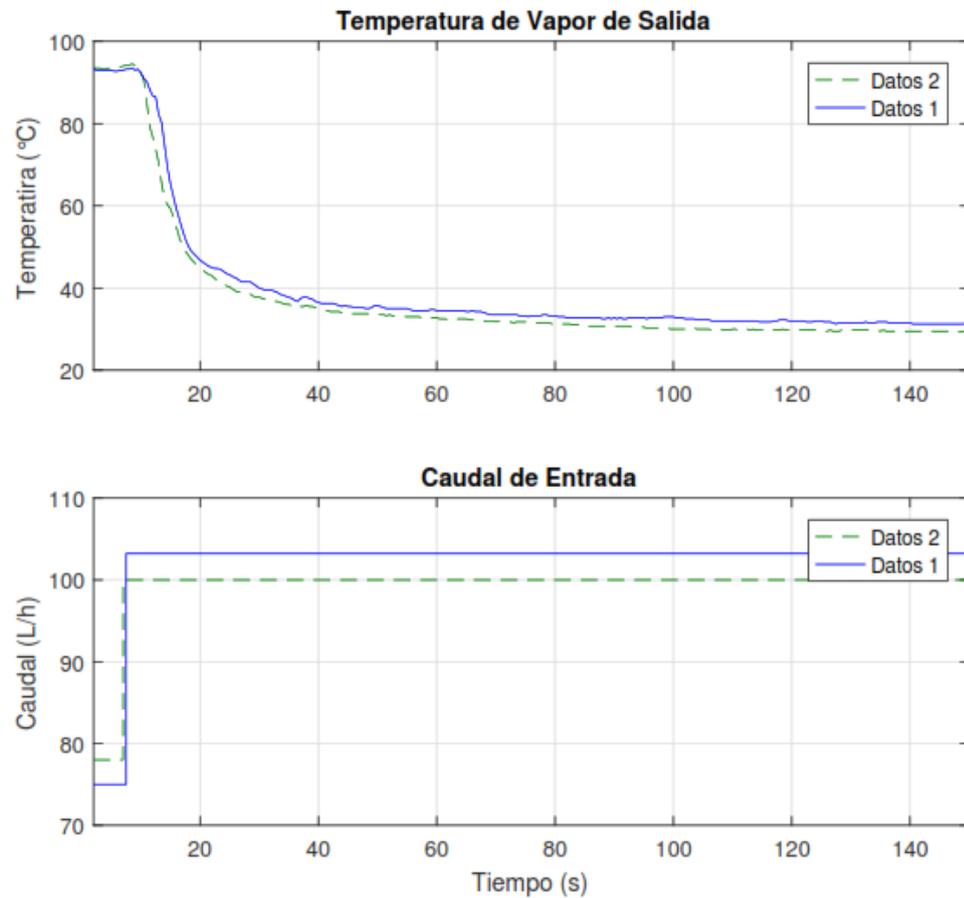


**Figura 33 a) Temperatura de vapor en función del tiempo b) Entrada de Caudal tipo escalón.**

### 3.3 Validación de los Datos

Para la validación de la planta se realiza una segunda adquisición de datos, al seguir con el orden de los pasos anteriormente mencionados y en la herramienta IDENT se importan los datos de entrada Caudal2 y de salida Temperatura2. Una vez creada la segunda adquisición de datos se arrastran los mismos al icono de Validation Data de la figura 32.

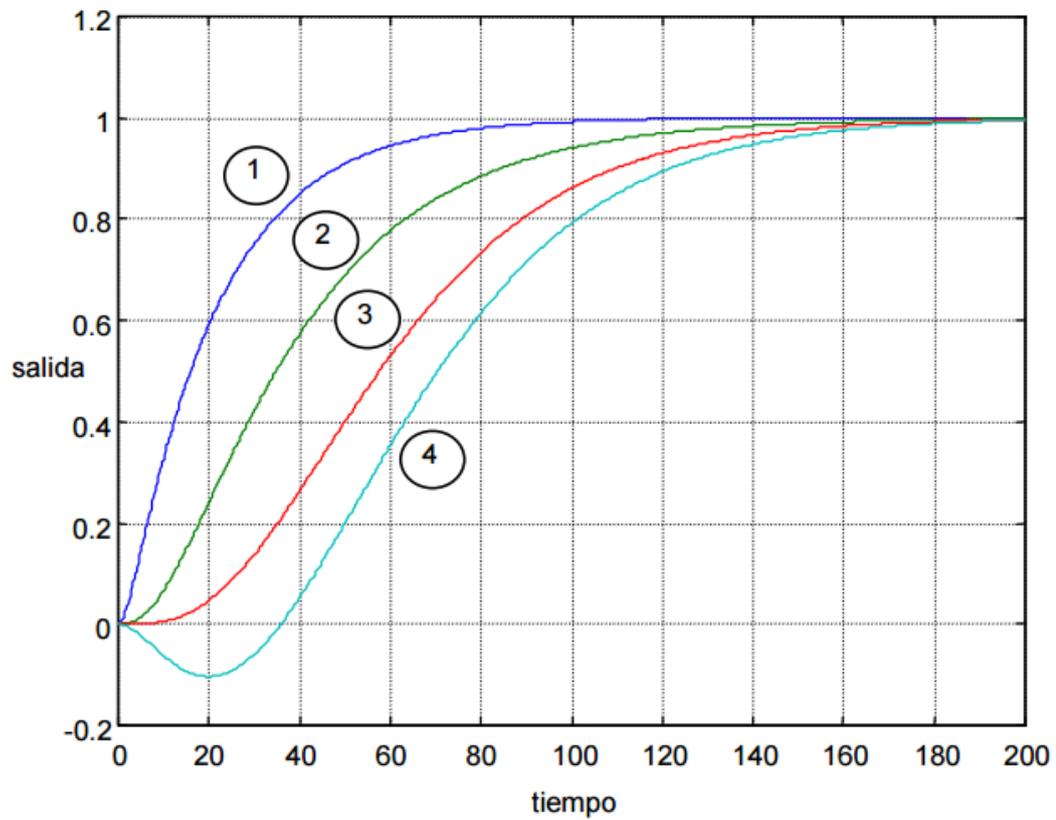
En el software se grafican las dos tomas de datos, la primera (Datos1) para obtener la planta y la segunda (Datos2) como se muestra en la figura 34, con el fin de validar los datos.



**Figura 34 Validación de Datos**

### 3.4 Función de transferencia

La mayoría de los procesos tienen respuesta monótona creciente a una entrada escalón, lo que indica el orden del sistema como se muestra en la figura 35. El proceso de generación de vapor tiene una respuesta decreciente a una entrada de caudal tipo escalón, sin retardo y de segundo orden como se observa en la figura 33.



**Figura 35 Respuesta de Procesos a una entrada Escalón**

(Morilla, 2006)

Se estimó un modelo de segundo orden por la respuesta del sistema ante una entrada escalón, con la ayuda de IDENT se modeló un sistema con dos polos y un zero sin retardo como se muestra en la figura 36, y otro modelo con dos polos, sin zeros y sin retardos como se observa en la figura 37.

Transfer Function

$$\frac{K(1 + Tz s)}{(1 + Tp1 s)(1 + Tp2 s)}$$

Poles

2 All real

Zero  
 Delay  
 Integrator

| Par | Known                    | Value   | Initial Guess | Bounds       |
|-----|--------------------------|---------|---------------|--------------|
| K   | <input type="checkbox"/> | 0.27619 | Auto          | [-Inf Inf]   |
| Tp1 | <input type="checkbox"/> |         | Auto          | [0 98202.81] |
| Tp2 | <input type="checkbox"/> |         | Auto          | [0 10000]    |
| Tp3 | <input type="checkbox"/> | 0       | 0             | [0 Inf]      |
| Tz  | <input type="checkbox"/> |         | Auto          | [-Inf Inf]   |
| Td  | <input type="checkbox"/> | 0       | 0             | [0 Inf]      |

Initial Guess

Auto-selected  
 From existing model:  
 User-defined

Disturbance Model: None  
Focus: Simulation

Initial condition: Auto  
Covariance: Estimate

Display progress

**Figura 36 Modelamiento de la Planta con dos Polos, un Zero y sin Retardo**

Transfer Function

$$\frac{K}{(1 + Tp1 s)(1 + Tp2 s)}$$

Poles

2 All real

Zero  
 Delay  
 Integrator

| Par | Known                    | Value   | Initial Guess | Bounds       |
|-----|--------------------------|---------|---------------|--------------|
| K   | <input type="checkbox"/> | 0.27619 | Auto          | [-Inf Inf]   |
| Tp1 | <input type="checkbox"/> |         | Auto          | [0 98202.81] |
| Tp2 | <input type="checkbox"/> |         | Auto          | [0 10000]    |
| Tp3 | <input type="checkbox"/> | 0       | 0             | [0 Inf]      |
| Tz  | <input type="checkbox"/> | 0       | 0             | [-Inf Inf]   |
| Td  | <input type="checkbox"/> | 0       | 0             | [0 Inf]      |

Initial Guess

Auto-selected  
 From existing model:  
 User-defined

Disturbance Model: None  
Focus: Simulation

Initial condition: Auto  
Covariance: Estimate

Display progress

**Figura 37 Modelamiento de la Planta con dos Polos, sin Zero y sin Retardo**

Como se muestra en la figura 38, el modelo de salida con mayor Índice de Ajuste (FIT), es el que tiene dos polos sin cero y sin retardo. Se eligió este modelo y provee como función de transferencia a la ecuación

$$G(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{Kp}{(1 + Tp1 \times s)(1 + Tp2 \times s)} \quad (3.1)$$

donde:

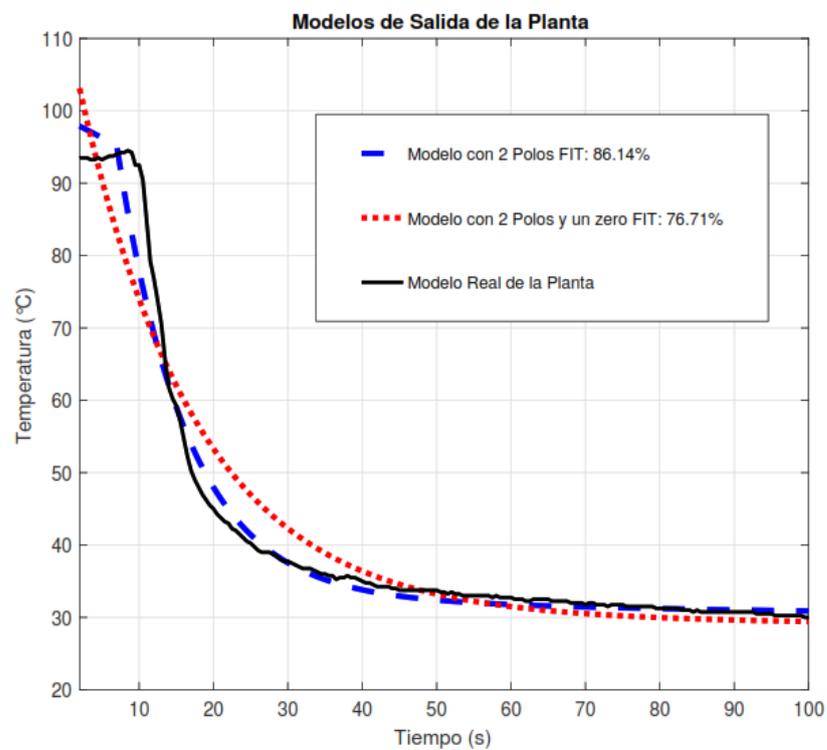
$$Kp = -4.08$$

$$Tp1 = 4.04$$

$$Tp2 = 4.07$$

$$G(s) = \frac{-4.08}{(1 + 4.04s)(1 + 4.07s)}$$

$$G(s) = \frac{-4.08}{16.44s^2 + 8.11s + 1} \quad (3.2)$$



**Figura 38 Modelos Matemáticos de la Planta**

### 3.5 Diseño del Controlador

Al obtener la función de transferencia (3.2), del sistema de generación de vapor de agua, se procede automatizar el proceso. Al diseñar un control automático que compara el valor real de la salida, que es temperatura de vapor, con el valor deseado. En esta comparación se determina la desviación y se produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador produce la señal de control se llama acción de control (Ogata, 2000).

Las acciones de control encontradas en los controladores automáticos industriales son:

- Controladores de dos posiciones o de encendido-apagado.
- Controladores proporcionales.
- Controladores integrales.
- Controladores proporcionales integrales.
- Controladores proporcionales derivativos.
- Controladores proporcionales integrales derivativos.

En la teoría de control (Ogata, 2000), se recomienda comprender las propiedades básicas de las diferentes acciones de control con el objeto de seleccionar la más adecuada a su instalación particular.

En la aplicación del sistema generador de vapor, al ser de segundo orden y un proceso de temperatura, lo recomendable es un controlador proporcional integral, ya que los procesos de temperatura generan una respuesta lenta, ante entradas del sistema.

El controlador detecta la señal de error actuante, la cual usualmente está en un nivel muy bajo de potencia y la amplifica a un nivel más alto. Usualmente se usan circuito de realimentación, junto con un amplificador para componer la señal de error actuante y producir una mejor señal de control.

Los actuadores son elementos que producen la entrada a la planta de acuerdo con la señal de control, de modo que la señal de realimentación corresponde a la señal de entrada de referencia.

El elemento de medición es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable adecuada, tal como desplazamiento, presión o tensión, la cual se usa para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. Este elemento se encuentra en lazo de realimentación del sistema de malla cerrada. Para el punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades de la señal realimentada desde el elemento de medición (Ogata, 2000).

La aplicación de aprovechamiento térmico de un gasificador tipo downdraft, para la generación de vapor. Es un sistema donde ingresa agua desde un tanque a una camisa térmica, por el proceso de conducción desde el reactor del gasificador, el agua aumenta su temperatura y a la salida se obtiene vapor saturado. El proceso se desea automatizar, para que la temperatura de salida siempre se mantenga en un rango mayor a  $90^{\circ}\text{C}$ , para garantizar la salida de vapor. Para controlar la temperatura de vapor, la variable de entrada o de referencia será el caudal de agua que ingrese al encamisado térmico.

La temperatura del reactor del gasificador tipo downdraft no se puede manipular, ya que en el proceso termo-químico de gasificación las temperaturas están en un rango establecido, para que no se vea afectada la producción del gas combustible. Entonces, la variable de referencia es el caudal de agua.

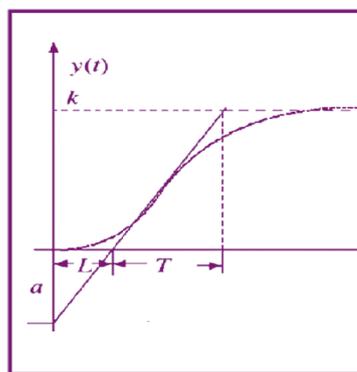
Para el control de temperatura de salida de vapor, se obtuvo el modelo matemático de la planta establecido en (3.2). El sistema de control para la aplicación requerida, consta de un controlador automático, un actuador, una planta y un elemento de medición. El controlador, detecta la señal de error actuante que será la diferencia entre el caudal de referencia y el caudal de agua real medido.

El actuador es el elemento que produce la entrada a la planta de acuerdo con la señal de control, es un actuador eléctrico, una electroválvula Water Inlet Valve AC 110V, de modo que la señal de caudal de realimentación corresponda a la señal de caudal de entrada de referencia.

El elemento de medición es el dispositivo que convierte la señal de salida en otra variable para comparar la salida con la señal de referencia. En el proceso se tiene sensores de temperatura, una Termocupla tipo K y un sensor de flujo YF-S201.

### 3.5.1 Fórmula empírica para la sintonización de controladores de Ziegler-Nichols

Una fórmula empírica de sintonización, fue propuesta por Ziegler y Nichols a principios de 1942. Si la respuesta a la entrada escalón en el modelo de la planta en lazo abierto es como la mostrada en la figura 39, entonces los parámetros de  $k$ ,  $L$  y  $T$  pueden extraerse de una forma sencilla. Con los valores de  $L$  y  $a = \frac{kL}{T}$ , y utilizando la información proporcionada en la tabla 4 sobre las fórmulas de sintonización, pueden obtenerse los parámetros para los tipos de controladores P, PI y PID (Anaya, 2014).



**Figura 39** Curva característica “S” de la salida ante una entrada escalón

(Anaya, 2014)



La figura 41 presenta los valores obtenidos para los parámetros de  $a$  ,  $k$  ,  $L$  y  $T$  .Estos valores se ingresan en la tabla 4 para obtener el controlador PI de ecuación (3.2).

$$k = -4$$

$$L = 2.61$$

$$T = 5.45$$

$$a = \frac{kL}{T} = \frac{-4 \times 2.61}{5.45} = -1.92$$

Para el controlador PI los valores de  $K_p$  y  $T_I$  según la tabla 4 son:

$$K_p = \frac{0.9}{a} = \frac{0.9}{-1.92} = -0.468$$

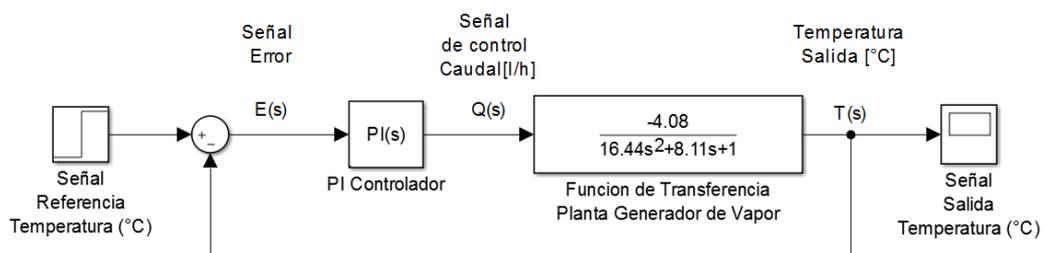
$$T_I = 3L = 3 \times 2.61 = 7.83$$

Estos valores de constantes proporcional e integral se reemplazan en la ecuación del controlador PI (3.1).

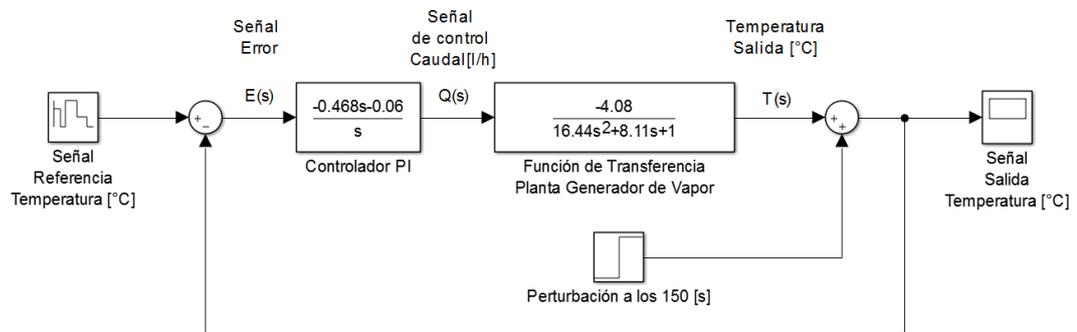
$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (3.1)$$

$$G_c(s) = -0.468 \left( 1 + \frac{1}{7.83s} \right)$$

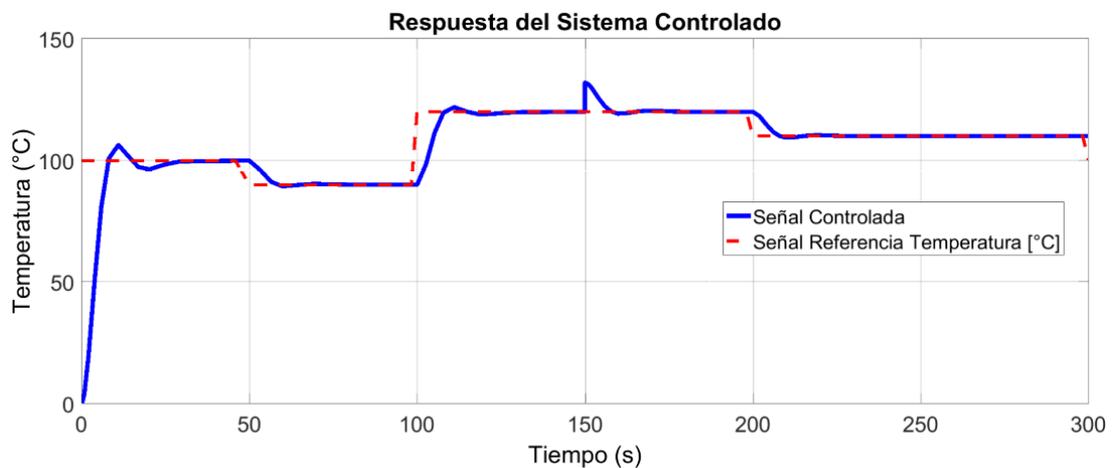
$$G_c(s) = -0.468 - \frac{0.06}{s} \quad (3.2)$$



**Figura 42 Sistema Lazo Cerrado**



**Figura 43 Diagrama de bloques del Sistema Controlado**



**Figura 44 Respuesta del Sistema Controlado en función del tiempo**

Como se observa en la figura 44, la señal de salida controlada, sigue a la señal de referencia, además en el tiempo de 150 segundos se colocó una perturbación del 10% del escalón y se observa que existe un pequeño sobrepico, pero luego regresa a la referencia, controlando la planta, es decir el controlador PI está ejerciendo su función.

### 3.6 Plan Financiero

Tabla 7

Presupuesto en dólares.

| Descripción                  | Precio Total   |
|------------------------------|----------------|
| Camisa térmica               | 200,00         |
| Electroválvula               | 300,00         |
| Sensores de temperatura      | 400,00         |
| Tarjeta uC                   | 40,00          |
| Etapa de potencia            | 50,00          |
| Elementos electrónicos       | 70,00          |
| Acondicionamiento de señales | 50,00          |
| Mano de obra                 | 200,00         |
| Accesorios y pintura         | 70,00          |
| Gastos imprevistos           | 150,00         |
| <b>TOTAL</b>                 | <b>1530,00</b> |

## Bibliografía

- Adison.* (2016, Diciembre 10). Retrieved from [adison.com.my/index.php?id\\_category=53&controller=category](http://adison.com.my/index.php?id_category=53&controller=category)
- Anaya, M. (2014, Marzo 3). *EPISTEMUS*. Retrieved from [http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/16-art2\\_DISENODECONTROLADORESPPIPID.pdf](http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/16-art2_DISENODECONTROLADORESPPIPID.pdf)
- Arduino.* (2016, Diciembre 20). Retrieved from <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- Asociación local de Etanol. (2015). Retrieved from [www.mem.gob.gt: http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2014/02/01-APLA-Flavio-Castelar.pdf](http://www.mem.gob.gt:www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2014/02/01-APLA-Flavio-Castelar.pdf)
- Bordóns , C. (2016, Octubre 22). *Tecnología del Control*. Retrieved from [http://www.esi2.us.es/~fsalas/asignaturas/CA3II06\\_07/Sensores%20y%20actuadores.pdf](http://www.esi2.us.es/~fsalas/asignaturas/CA3II06_07/Sensores%20y%20actuadores.pdf)
- Castro, S. (2015). *Instalación y arranque de un prototipo de gasificación. Tesis de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional Autónoma de México.* Mexico D.F.
- Cengel Yunus, A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. Reno: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. Tercera Edición.
- Cogeneración, P. d. (2016, octubre). *Plantas de cogeneración*. Retrieved from <http://www.plantasdecogeneracion.com/index.php/las-plantas-de-cogeneracion>
- Delgado, D. (2015). *Sectores Estratégicos*. Retrieved from <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/01/Balance-Energe%CC%81tico-Nacional-2015.pdf>
- ESTRADA, C. A. (2004, agosto). *GASIFICACIÓN DE BIOMASA PARA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DE BAJO*. Retrieved from <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7229/4237>
- Garay, C., Guevara, C., & Sorto, J. (2008). *Desarrollo de una nueva cocina mejorada para leña basada en el principio de gasificación de flujo cruzado natural. Tesis de licenciatura de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Centroamericana José Simeón cañas.* Cuscatlán, El Salvador.

- Gestión. (2015, 3 29). *Gestión G*. Retrieved from <http://gestion.pe/http://gestion.pe/economia/cogeneracion-aporta-ahorros-economicos-y-energeticos-mayores-al-30-empresas-2127553>
- Gomelsky, R. (2013). *Sustainable Energy for All*. Retrieved from [http://www.se4all.org/sites/default/files/Ecuador\\_RAGA\\_ES\\_Released.pdf](http://www.se4all.org/sites/default/files/Ecuador_RAGA_ES_Released.pdf)
- Gonzales Velasco, J. (2009). *Energías renovables. (Reverté, Ed.) (1a ed.)*.
- Haro , C., & Yarad, M. (2013). *Diseño y construcción de un sistema de generación de combustible alternativo a través de biomasa controlado electrónicamente para su aplicación en un Jeep Willys 1974. Tesis de Ingeniería Mecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sangolquí.*
- Hobbytronics*. (2016, Noviembre 14). Retrieved from <http://www.hobbytronics.co.uk/yf-s201-water-flow-meter>
- INER. (2015). *Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables*. Retrieved from [http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/BIOMASA\\_DOSSIER.pdf](http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/BIOMASA_DOSSIER.pdf)
- Kern, D. (1998). *Procesos de Transferencia de Calor*. New York: MCGRAW Hill Book Company, Inc.
- Larssystem*. (2016, Octubre 24). Retrieved from <http://larssystem.com/tienda/automatizacion/sensores/termocoplas/termocoplas/>
- Mahuli González, A. (2015). *Intercambiadores de Calor*. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Programa de Ingeniería Química Aprendizaje Dialogico Interactivo Operaciones Unitarias I .
- Mandado, E. (2007). *Microcontroladores*. Barcelona: Marcombo.
- Martín, M. V. (2003). *Cogeneración*. Madrid: FC Editorial.
- Martínez, J. (2014, septiembre 16). *Tecnología y Energía Verde*. Retrieved from <http://tecnologiayenergiaverde.blogspot.com/2014/09/tecnologias-de-gasificacion.html>
- Mecatronicum*. (2015, noviembre 3). *MECATRONIUM CHIPS*. Retrieved from <http://chips.mecatronicum.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201/>
- Mecatronicum Chips*. (2016, Diciembre 2). Retrieved from <http://chips.mecatronicum.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201/>

- Millán, R. (2010). *Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid*. Retrieved from <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Cogeneracion-fenercom-2010.pdf>
- Mills, A. (1997). *Transferencia de calor*. Colombia: Mc Graw-Hill.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2013). Retrieved from [www.energia.gob.ec/coogeneracion/](http://www.energia.gob.ec/coogeneracion/)
- Miño, I. S. (2016, agosto). *EnerPro Cía. Ltda.* Retrieved from [http://ecuador.ahk.de/fileadmin/ahk\\_ecuador/Uploads-Webseite/Dienstleistungen/Dokumente/Projekte/2016/AHKGyeBiomasaCuescoPalmaSSanchez180816.pdf](http://ecuador.ahk.de/fileadmin/ahk_ecuador/Uploads-Webseite/Dienstleistungen/Dokumente/Projekte/2016/AHKGyeBiomasaCuescoPalmaSSanchez180816.pdf)
- Morilla, F. (2006). *Controladores PID*. Retrieved from <http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/ajuste-empirico.pdf>
- Naciones Unidas. (1998). *Naciones Unidas*. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Necochea, I. M. (2016, Octubre 5). Retrieved from [http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal\\_Sensores.pdf](http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensores.pdf)
- Nogues, S., García Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa (Volumen 1)*. Pág. 401-429. *Prensas Universitarias de Zaragoza*. Zaragoza, España.
- Ñeco, R. (2003). *Editorial Club Universitario*. Retrieved from [www.editorial-club-universitario.es/libro.asp?ref=433](http://www.editorial-club-universitario.es/libro.asp?ref=433)
- Ogata, K. (2000). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Nueva York: Prentice Hall, 2da Ed.
- Pallas, R. (2005). *Sensores y acondicionadores de señal*. Catalunya : Marcombo.
- Panelserver. (2016, Diciembre 5). Retrieved from <http://www.panelserver.net/pertegazsl/ElectroValvulas.pdf>
- Playingwithfusion. (2016, Noviembre 27). Retrieved from <http://www.playingwithfusion.com/index.php>
- Radiadores Gallardo. (2016, 11 27). Retrieved from <http://www.radiadoresgallardo.cl/topintercambiaodres.pdf>
- Rearte, M. (2016). *Centro de Investigación y Desarrollo Tucumán*. Retrieved from <https://www.inti.gob.ar/pdf/publicaciones/GasificacionBiomasa.pdf>

- Ruiz, J., Juárez, M., Morales, M., Muñoz, P., & Mendivil, M. (2013). *Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174-183. doi:10.1016/j.rser.2012.10.021.
- Sotillo, A. (2013, julio 31). *Transductores Electricos*. Retrieved from <http://transductores4.blogspot.com/2013/07/transductores-de-temperatura-y-humedad.html>
- Thermoequipos C.A. (2014, marzo 12). Retrieved from [http://www.thermoequipos.com.ve/pdf/articulo\\_03.pdf](http://www.thermoequipos.com.ve/pdf/articulo_03.pdf)
- Tipan, E. (2013). *Termocuplas*. Quito.
- Vargas Salgado, C. (2012). *Estudio Comparativo de la Utilización de las Tecnologías de Gasificación Downdraft y Lecho Fluido Burbujeante para la Generación de Energía Eléctrica en Aplicaciones de Baja Potencia*. Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Vildósola, E. (2016, Diciembre 2). Retrieved from <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf>