 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL EN TORRE  
DE ENFRIAMIENTO Y ANÁLISIS DE AHORRO ENERGÉTICO PARA LA  
EMPRESA PLASTINOVO S.A.S**

Juan Fernando Ávila Colorado

Ingeniería Mecatrónica

Director: Luis Alfonso Loaiza Upegui

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO  
MEDELLÍN  
MARZO DE 2017**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

El objetivo principal del proyecto es el diseño e implementación de un sistema de control automático para la empresa Plastinovo S.A.S y análisis de ahorro energético con su respectivo retorno de inversión, utilizando la técnica de control PID, con el fin de mejorar las condiciones de operación de la planta, calidad en los procesos y disminución del consumo de energía, generando rentabilidad para la compañía. Para el desarrollo del trabajo se toma como punto de partida el diagnóstico inicial del funcionamiento del ventilador como relación al consumo de energía, posterior a esto se plantea un sistema de control identificando sus elementos, tomando como referencia la variable más crítica del proceso, para este caso particular se toma como variable controlada la temperatura de salida de la torre, ya que lo que le interesa a procesos posteriores es la temperatura que se le suministre, finalmente y después de configurar el control PID y de poner en marcha el sistema se toman datos finales del comportamiento del sistema debido al consumo eléctrico, obteniendo así valores de comparación que establecen la relación del consumo de energía antes y después de la implementación del sistema de control, de esta forma es posible analizar el ahorro del sistema y el tiempo de recuperación de la inversión. Se logra la implementación del sistema de control para la torre de enfriamiento en la empresa Plastinovo S.A.S, obteniendo un rendimiento óptimo del mismo y como principal resultado un ahorro de energía del 35%, recuperando la inversión en aproximadamente 16 meses, generando a partir de esto rentabilidad para la empresa.

*Palabras clave:* control PID, Torre de enfriamiento, ahorro de energía, sistema de control, control de temperatura.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

---

Inicialmente quiero agradecer a mi madre, Gloria Colorado, quien siempre ha estado durante mi proceso de formación, no solo de mi logro profesional si no de mi vida, brindando su apoyo en cada momento necesario para seguir con el objetivo de cumplir mis metas.

Quiero agradecer a los familiares que aportaron su granito de arena en pro de mi carrera. Agradecer a mi pareja Melisa Torres quien estuvo en momentos difíciles durante todo mi periodo de formación dando su apoyo incondicional. De igual manera agradezco a aquellos amigos y conocidos que creyeron en que esto se podía lograr, y que también ayudaron en mi proceso de formación como persona y profesional. No se puede dejar de lado a todos los compañeros de clase, profesores y personas dentro del ámbito académico que colaboraron en la construcción de este proyecto de vida, a ellos muchas gracias.

Un agradecimiento a la empresa Plastinovo S.A.S quien abrió sus puertas para realizar el proyecto, especialmente al ingeniero Elkin Loaiza quien apporto su experiencia para llevarlo a cabo, igualmente a los compañeros del área de mantenimiento general quienes de una u otra manera aportaron su granito de arena; por otro lado y no menos importante quiero agradecer a mi asesor Luis Alfonso Loaiza Upegui quien apporto sus conocimientos para el desarrollo de este trabajo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## ACRÓNIMOS

---

*EFC*: Elemento final de control

*SP*: Set point

*VC*: Variable controlada

*VM*: Variable manipulada

*TCRI*: controlador, registrador, indicador de temperatura

*F.E.M*: fuerza electromotriz

*RTD*: Resistance Temperature Detector

*AFC*: A. Faccini y Cia

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1.1.	Generalidades.....	7
1.2.	Objetivos.....	8
1.2.1.	General.....	8
1.2.2.	Específicos.....	8
1.3.	Descripción del contenido de los capítulos.....	9
2.	MARCO TEÓRICO.....	11
2.1.	Sistema de control.....	11
2.1.1.	Clasificación de los sistemas de control.....	11
2.1.1.1.	Sistema de lazo abierto.....	11
2.1.1.2.	Sistemas de lazo cerrado.....	12
2.1.1.3.	Sistemas análogos.....	12
2.1.1.4.	Sistemas digitales.....	12
2.1.1.5.	Sistema Híbridos.....	13
2.1.2.	Planta o Proceso.....	13
2.1.2.1.	Torre de enfriamiento.....	13
2.1.3.	Actuador.....	15
2.1.3.1.	Ventilador.....	15
2.1.3.2.	Motor.....	16
2.1.4.	Sensor.....	17
2.1.4.1.	Transductor de temperatura.....	17
2.1.4.2.	Transmisor.....	21
2.1.5.	Controlador.....	22
2.1.5.1.	Control PID.....	22
2.1.5.2.	Dispositivo controlador.....	25
2.2.	Equipo de medición.....	25
3.	METODOLOGÍA.....	28
3.1.	Diagnóstico.....	28
3.2.	Sistema de control.....	30

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3.	Puesta en operación .....	35
3.4.	Toma de datos final .....	35
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1.	Análisis diagnóstico inicial .....	37
4.2.	Comportamiento del sistema de control .....	40
4.3.	Análisis toma de datos final.....	42
4.4.	Ahorro energético .....	43
4.4.1.	Análisis antes del control .....	43
4.4.2.	Análisis después del control .....	44
4.4.3.	Retorno de inversión .....	44
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
5.1.	Conclusiones.....	46
5.2.	Recomendaciones.....	47
	REFERENCIAS .....	48
	APÉNDICE.....	50
A.	Plano eléctrico.....	50
B.	Cotización sensor + transmisor .....	51
C.	Cotización variador de velocidad .....	52
D.	Base de datos ante de implementación de control .....	53
E.	Base de datos después de implementación de control .....	53

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# INTRODUCCIÓN

## 1.1. Generalidades

Un sistema de control es un conjunto de componente físicos conectados y relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan la actuación de un elemento corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento (González, 2017) , estos son muy variados y abarcan diferentes tipos de proceso y de productos como: productos derivados del petróleo, productos alimenticios, proceso de temperatura, entre otros (Creus, 2011). En la actualidad la industria ha aumentado el uso de sistemas de control debido a su gran evolución y efectividad en los resultados del proceso, ya que la implementación de un controlador específicamente automático y lo suficientemente robusto garantiza la optimización del proceso y el aprovechamiento máximo de los recursos del mismo, generando en si mejoramiento en la calidad y una reducción notable en los costos de producción, es decir proporciona rentabilidad para la compañía.

Las torres de enfriamiento juegan un papel importante en Ingeniería para extraer calor de varios sistemas. Las torres de enfriamiento también se conocen como dispositivos de transferencia de calor y masa, basados en el concepto de evaporación Y enfriamiento convectivo del agua en contacto con el aire ambiente, para el desarrollo y análisis de este tipo de dispositivos se han utilizado una serie de parámetros que conllevan a realizar estudios del comportamiento del mismo con respecto al funcionamiento como flujo, masa, caudal, transferencia de calor entre otros (Singla & Das, 2016) de la misma manera se utilizan estas variables para la estructuración de los diferentes sistemas de control como el que plantea Ma, y otros el cual presenta un modelo de control predictivo Con el fin de minimizar el consumo de energía y satisfacer La demanda máxima de carga en el proceso prediciendo la evolución futura del sistema (Ma, y otros, 2012), al igual que la Estrategia de control de supervisión por Kaya y Sommer y la Esquema de control óptimo regulado por hora de Liu y Chuah Braun y Diderrich quienes demostraron el aumento de flujo del ventilador de la torre de enfriamiento como efecto neto de la potencia total (Xiao, Yaoyu, Seem, & Pengfei, 2012), lo cual con lleva a pensar que la implementación de un sistema de control corresponde a la optimización del funcionamiento y el aprovechamiento máximo de la capacidad del sistema con relación a la energía utilizada y por ende a la relación proporcional de la demanda del proceso (Ma, y otros, 2012).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Basado en lo anterior, actualmente la compañía Plastinovo S.A.S, empresa dedicada al proceso de elaboración de productos de plástico ubicada en el municipio de la Estrella-Antioquia, la cual cuenta con 22 máquinas inyectoras, busca la optimización de tareas y ahorro energético garantizando la calidad en los procesos, por tal motivo para el funcionamiento normal de una inyectora se necesitan servicios generales de energía, agua y aire los cuales dentro de sus lineamientos poseen características especiales; específicamente con el tema del agua enfriada por torre se requiere a una temperatura de 21°C aproximadamente, la cual cumple la función de enfriamiento de aceite de las maquinas por medio de intercambiadores de calor, teniendo en cuenta la tarea que cumple la torre de enfriamiento, se requiere implementar un sistema de control que responda a la necesidad básica de entregar el agua a la temperatura deseada y de igual forma a la demanda total de producción es de aclarar que la planta trabaja 24 horas y 7 días a la semana y la carga total de producción corresponde a la demanda de productos según el cliente. El objetivo principal del proyecto es optimizar y ahorrar energía lo cual se ve reflejado tanto económicamente como en la calidad del proceso ya que actualmente el funcionamiento de la torre de enfriamiento es al 100% sin importar las condiciones de operación como: demanda del proceso, temperatura del proceso y temperatura ambiente la cual cumple papel fundamental en el intercambio de calor.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

Desarrollar e implementar un sistema de control automático para la torre de enfriamiento en la empresa Plastinovo S.A.S.

### **1.2.2. Específicos**

- Realizar un Diagnóstico inicial de la torre de enfriamiento y el consumo de energía.
- Diseñar y estructurar el sistema de control en base a las condiciones de operación para el funcionamiento automático.
- Elaborar planos eléctricos y control.
- Realizar un análisis del ahorro energético y rentabilidad del proceso.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### **1.3. Descripción del contenido de los capítulos**

Apuntando al objetivo general y con el fin de presentar los conceptos, análisis, toma de decisión y resultados, este proyecto se presenta en seis capítulos que se describen a continuación brevemente:

#### *Capítulo 1 – Introducción*

En el capítulo uno, se presenta una introducción relacionada con el tema de control y la implantación en torres de enfriamiento, a su vez se da a conocer el problema identificado y la importancia de la implementación de este sistema, para tal motivo se plantean los objetivos general y específicos.

#### *Capítulo 2 – Marco teórico*

En el capítulo dos se encuentran todos los conceptos y teorías necesarias para elaborar y entender el contexto del trabajo, enfocando la temática al proceso real. Partiendo desde la estructuración de un sistema de control, hasta el análisis energético y los equipos necesarios para su medición.

#### *Capítulo 3 – Metodología*

En el capítulo tres se desarrolla la metodología propuesta, la cual contiene el análisis previo o diagnóstico del funcionamiento de la torre de enfriamiento antes de la implementación del sistema de control, seguido del diseño y elección del sistema de control, hasta la puesta en marcha y toma de datos final.

#### *Capítulo 4 – Resultados*

En el capítulo cuatro se describen los resultados obtenidos a partir de la implementación del control automático y la toma de datos de temperatura vs energía eléctrica, seguido de la comprobación de los datos del sistema y el análisis final de ahorro energético, dando respuesta a los objetivos propuestos.

#### *Capítulo 5 – Conclusiones*

En el capítulo cinco, se realizan las conclusiones del desarrollo del trabajo, donde también se plasma trabajos futuros con relación a la metodología implementada.

#### *Capítulo 6 – Referencia Bibliográficas*

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

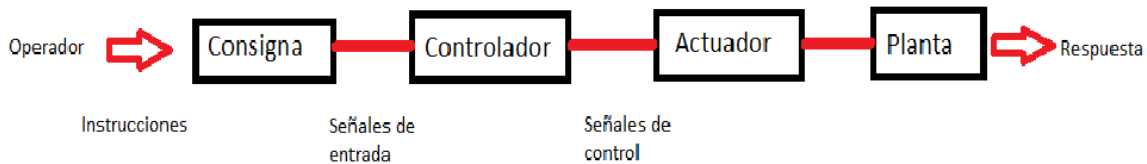
En el capítulo seis, se tienen las referencias bibliográficas utilizadas dentro del trabajo, por último los apéndices contienen información que no se incluyó dentro de la metodología o resultados, pero que es necesaria para la ejecución y análisis del trabajo.

## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos y teorías necesarios que explican el desarrollo del trabajo, partiendo de los componentes principales de un sistema de control hasta los softwares, dispositivos y recursos utilizados para llevar a cabo el trabajo.

### 2.1. Sistema de control

Un sistema se conoce como el conjunto de elementos asociados entre sí que actúan con un objetivo en común; teniendo en cuenta el contexto del trabajo dicho sistema se utiliza para la manipulación de un elemento (VM), en el cual recae la orden final (EFC), estos pueden ser manuales o automáticos y dependen de la naturaleza del mismo. Para tal efecto en el siguiente diagrama se presenta de forma general los componentes básicos que representan un sistema de control:



**Figura 2.1.** Esquema generalizado de un sistema de control

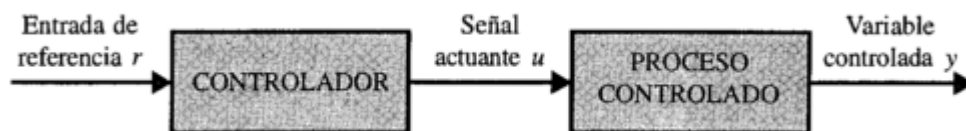
**Fuente:** Autor

#### 2.1.1. Clasificación de los sistemas de control

La clasificación de los sistemas de control dependen de la relación existente entre las señales de entrada y salida como se explicara a continuación.

##### 2.1.1.1. Sistema de lazo abierto

La característica principal de este tipo de control está dada por la relación independiente de la señal de entrada con la de salida, es decir no existe realimentación en el sistema.

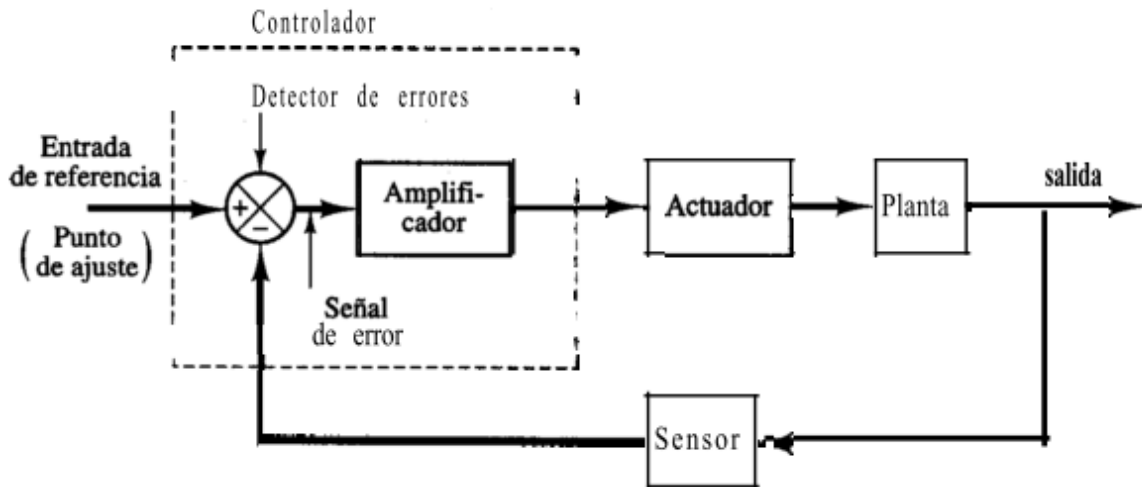


**Figura 2.2.** Esquema sistema de control en lazo abierto

**Fuente:** (Kuo, 1996, pág. 9)

### 2.1.1.2. Sistemas de lazo cerrado

La relación de diferencia que existe entre la señal de entrada y la señal de realimentación es la característica principal de dicho sistema, el cual crea un error actuante que es corregido posteriormente para que la salida se adapte al valor deseado.

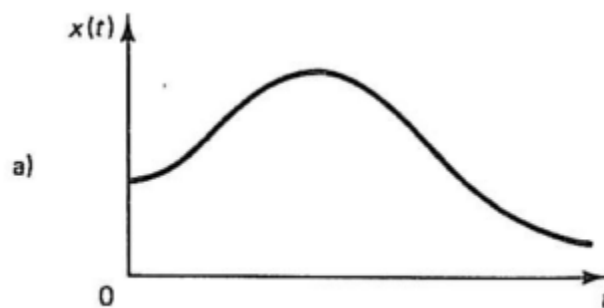


**Figura 2.3.** Esquema sistema de control en lazo cerrado

Fuente: (Ogata, 1998, pág. 212)

### 2.1.1.3. Sistemas análogos

Este tipo de sistema trabajan con señales de tipo continuo, dichas señales suelen representar del proceso magnitudes físicas mediante voltajes o corrientes proporcionales a su valor un ejemplo de estos sistemas son Temperatura, presión, flujo entre otros.



**Figura 2.4.** Esquema señal analógica

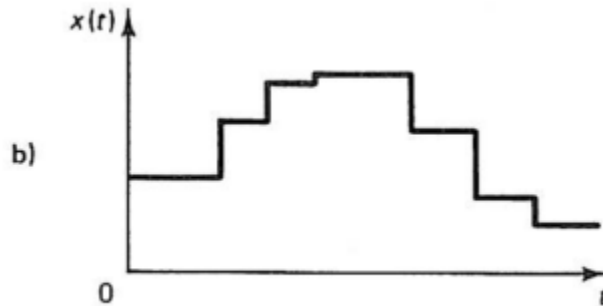
Fuente: (Ogata, 1996, pág. 2)

### 2.1.1.4. Sistemas digitales

Sistema que trabaja con señales de tipo discretos, todo o nada suelen estar representadas por variables lógicas cuyo valor es 0 o 1, empleando la notación binaria o el álgebra de Boole

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

un ejemplo de estos sistemas es el encendido y apagado de una lámpara, motor entre otros, es de aclarar que un sistema análogo puede ser convertido mediante técnicas y dispositivos en un sistema digital.



**Figura 2.5.** Esquema señal digital

**Fuente:** (Ogata, 1996, pág. 2)

#### **2.1.1.5. Sistema Híbridos**

En la actualidad la complejidad de los procesos ha obligado a mezclar los sistemas análogos y los digitales para formar un sistema de control óptimo y eficiente, por tanto la combinación de dichos sistemas es lo que conocemos como modelos híbridos.

#### **2.1.2. Planta o Proceso**

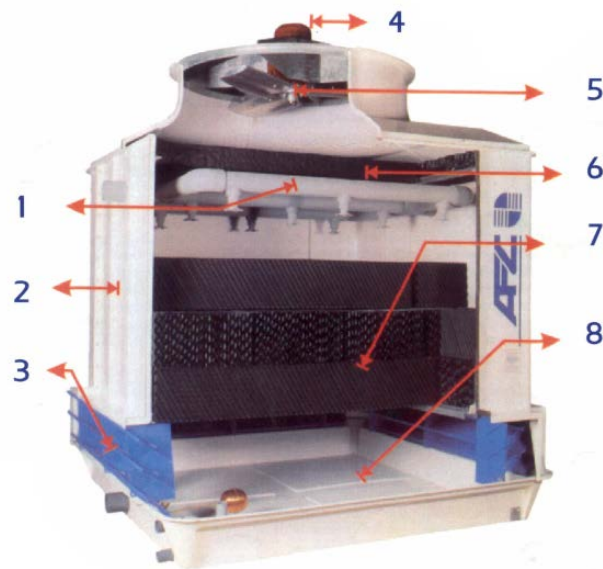
En general, se define como cualquier operación progresiva que mediante cambios graduales conducen hacia un resultado o fin determinado, en palabras resumidas una planta o proceso se denomina cualquier operación a ser controlada (Ogata, 1996). Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente para este trabajo el proceso a intervenir es una torre de enfriamiento como se menciona en el capítulo anterior (véase 1.1) cuyo objetivo principal es entregar agua fría para procesos posteriores, es de aclarar que el sistema necesita una temperatura de agua de torre de 21°C aproximadamente, ya que esta es la encargada de mantener la temperatura del aceite de las maquinas Inyectoras en la temperatura ideal (50 y 70 °C depende del fabricante y el tipo de aceite).

##### **2.1.2.1. Torre de enfriamiento**

Las torre de enfriamiento son equipos diseñados para enfriar agua, el fenómeno se debe principalmente por la evaporación de una pequeña parte del agua que se da en el intercambio de calor o dicho de otra manera en el intercambio de masa durante el flujo del mismo fluido, El agua caliente cae en forma de lluvia y al intercambiar calor con el aire frío, vaporiza una parte de ella, eliminándose de la torre en forma de vapor de agua, esto ocurre por convección, mediante la generación de un flujo de aire (ventilador y conductos) que

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

entra en contacto directo con el fluido, de acuerdo a lo anterior las torres de enfriamiento se pueden clasificar de diferentes formas: circulación natural de las cuales no se habla en este trabajo debido a que la que se interviene es de tiro mecánico y a su vez este tipo de torres está dividida en otras que dependen del flujo: tiro inducido, tiro forzado y flujo cruzado. La planta a intervenir es una torre de enfriamiento de tiro inducido en contraflujo la cual funciona con un ventilador (5) que crea un flujo en la dirección contraria al fluido generando el intercambio de masa, por tal motivo a continuación se muestran las partes de la torre de enfriamiento tipo TPA-060 de la marca AFC.



**Figura 2.6.** Partes torre de enfriamiento

**Fuente:** (Ogata, 1996, pág. 2)

- 1- Árbol de rociado con boquillas de aspersión
- 2- Estructura de fibra de vidrio
- 3- Persiana para entrada de aire
- 4- Motor con protección
- 5- Ventilador axial con bajo nivel de ruido
- 6- Eliminadores de gotas
- 7- Sección de evaporación
- 8- Tanque de agua

Teniendo en cuenta la imagen anterior, el agua entra a la torre por medio de las boquillas de aspersión, estas esparcen el líquido en forma de lluvia, luego pasan a la sección de evaporación donde se realiza el intercambio de calor, seguidamente caen al tanque de agua

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

a una temperatura menor; los demás elementos son implementos que permiten crear el fenómeno de convección, como lo son el ventilador con su respectivo motor y la persiana de aire. El funcionamiento de la torre depende de múltiples factores como lo son el flujo de agua, el flujo de aire, la temperatura ambiente, la temperatura del proceso entre otros, que no son estudiados a fondo debido a que el proyecto se trabaja desde el flujo de aire quien influye en mayor medida en el intercambio de masa.

### 2.1.3. Actuador

Los actuadores son elementos de los sistemas de control que responden a una salida controlada, entregando una respuesta al mismo, llamada acción de control (Bolton, 2001). Para esta aplicación el actuador es un ventilador, el cual es el encargado de crear el flujo del aire para el intercambio de calor, este dispositivo es dimensionado a partir del diseño de la torre de enfriamiento donde el punto de operación está dado por la capacidad de la torre y el  $\Delta$  de temperatura, teniendo en cuenta lo anterior el accionamiento del ventilador está dado por un motor que tiene relación entre la curva de trabajo del ventilador y las RPM del mismo.

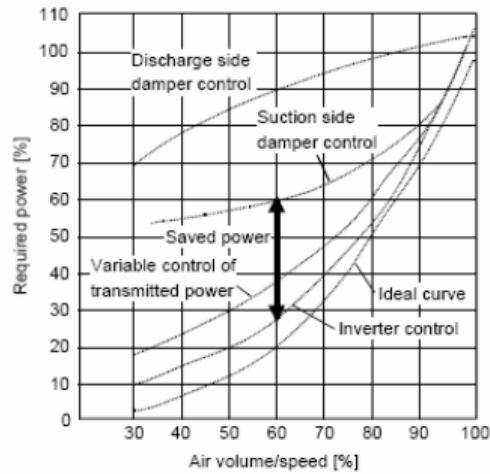
#### 2.1.3.1. Ventilador



**Figura 2.7.** Aspas de ventilador

**Fuente:** Autor

Un ventilador es un dispositivo que convierte la energía mecánica en flujo de aire, al igual que las bombas poseen un funcionamiento característico que dependen de la curva de operación que de manera general comprende entre el 30 y 100% depende específicamente del dispositivo, para este caso el ventilador trabaja de forma eficiente entre el 50 y 100% (30 – 60Hz respectivamente).



**Figura 2.8.** Curva característica de ventiladores  
**Fuente:** (Perez Lorenzana , 2017)

### 2.1.3.2. Motor

Un motor es un dispositivo que convierte la energía eléctrica a una fuerza rotativa (torque), es decir, energía mecánica. Esta fuerza rotativa es utilizada para realizar varios trabajos en este caso un ventilador (Perez Lorenzana , 2017). Para esta aplicación se utiliza un motor síncrono de 1200 RPM marca Siemens modelo 1LA7 096-6 YA60, alimentación trifásica 220V de 2HP (1,5KW) y consumo de corriente 7.8A.



**Figura 2.9.** Motor Siemens 1LA7 096-6 YA60  
**Fuente:** <http://w3.siemens.com>

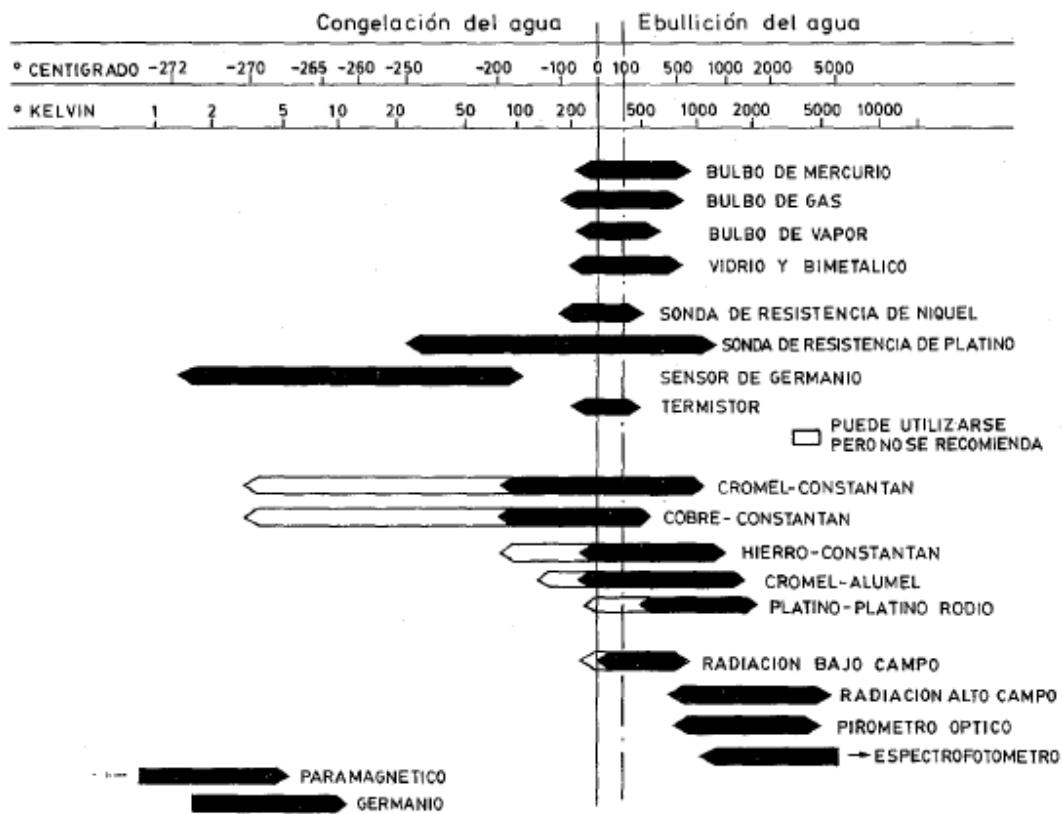
Es un motor especial para este tipo de aplicación, ya que posee protección IP55, debido a las condiciones en que opera, expuesto al ambiente y las variables de proceso (Chorros de agua y Protección contra polvo).



## 2.1.4. Sensor

### 2.1.4.1. Transductor de temperatura

Teniendo en cuenta la variable del proceso (Temperatura), se analizan los tipos de sensores que pueden utilizarse en el proceso, Las limitaciones de los sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador, registrador o controlador, es importante tener en cuenta lo anterior para la elección más óptima del sistema (Creus, 2011, págs. 223-224).



**Figura 2.10.** Campo de medida de los instrumentos de temperatura

Fuente: (Creus, 2011)

A continuación se presentan los diversos fenómenos por el que se mide la temperatura:

- variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases);
- variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia);

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- variación de resistencia de un semiconductor (termistores);
- f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares);
- intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación);
- otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal) (Creus, 2011, pág. 224).

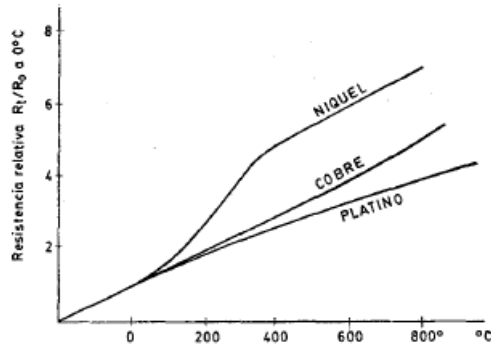
Es importante considerar que para el proceso y la aplicación como tal se necesita un instrumento de medición que entregue un señal eléctrica y este acorde con el intervalo de medición de temperatura (14 – 30 C°) Con base en lo anterior, es de aclarar que por el tipo de aplicación solo es necesario a entrar a profundizar en los instrumentos de medida termómetros de resistencia (RTD), termistores y termopares.

#### **2.1.4.1.1. Termómetros de resistencia (RTD)**

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de las características de resistencia en función de la temperatura propia del elemento de detección, dichas característica dependen del tipo de material, el cual debe poseer lo siguiente (Creus, 2011, pág. 228):

- Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible.
- Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad).
- Relación lineal resistencia-temperatura.
- Rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).
- Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Por tanto los materiales utilizados para realizar este tipo de instrumentos de medición son el platino, cobre y níquel.



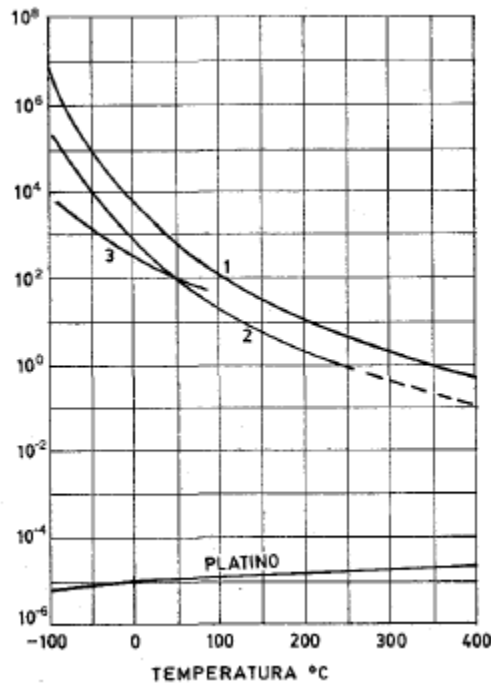
**Figura 2.11.** Curva de variación de resistencia relativa a la temperatura  
**Fuente:** (Creus, 2011, pág. 229)

<i>Metal</i>	<i>Resistividad μΩ/cm</i>	<i>Coefficiente temp. Ω/Ω, °C</i>	<i>Intervalo útil de temp. °C</i>	<i>∅ mín. de hilo mm</i>	<i>Coste relativo</i>	<i>Resis. sonda a 0° C, ohmios</i>	<i>Preci- sión °C</i>
Platino	9,83	0,00385	— 200 a 950	0,05	Alto	25, 100, 130	0,01
Níquel	6,38	0,0063 a 0,0066	— 150 a 300	»	Medio	100	0,50
Cobre	1,56	0,00425	— 200 a 120	»	Bajo	10	0,10

**Figura 2.12.** Características de las RTD  
**Fuente:** (Creus, 2011, pág. 229)

#### 2.1.4.1.2. Termistores

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado, por lo que presentan unas variaciones rápidas y extremadamente grandes para los cambios relativamente pequeños en la temperatura. Los termistores se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio y otros metales, y están encapsulados (Creus, 2011, pág. 236).

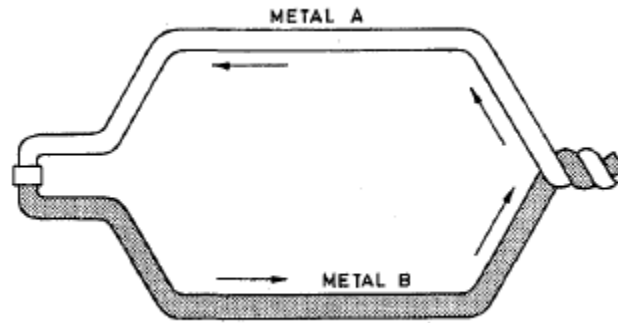


**Figura 2.13.** Curva característica de termistores  
**Fuente:** (Creus, 2011, pág. 236)

Los termistores son utilizados principalmente en aplicaciones de compensación de temperatura, control de temperatura y como medidores de temperatura diferencial, tienen la desventaja de no poseer una respuesta lineal (Maldonado & Piña Flores, 2009).

### 2.1.4.1.3. Termopares

El termopar se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821: La circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes tal como se muestra en la Figura. La circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados: el efecto Peltier: que provoca la liberación y absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión, y el efecto Thomson, que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperatura (Creus, 2011).



**Figura 2.14.** Esquema termopar  
**Fuente:** (Creus, 2011, pág. 238)

Es de aclarar que este tipo de instrumentos tiene un rango muy amplio de captación y depende básicamente del tipo de material utilizado en la fabricación.

Tipo	Intervalo de medida	Límites de error del termopar			Cable de extensión Límites de		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Temperatura	Error	
						Premium	Normal
Cromel-constantán tipo E	-40 a 800° C -40 a 900° C -200 a 40° C	$\pm 1,5^\circ \text{C o } \pm 0,4\%$	$\pm 2,5^\circ \text{C o } \pm 0,75\%$	$\pm 2,5^\circ \text{C o } \pm 1,5\%$	-60 a 200° C	-	$\pm 1,5^\circ \text{C o } \pm 2\%$
Cobre constantán tipo T	-40 a 350° C -40 a 350° C -200 a 40° C	$\pm 0,5^\circ \text{C o } \pm 0,4\%$	$\pm 1^\circ \text{C o } \pm 0,75\%$	$\pm 1^\circ \text{C o } \pm 1,5\%$	-60 a +95° C	$\pm 0,5^\circ \text{C o } \pm 0,5\%$	$\pm 1^\circ \text{C o } \pm 0,75\%$
Hierro constantán tipo J	-40 a 750° C -40 a 750° C -	$\pm 1,5^\circ \text{C o } \pm 0,4\%$	$\pm 2,5^\circ \text{C o } \pm 0,75\%$		0-200° C	$\pm 1^\circ \text{C o } \pm 0,75\%$	$\pm 2,5^\circ \text{C o } \pm 1,25\%$
Cromel-Alumel tipo K	-40° C a 1000° C -40° C a 1200° C -200 a 40° C	$\pm 1,5^\circ \text{C o } \pm 0,4\%$	$\pm 2,5^\circ \text{C o } \pm 0,75\%$	$\pm 2,5^\circ \text{C o } \pm 1,5\%$	0-200° C	$\pm 1^\circ \text{C o } \pm 0,75\%$	$\pm 2,5^\circ \text{C o } \pm 2,5\%$
Pt-Pt/Th 13 % (tipo R) Pt-Pt/Rh 10 % (tipo S)	0° C a 1600° C 0° C a 1600° C -	$\pm 1^\circ \text{C}$	$\pm 1,5^\circ \text{C o } \pm 0,25\%$		25 a 200° C	-	$\pm 5^\circ \text{C o } \pm 6\%$
Pt-Rh 6 %/Pt-Rh 30 % Tipo B	- 600° C a 1700° C 600° C a 1700° C		$\pm 1,5^\circ \text{C o } \pm 0,25\%$	$\pm 4^\circ \text{C o } \pm 0,5\%$	25 a 200° C	-	$\pm 5^\circ \text{C o } \pm 6\%$

**Figura 2.15.** Característica de los termopares (norma IEC)  
**Fuente:** (Creus, 2011, pág. 241)

### 2.1.4.2. Transmisor

El transmisor es un dispositivo que capta una señal del proceso y la convierte en una señal eléctrica, transmitiéndola a un elemento receptor registrador, indicador, controlador o la combinación de estos, para este caso se utiliza un transmisor de temperatura Siemens TH100 el cual convierte una señal de ohmios del sensor PT100 proporcional a la medición

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

en °C en una señal de 4 a 20 mA, además posee la facilidad para ensamblarse con el termoposo, esto permite que los elementos del sistema de control estén más compactos.



**Figura 2.16.** Trasmisor de temperatura TH100

Fuente: <http://w3.siemens.com>

### 2.1.5. Controlador

En la actualidad con el avance tecnológico, existen diferentes tipos de controladores y técnicas de control, que dependen esencialmente del tipo de aplicación. Pueden coincidir que para un mismo proceso existan múltiples controladores o en su defecto solo uno proporcione el resultado esperado, por lo anterior es de considerar de forma general la realización del controlador utilizando la técnica PID. Existen diferentes técnicas como la combinación del anterior P, PI, PD o técnicas inteligentes como: redes neuronales, control Fuzzy entre otros, pero para efectos prácticos solo se menciona la técnica a utilizar ya que las otras técnicas es posible que proporcionen resultados óptimos, pero su costo puede ser más elevado o quizás el control puede estar sobredimensionado para la aplicación esto hablando en términos de los controles inteligentes.

#### 2.1.5.1. Control PID

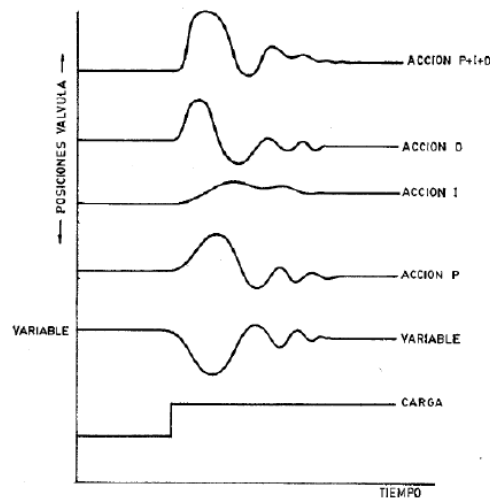
El método PID consiste en un módulo proporcional + integral + derivativo, donde se fija la ganancia o banda proporcional, se amplifica la desviación entre la variable y el punto de consigna, se fija el valor del punto de consigna y se selecciona la acción directa o la inversa del controlador, finalmente se fija la acción derivada (Maldonado & Piña Flores, 2009). Para ser más concretos:

- La acción proporcional cambia la posición del elemento final de control proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- La acción integral mueve el elemento final de control a una velocidad proporcional a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.
- La acción derivada corrige la posición del elemento final de control proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada (Maldonado & Piña Flores, 2009, pág. 13).

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el coste del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan. Sin embargo, económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar procesos y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser más barato adquirir un controlador PID para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso. No obstante, los instrumentos actuales de tipo modular admiten fácilmente la adición de una o más acciones. Los controladores digitales incorporan las tres acciones, de modo que la elección de las mismas es técnica, y no economía (Maldonado & Piña Flores, 2009, pág. 13).

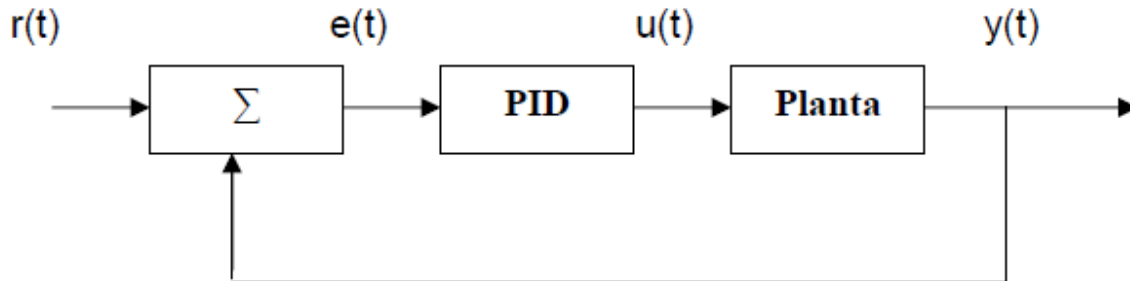


**Figura 2.17.** Trasmisor de temperatura TH100  
**Fuente:** (Creus, 2011)

La imagen anterior demuestra que la implementación y la diferencia de las técnicas de control, obedecen a criterios técnicos y no económicos, y realmente la diferencia entre uno u otro depende más del tipo de aplicación.

**Tabla 2.1** Aplicaciones del control PID y sus combinaciones

CONTROL	APLICACIÓN
Proporcional (P)	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es inconveniente
Proporcional + Integral (PI)	la mayor parte de aplicaciones incluyendo el caudal
Proporcional + Derivativa (PD)	cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral
Proporcional + Derivativa + Integral (PID)	procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperatura en intercambio de calor)



**Figura 2.18.** Esquema de control

**Fuente:** (Maldonado & Piña Flores, 2009, pág. 15)

El control proporcional – integral – derivativo (PID) actúa sobre la señal de error  $e(t)$ , la misma que constituye la diferencia entre la señal de referencia  $r(t)$  y la señal de salida de la planta  $y(t)$ . El control proporcional, simplemente multiplica la señal de error por la ganancia proporcional  $K_p$ ; el control integral multiplica la ganancia integral  $K_i$  por la integral del error y el control derivativo, genera una señal, la cual es proporcional a la derivada de la señal de error. Aquí se multiplica la derivada del error por la ganancia derivativa  $K_d$ . Estas constantes para este caso particular son calculadas por el equipo controlador (variador de velocidad Sinamic) que a continuación se describirá.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 2.1.5.2. Dispositivo controlador

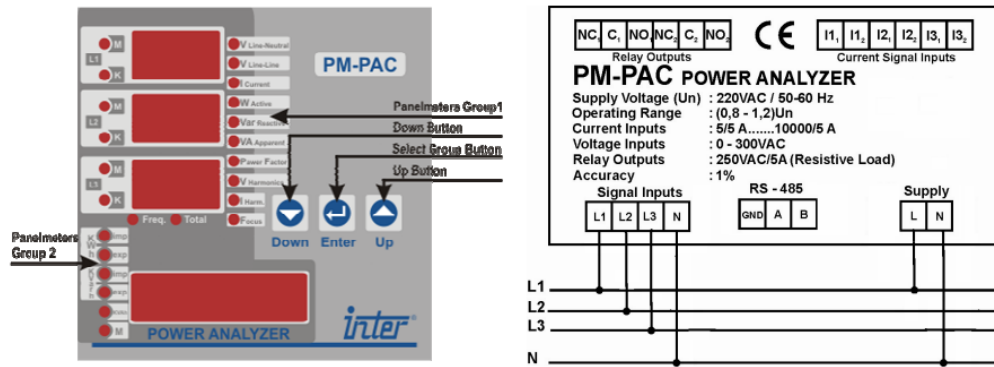
Los variadores son convertidores de energía encargados de modular la energía que recibe el motor (Perez Lorenzana , 2017). El dispositivo controlador es un variador de velocidad marca Siemens modelo SINAMICS G120, el cual está compuesto de un sistema modular de diferentes unidades funcionales. En esencia, éstas son: La CU (Unidad de Control) controla, el monitor (BOP) y el PM (Power Modul), funcionando en varios estados operativos. Dicha unidad soporta la comunicación con el control local así como con dispositivos de monitoreo. Posee comunicación Profibus, Ethernet y RS485, este puede configurarse como se mencionó anteriormente con el modulo local o puede ser configurado por el programa STARTER en modo online u offline. Es un variador muy versátil posee en su estructura un módulo de control PID útil para esta aplicación y fácil de usar, además posee la opción autotune el cual calcula las constantes de acuerdo al proceso. La unidad de control a utilizar es G120 CU240B-2, unidad de potencia es G120 PM240-2 IP20.



**Figura 2.19.** Variador de velocidad Siemens G120

Fuente: <https://goo.gl/Uk86WQ>

## 2.2. Equipo de medición



**Figura 2.20.** Características del analizador de red  
**Fuente:** (Hanel Elektronik, 2017)

Power Analyzer es un dispositivo ideal para medir y visualizar todos los parámetros eléctricos de un sistema. Gracias a sus cuatro filas de visualización, todos los parámetros Se puede leer fácilmente desde la pantalla principal. El dispositivo es aplicable para sistemas mono, dos y trifásicos. Puede medir y mostrar diferentes Parámetros. El dispositivo tiene tres transformadores de corriente secundarios internos de 5A. PM-PAC es un equipo que contiene comunicación vía RS 485 protocolo Modbus (compatible con software InterScada) (Hanel Elektronik, 2017).

Parameter	Total	L1	L2	L3
VLN	•	•	•	•
VLL	•	•	•	•
I	•	•	•	•
FRQ(Hz)	•	•	•	•
PF	•	•	•	•
KW	•	•	•	•
KVar	•	•	•	•
KVA	•	•	•	•
KWH(Import)	•			
KWH(Export)	•			
KVarH IND	•			
KVarH CAP	•			
KVAH	•			
VTHD		•	•	•
V3 ÷ V13		•	•	•
ITHD		•	•	•
I3 ÷ I13		•	•	•

**Figura 2.21.** Parámetros que mide el analizador de red  
**Fuente:** (Hanel Elektronik, 2017)

### 2.3. Teoría de ahorro de energía

La eficiencia o rendimiento de un motor eléctrico es una medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea, en potencia mecánica útil. No toda la energía eléctrica que un motor recibe, se convierte en energía mecánica. En el proceso de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Conversión, se presentan pérdidas, por lo que la eficiencia nunca será del 100%. Si las condiciones de operación de un motor son incorrectas o este tiene algún desperfecto, causando consecuentemente la disminución de la eficiencia (Perez Lorenzana , 2017), por otro lado, la aplicación actual corresponde al control del motor de un ventilador, donde El volumen de aire o caudal es directamente proporcional a la velocidad, el “control de velocidad” el cual ajusta el volumen de aire o caudal por un motor que este lo maneja un variador de frecuencia para variar la velocidad, la salida del motor será según la velocidad, así ahorrando energía eléctrica, Por lo tanto, controlando un motor estándar con la potencia del variador para variar la velocidad directamente, reducirá la salida del motor de acuerdo con la frecuencia, garantizando el ahorro de energía (Pincolini, 2017), para tal efecto se plantea el siguiente análisis para el cálculo de dicho ahorro.

- Calculo de potencia del motor

$$P = V * I * FP * \sqrt{3} \quad (1)$$

- Calculo del consumo de potencia diario

$$P_{diaria} = P * t_{horas} \quad (2)$$

- Calculo del costo de la potencia consumida

$$Costo_{diario} = P_{diaria} * \frac{\$}{Kwh} \quad (3)$$

- Calculo de relación de consumo de potencia no controlado y controlado

$$\% \text{ ahorro} = \frac{P_{antes} - P_{despues}}{P_{antes}} * 100 \quad (4)$$

$$ahorro_{mensual} = costo_{mensual}_{antes} - costo_{mensual}_{despues} \quad (5)$$

- Calculo de tiempo de retorno de inversión

$$Tiempo \text{ de recuperacion} = \frac{costo \text{ total de inversion}}{ahorro \text{ mensual}} \quad (6)$$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

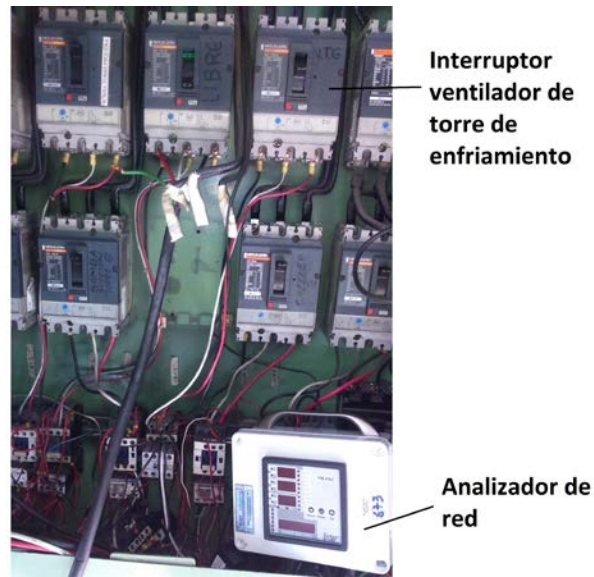
## 3. METODOLOGÍA

---

En esta sección se muestran los métodos y procedimientos realizados para cumplir cada uno de los objetivos propuestos. Iniciando con la identificación del proceso y una toma de datos de consumo de energía, seguidamente se realiza la estructuración del sistema de control y la selección de los elementos que lo conforman, posteriormente se realiza la puesta en marcha y se fijan las condiciones de operación para finalmente realizar una toma de datos que se compara con el diagnóstico, con el fin de verificar la operación del sistema de control y el ahorro de energía.

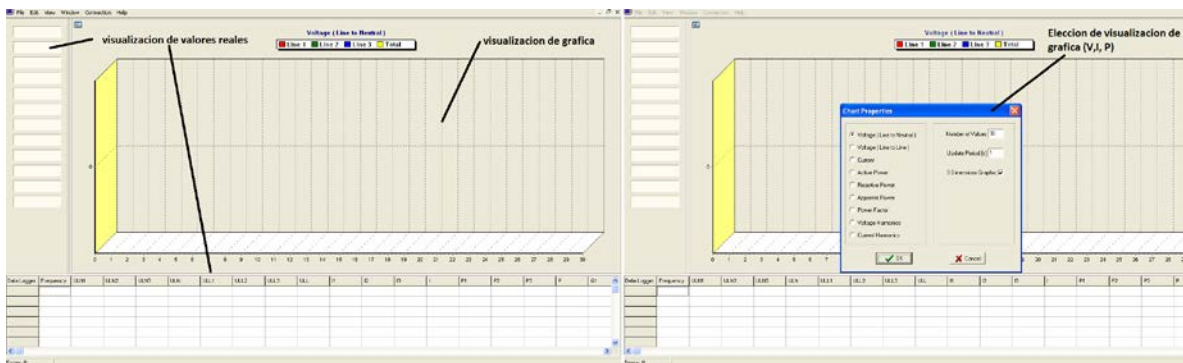
### 3.1. Diagnóstico

Con respecto al funcionamiento del proceso y al modelo que describe su funcionamiento, existen diferentes métodos por los cuales se puede determinar el comportamiento de la planta, modelos basados en formalismos matemáticos, experimentales o la combinación de ambos, no existe teoría alguna que indique en que caso se debe utilizar alguno de los dos o en su defecto la combinación; eso depende de la complejidad del proceso, por tal motivo para este trabajo no se plantea la identificación del proceso de ninguna manera, la decisión de la implementación de control se debe a la experiencia de ejecución de este tipo de controles, es de aclarar que existen componentes electrónicos que por su avance tecnológico realizan el cálculo de las variables que interviene en el controlador, con esta ventaja se cuenta en la ejecución de este proyecto debido al variador de velocidad que se va a utilizar, por esta razón no se toman datos de temperatura, solo se toman datos de energía (Potencia, Voltaje, Corriente entre otros), con la finalidad de demostrar el funcionamiento de la torre de enfriamiento independientemente del cambio de temperatura del sistema.



**Figura 3.1.** Equipo analizador de red conectado a entrada de motor, tablero de control y potencia  
**Fuente:** Autor

La medición se realiza con un analizador de tablero marca Inter, acondicionado para realizar la toma de datos, este equipo tiene la facilidad de almacenar los datos en un PC mediante el Software del equipo llamado InterScada, el cual puede exportarlo a un archivo de Excel, para su posterior manipulación.

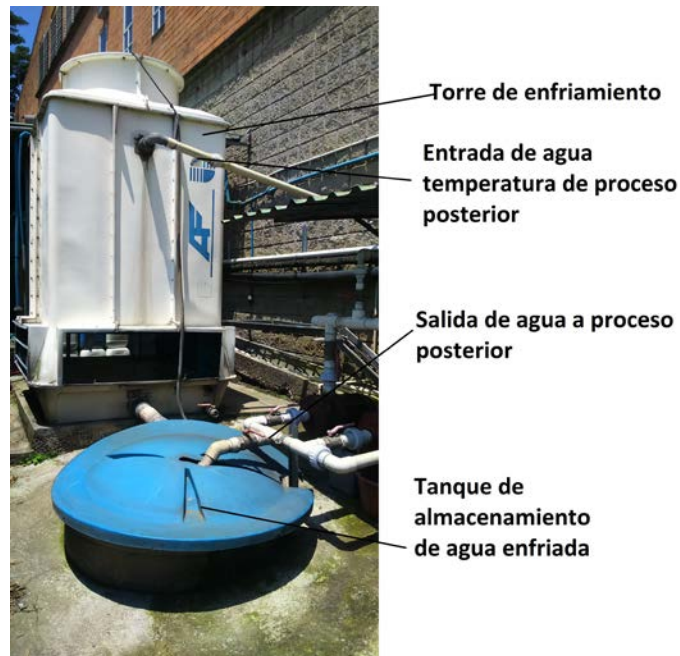


**Figura 3.2.** Plataforma Software InterScada  
**Fuente:** Autor

En un sistema o planta actúan diferentes tipos de variables las cuales son influyentes para determinar el comportamiento de la misma. Las variables más relevantes para el observador son las variables de salida, también existen variables que son manipuladas por uno llamadas variables de entrada. Por otro lado, tenemos las perturbaciones que pueden

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ser manejadas por el usuario (como una entrada) y perturbaciones externas al sistema, todas las variables como temperatura ambiente, Flujo de agua, flujo de aire, temperatura de entrada al proceso, temperatura de salida del proceso son las que nos describen el funcionamiento total de la planta, para este caso solo se tiene en cuenta la temperatura de salida de la torre de enfriamiento, puesto que es la variable más influyente ya que la finalidad del proceso es entregar agua fría a 21°C aproximadamente, controlando el sistema que genera el flujo de aire para el intercambio de calor; sin dejar pasar por alto que en el municipio de la estrella en las horas de la noche, madrugada y tiempos fríos la temperatura puede estar en unos 16 o 17 °C. Por la relación de flujo del ventilador y la capacidad de la torre no es necesario que permanezca en funcionamiento máximo; esta es la razón por la cual el análisis de implementación del sistema de control es viable controlando la variable antes mencionada.



**Figura 3.3.** Sistema torre de enfriamiento Plastinovo S.A.S

**Fuente:** Autor

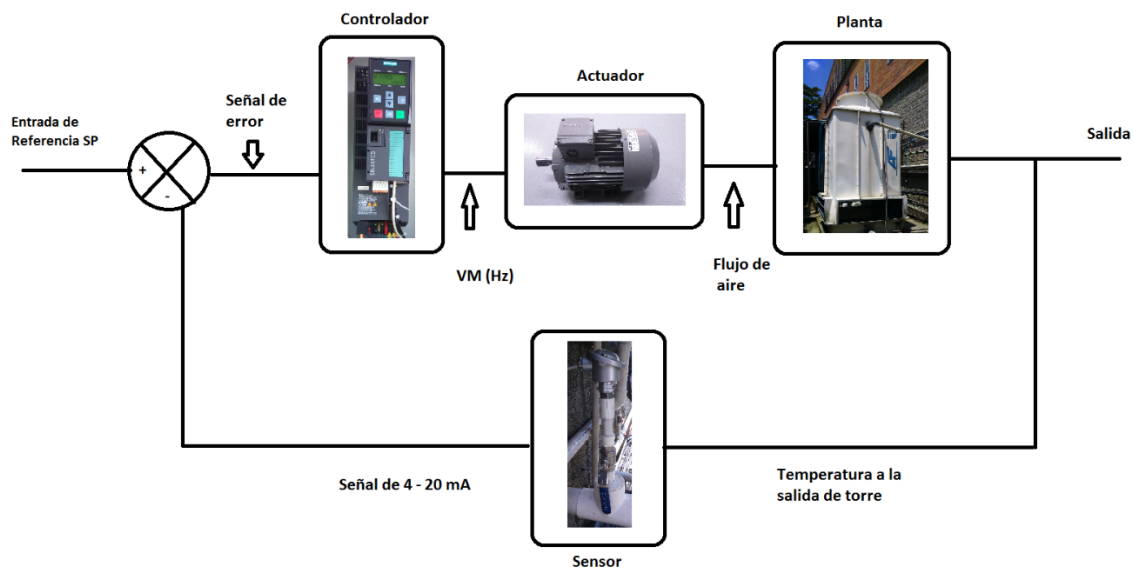
### **3.2. Sistema de control**

Como se menciona en el diagnostico el sistema de control está dado por la variable controlada que es la temperatura, el ventilador que se comprende del motor y las aspas. El punto de partida es lo mencionado anteriormente, ya que teniendo en cuenta la estructura de un sistema de control se deben identificar cada una de sus partes para eso se debe tener en cuenta lo siguiente:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Variable controlada temperatura, elección de sensor según capacidad de medida, estabilidad, tipo de señal.
- Tipo de señal a controlar. Motor de ventilador accionado por energía eléctrica.
- Elemento controlador y técnica a utilizar.
- Rango de trabajo: temperatura ideal, relación de eficiencia de ventilador.

Teniendo en cuenta los ítems anteriores, según la aplicación el sistema de control se realiza en lazo cerrado ya que debe existir una realimentación constante de la medida de temperatura para tal efecto se plantea lo siguiente:



**Figura 3.4.** Sistema de control automático ventilador torre de enfriamiento

**Fuente:** Autor

A continuación se analizan cada uno de los elementos y se expone la elección para el sistema de control. Claro está que para el ventilador no es necesario entrar en detalle ya que en el capítulo 2 se habla de esto (véase 2.1.3), además este elemento es propio de la planta, pero si es necesario mencionar que se debe tener en cuenta el rango de operación, debido a que por la curva característica del ventilador, en frecuencias menores a 30 Hz, ya es ineficiente, generando en cierta medida un consumo innecesario en el sistema.

#### Sensor

El transductor de temperatura que se utiliza es la PT100, su rango de temperatura es entre -200 y 950 °C, entrega una salida proporcional a la medición, la cual está dado en ohmios ( $0\text{ °C} - 100\Omega$ ) y la relación de  $0.00385\Omega \cdot \text{°C}$ . El sensor se elige debido a que cubre el rango de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

temperatura que se necesita, adicional a esto posee alta sensibilidad, relación de respuesta lineal, rapidez en su respuesta y estabilidad durante la vida útil del material. El sensor tiene características que quizás en este tipo de aplicaciones no son tan importantes como lo puede ser la sensibilidad y la rapidez de respuesta, pero existe una razón más por la cual este sensor fue elegido y es la utilización del transmisor, debido a que este debe ser específico para cada instrumento de medida, depende de la naturaleza de la señal que entregue; este equipo convierte la señal de temperatura que se entrega en ohmios a una señal análoga en corriente de 4 – 20 mA y se acondiciona para que trabaje en un rango de 0 a 100°C, en otras palabras la interpretación de lo anterior es que a 0°C la respuesta de la señal es de 4mA y a 100 °C es 20mA, es de gran importancia conocer esta respuesta, para la interpretación en el controlador. Se prefiere trabajar con una señal en corriente debido a la fidelidad y sensibilidad de la misma.



**Figura 3.5.** Sensor PT100 + Transmisor Siemens TH100

**Fuente:** Autor

#### *Controlador y elemento final de control*

El elemento final de control y el controlador es un mismo dispositivo, pues este tiene la capacidad de leer consignas, comparar y modificarlas, además posee la etapa de potencia y a su vez la variación de VM (Hz), por otro lado posee la capacidad de configuración de diferentes técnicas de control como: On /Of, PID y sus diferentes configuraciones, proporcional a una señal análoga, secuencias según diferentes dispositivos de control, entre otros. Este dispositivo es un variador de velocidad marca Siemens de la gama Sinamic G120, con el cual se pretende variar la velocidad del ventilador variando su frecuencia. La elección de este tipo de variador se debe por la versatilidad para generar sus funciones, por el amplio rango de trabajo, por facilidad de manejo y la posibilidad de no limitarse en la aplicación;



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

esto hace que la relación costo – beneficio sea proporcional y a su vez que la manipulación sea más dinámica, este equipo posee la opción de configurarse de manera manual o mediante un programa llamado STARTER especial para este tipo de dispositivos, donde la configuración y programación del mismo se realiza desde la PC.



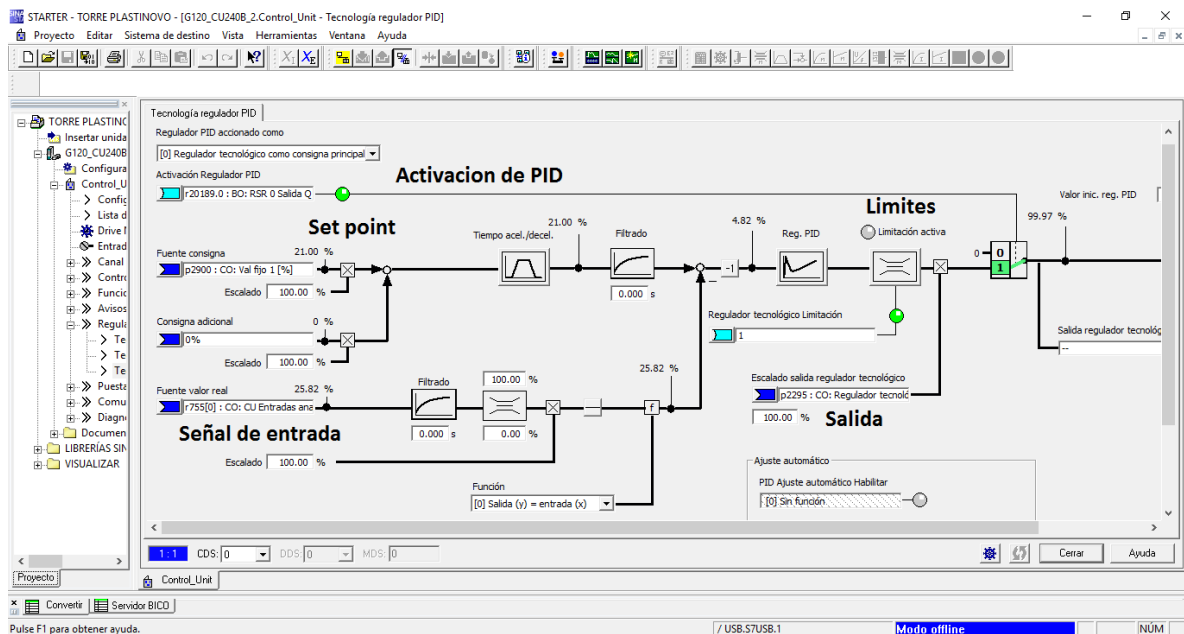
**Figura 3.6.** Gabinete de control variador de velocidad

**Fuente:** Autor

Con relación a la técnica de control utilizada, esta se realiza mediante un control PID, para el cual se necesita identificación de la planta, pero como se mencionó al inicio del capítulo, no siempre es necesario puesto que el dispositivo controlador posee la capacidad de calcular las constantes utilizadas para obtener el mejor desempeño en la técnica utilizada, la manera de corroborar dicho desempeño es haciéndole seguimiento al control, someterlo a escalones y ver cómo se comporta y por ultimo ajustarlo a la necesidad de la aplicación según la experiencia. La forma de actuar del auto-tune de este equipo funciona de la siguiente manera, cuando el equipo inicia la auto-sintonización compara el error y de acuerdo a esto él toma la decisión de encender o no la variable controlada, en su defecto VC debe estar por debajo del SP, cuando esto sucede el controlador genera una salida al 100% hasta que la lectura de la VC sea igual al SP en ese momento, la salida de apaga 0% y el controlador registra hasta que valor máximo llego, con esto se puede determinar la inercia del sistema, seguidamente deja a que baje la VC hasta el valor mínimo acotado y

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

vuelve a encender con estos datos el controlador posee la capacidad de determinar el comportamiento de la planta. Estos pasos se pueden repetir 2 o 3 veces según criterio del programador del controlador, la respuesta puede ser más precisa pero el tiempo de configuración del PID es mucho mayor. después de obtener dichos valores se procede a ajustar si es necesario teniendo en cuenta que la variable proporcional (P) es la ganancia y generalmente error en estado estacionario (Off-set), la variable integral (I) es una salida proporcional al error acumulado, permite eliminar el error en estado estacionario, generalmente es lenta, la variable derivativa (D) es la acción que hace más rápida la acción de control, aunque posee la desventaja de amplificar las señales de ruido y saturar el actuador.



**Figura 3.7.** Software de configuración Starter (página PID)

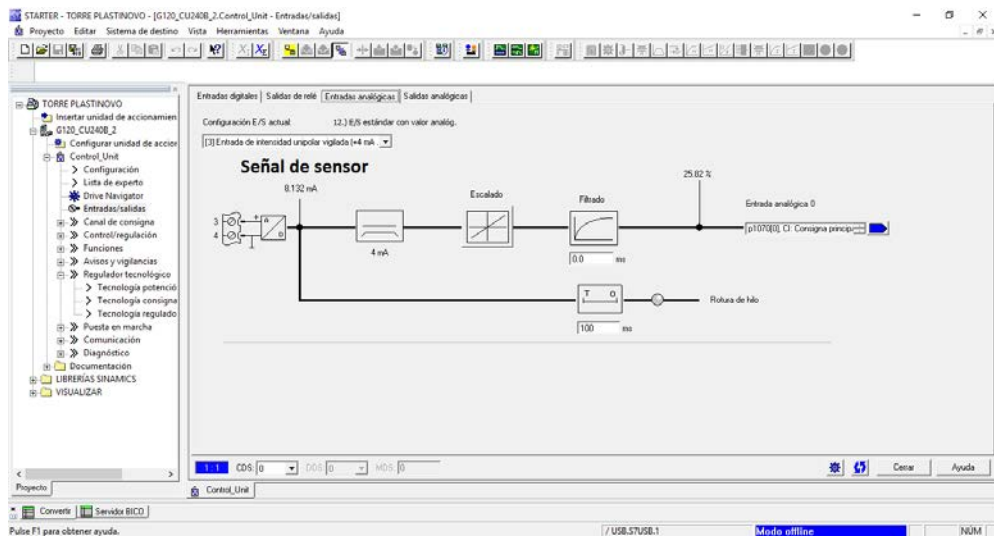
**Fuente:** Autor

La elección de la técnica de control más adecuada se debe principalmente a la capacidad del equipo para generar las variables del controlador, además estudios de control demuestran que para este tipo de controles de temperatura, la técnica PID responde de manera apropiada, por otro lado la implementación de sistemas de control inteligentes no resulta útil debido a que la complejidad del proceso es baja y las variables que interviene en el proceso son pocas, es de aclarar que la implementación de este tipo de controles aumenta el costo de inversión.

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3.3. Puesta en operación

Después de la parametrización y definición de los elementos de control, se instala en campo y se verifican las condiciones de operación suministro de energía eléctrica, SP, señal sensor de temperatura, rango de trabajo de motor de ventilador en Hz y variables del control PID. Se tiene la ventaja de conexión Online del PC y el variador de velocidad, por el cual se visualiza en tiempo real la señal correspondiente a temperatura y a su vez la salida generada al motor, por otro lado se pueden modificar el parámetro del SP para generar escalones en el proceso y observar la respuesta del sistema de control y así ajustar según las condiciones de operación.



**Figura 3.8.** Visualización y configuración de señal de sensor (comprobación según condiciones de operación)

**Fuente:** Autor

### 3.4. Toma de datos final

Finalmente y después del ajuste necesario del sistema de control, se toman datos del consumo energético, con el fin de comparar y analizar el ahorro energético y la rentabilidad del proceso, calculando el retorno de inversión y comprobado las condiciones de operación. Se aclara que la toma de datos se realiza con el mismo equipo utilizado en la etapa de diagnóstico (véase 3.1), esto proporciona fidelidad en la comparación, ya que la referencia de medida es la misma.



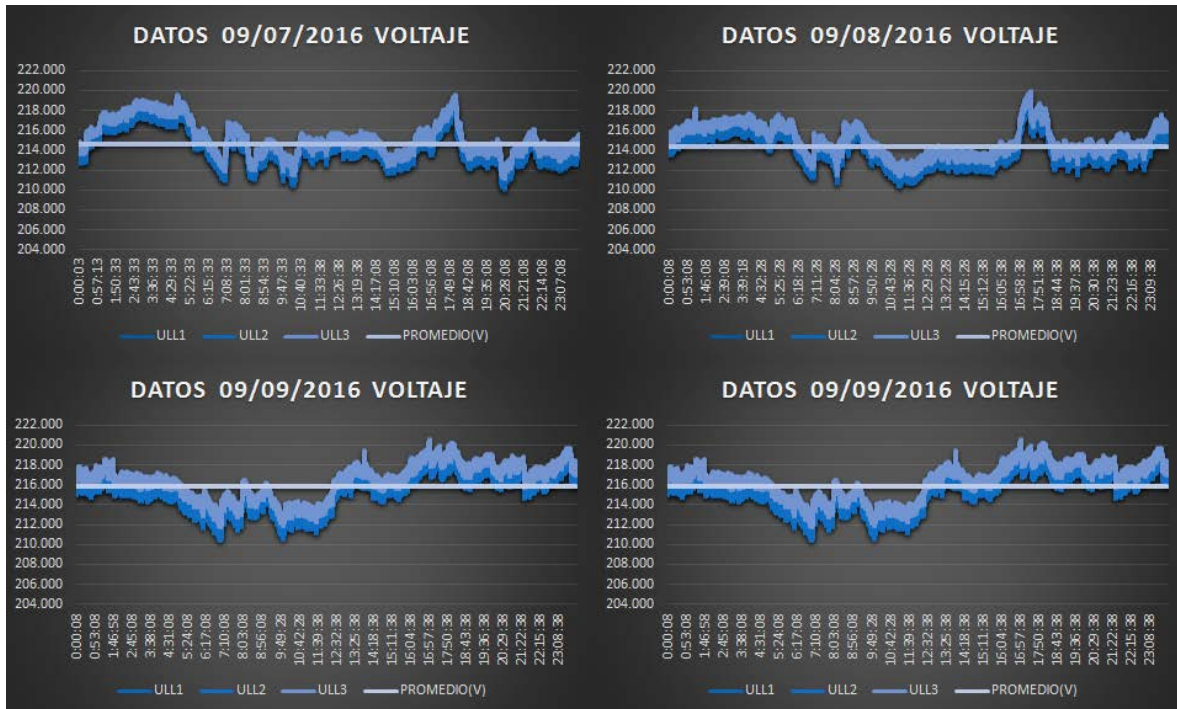
**Figura 3.9.** Conexión de analizador de red (toma de datos final)

**Fuente:** Autor

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Análisis diagnóstico inicial

Los datos captados en el diagnóstico antes de la implementación del control, corresponde al voltaje, corriente y potencia, los cuales están plasmados en los apéndices. Estos se analizan con el fin de determinar el consumo de energía. Los datos son tomados durante 4 días, con un periodo de muestreo de 5 s; teniendo en cuenta lo anterior y para mejor análisis por la gran cantidad de datos, se visualizan en los siguientes gráficos:



**Figura 4.1.** Graficas de voltaje

Fuente: Autor

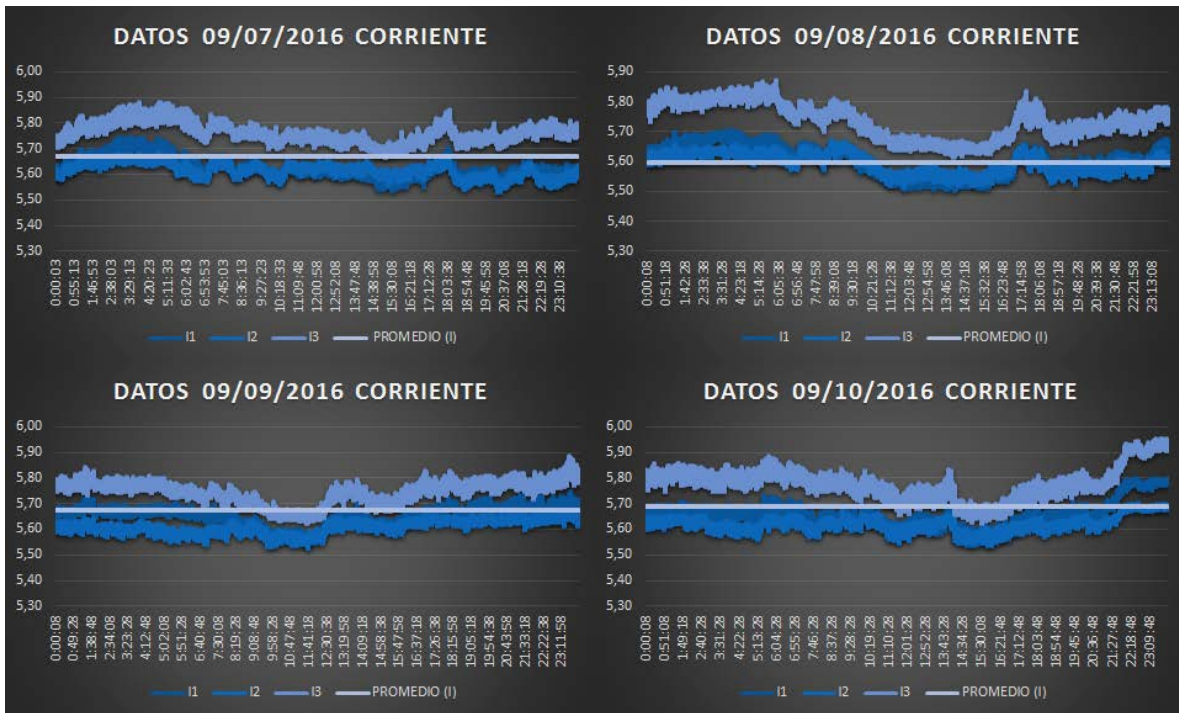


Figura 4.2. Graficas de corriente

Fuente: Autor

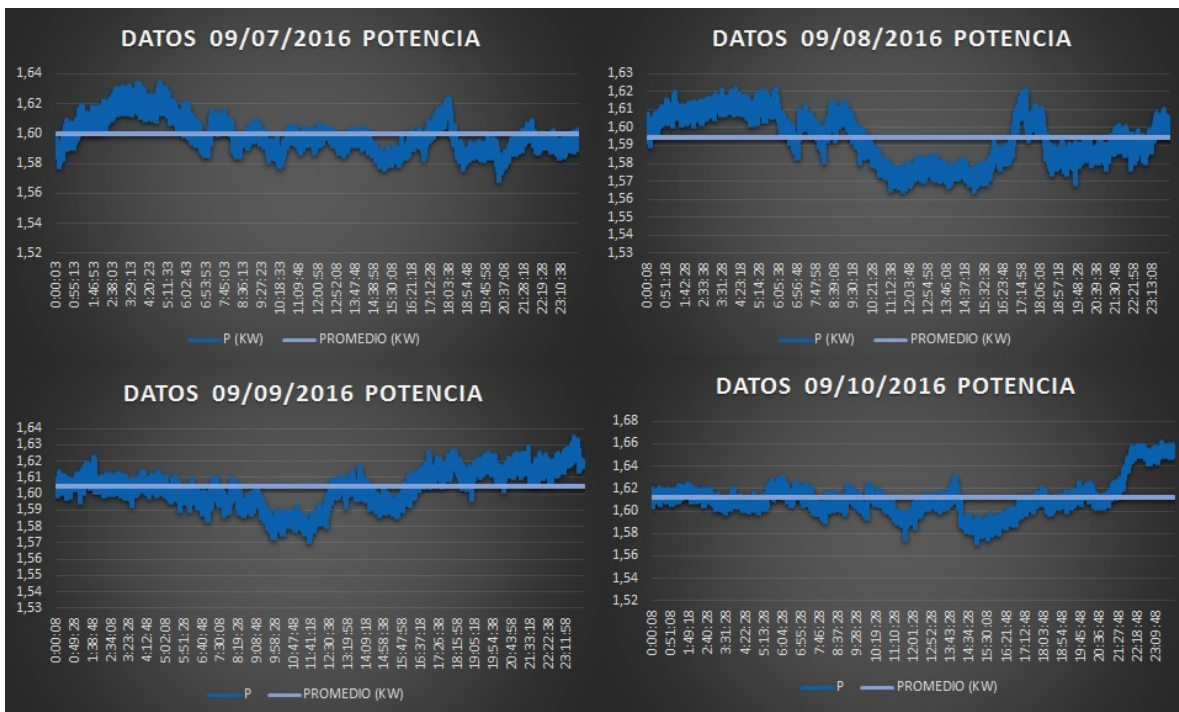


Figura 4.3 Graficas de Potencia

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Fuente:** Autor

Teniendo en cuenta los gráficos anteriores se trabaja con valores promedios, ya que la cantidad de datos analizar son aproximadamente 8000 por componente medido en cada día, lo que hace que el cálculo sea más complejo, por tanto se obtiene:

**Tabla 4.1.** Datos promedio del comportamiento de voltaje, corriente y potencia

FECHA	PROMEDIO (V)	PROMEDIO (I)	PROMEDIO (KW)
09/07/2016	214,64	5,67	1,60
09/08/2016	214,39	5,60	1,59
09/09/2016	215,78	5,67	1,60
23/12/2486	216,35	5,69	1,61
<b>PROMEDIO</b>	<b>215,29</b>	<b>5,66</b>	<b>1,60</b>

Validando la veracidad de los datos se analiza la diferencia que existe entre estos, por tanto se toman los datos mayores y menores de cada día, con el fin de observar la variación y lo desfasados que pueden estar, pero se encuentra que no existe una discrepancia en los datos mayor al 5%, por lo cual se demuestra que los datos promedios pueden utilizarse de manera confiable para posteriores análisis.

**Tabla 4.2.** Datos máximos y mínimos de voltaje, corriente y potencia

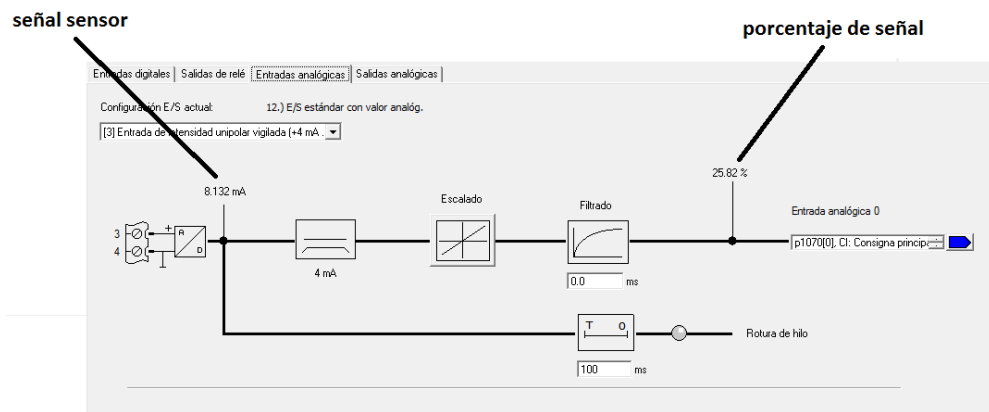
FECHA	MAX (I)	MIN (I)	MAX (V)	MIN (V)	MAX (P)	MIN (P)
09/07/2016	5,88	5,53	219,6	210,2	1,63	1,57
09/08/2016	5,87	5,5	219,9	210,5	1,62	1,56
09/09/2016	5,89	5,53	220,5	210,4	1,63	1,57
23/12/2486	5,96	5,54	222,4	210,9	1,66	1,57

Teniendo en cuenta lo anterior, se observa que los datos siguen un patrón de comportamiento y la diferencia de medida es mínima, esto es suficiente para tomar la decisión de solo obtener datos de 4 días, ya que para medidas posteriores, posiblemente no proporcionan información importante que cambie el concepto de funcionamiento, de esta manera se determina que el motor trabaja independiente de la carga, siempre trabaja al 100% de capacidad, esto se visualiza en comparación de la potencia consumida real (1.57 KW) y la potencia de placa (1.5 KW) y a su vez en el comportamiento de las gráficas.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4.2. Comportamiento del sistema de control

El plano eléctrico del sistema es sencillo, pero es de suma importancia puesto que la configuración del control está asociada a pines físicos como: Start / Stop, lectura de señal de sensor, alimentación y salida a motor. La conexión realizada acorde a este fue exitosa ya que en la verificación de señales el sistema respondió acorde al él, puesto que la señal de 4-2 mA visualizada en pantalla en modo online del variador y la PC, respondía a las variaciones del sistema de igual forma el variador respondía a las diferencias de frecuencia.

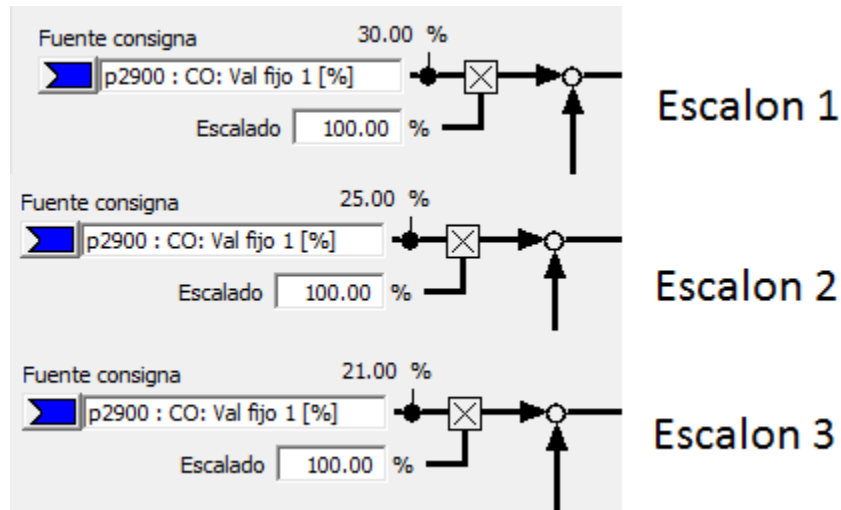


**Figura 4.4.** Visualización de señal de sensor

**Fuente:** Autor

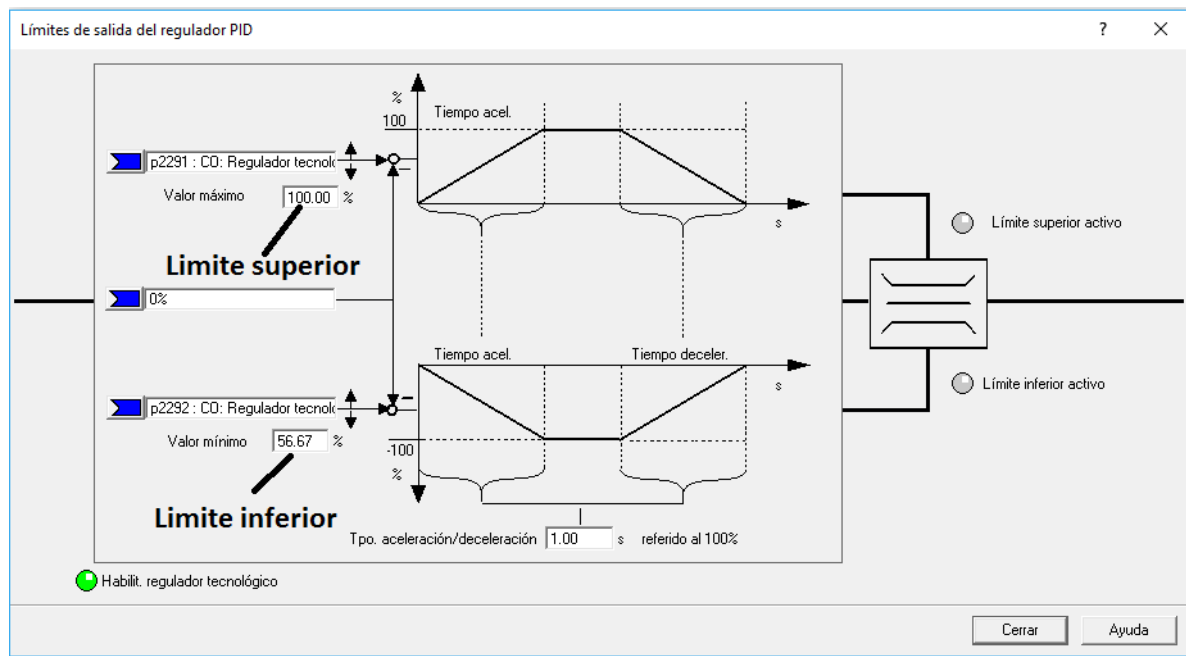
Con relación a los resultados obtenidos después de la verificación de la conexión y funcionamiento de los diferentes dispositivos del sistema de control, se pone en marcha el sistema con los parámetros de control PID, calculados por el mismo equipo (variador de velocidad) y se somete a escalones teniendo en cuenta el valor de la VC actual, por lo tanto se generaron pruebas en las cuales se observó el comportamiento del sistema cuando se generaba un cambio en SP por encima y por debajo de la VC, obteniendo como resultado la respuesta adecuada del control en un tiempo de respuesta óptimo para el mismo, por otro lado se toma medición de corriente con el fin de verificar la variación del mismo, la compensación del sistema y corroborar si la frecuencia límite de funcionamiento es la adecuada.





**Figura 4.5.** Variación de Set point  
Fuente: Autor

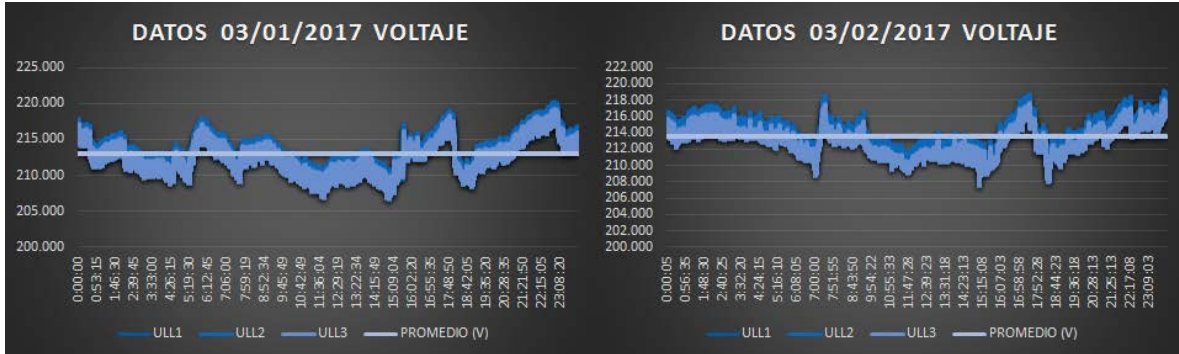
Con respecto al límite inferior de frecuencia, se realiza un ajuste debido a que se visualiza un variación de corrientes en las líneas, donde el sistema intenta mantener la relación de potencia y torque, esto se evidencia para este sistema en frecuencias menores a 34 Hz, por lo que fue necesario ajustarlo para trabajar como frecuencias limites 30 (56.67%) – 60(100%) Hz.



**Figura 4.6.** Límites de variable manipulada  
Fuente: Autor

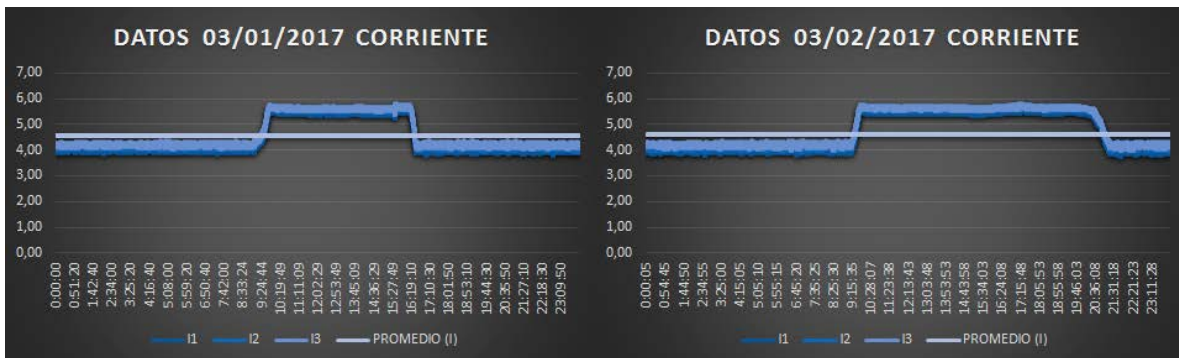
### 4.3. Análisis toma de datos final

Para el análisis final se realiza la misma medición que en el diagnóstico, con la diferencia del sistema de control ya ensamblado, para esto se obtuvieron los siguientes resultados:



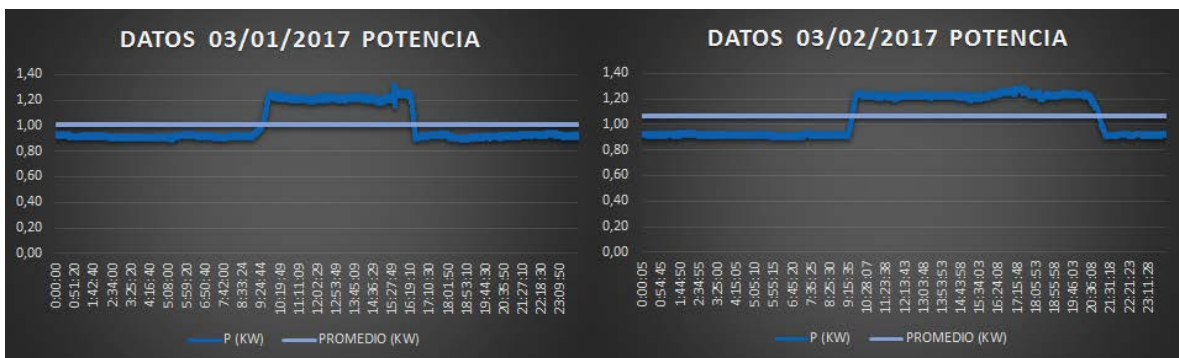
**Figura 4.7.** Grafica de voltaje con sistema de control operando

Fuente: Autor



**Figura 4.8.** Grafica de corriente con sistema de control operando

Fuente: Autor



**Figura 4.9.** Grafica de potencia con sistema de control operando

Fuente: Autor

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Teniendo en cuenta lo anterior, solo se utilizan dos días de medición, ya que el comportamiento del sistema muestra un patrón bastante definido, que a su vez permite observar la conducta del sistema de control, validando lo mencionado anteriormente con relación a las variable del PID y a la influencia que posee la temperatura ambiente en el proceso; se puede determinar el funcionamiento como dependencia de dicha variable, por otro lado se evidencia claramente una disminución del consumo de energía, generando ahorro en el proceso.

**Tabla 4.3.** Datos promedio del comportamiento de voltaje, corriente y potencia con sistema de control operando

FECHA	PROMEDIO (V)	PROMEDIO (I)	PROMEDIO (KW)
03/01/2017	212,94	4,55	1,01
03/02/2017	213,59	4,61	1,07
<b>PROMEDIO</b>	213,26	4,58	1,04

**Tabla 4.4.** Datos máximos y mínimos de voltaje, corriente y potencia con sistema de control operando

FECHA	MAX (I)	MIN (I)	MAX (V)	MIN (V)	MAX (P)	MIN (P)
03/01/2017	5,8	3,84	220,3	206,8	1,31	0,9
03/02/2017	5,8	3,81	219,2	207,6	1,29	0,9

Como se había mencionado anteriormente, por la gran cantidad de datos se analizan los valores extremos para revisar la variación del sistema, además con esto se valida que tan confiable es realizar cálculos utilizando los valores promedios, obteniendo de esto una respuesta positiva ya que no existe diferencia mayor al 2% entre los valores medidos en cada día, por lo que se eligen estos datos para el análisis de ahorro energético.

#### **4.4. Ahorro energético**

Con el fin de analizar el ahorro de energía del sistema implementado, se procede a comparar los valores obtenidos en el diagnóstico inicial y final, esto a su vez nos proporciona información para el cálculo del retorno de inversión.

##### **4.4.1. Análisis antes del control**

En este ítem se analiza el consumo del motor en relación a la potencia, el tiempo de operación y el costo de KW/h, se debe aclarar que para efectos de cálculo no se utiliza el factor de potencia del motor ya que el equipo analizador de red, posee la capacidad de entregarme el valor de potencia con este incluido. Tomando los valores de la tabla 4.1 se obtiene lo siguiente:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se debe tener en cuenta que la planta trabaja 24 horas y 7 días a la semana, por tanto:

$$P_{diaria} = 1.6 \text{ Kw} * 24 \text{ h}$$

$$P_{diaria} = 38.4 \text{ Kwh}$$

Para el cálculo de consumo en relación al costo se debe tener en cuenta que para lo que va del año 2017 el promedio del valor del Kwh es de \$325.

$$Costo_{diario} = P_{diaria} * \$ /Kwh$$

$$Costo_{diario} = 38.4 \text{ Kwh} * \$ 325 /Kwh$$

$$Costo_{diario} = \$12.480$$

$$Costo_{mensual} = \$12.480 * 30 \text{ dias}$$

$$Costo_{mensual} = \$374.400$$

#### 4.4.2. Análisis después del control

En este ítem se analiza el consumo del sistema con el control ya implementado, se utiliza la misma metodología que en ítem anterior, con la diferencia que los datos son tomados de la tabla 4.3.

$$P_{diaria} = 1.04 \text{ Kw} * 24 \text{ h}$$

$$P_{diaria} = 24.96 \text{ Kwh}$$

$$Costo_{diario} = 24.96 \text{ Kwh} * \$ 325 /Kwh$$

$$Costo_{diario} = \$8.112$$

$$Costo_{mensual} = \$8.112 * 30 \text{ dias}$$

$$Costo_{mensual} = \$243.360$$

$$\% \text{ ahorro} = \frac{374.400 - 243.360}{374.400} * 100$$

$$\% \text{ ahorro} = 35$$

#### 4.4.3. Retorno de inversión

Para el análisis del tiempo de recuperación de la inversión se tiene en cuenta que la inversión total del proceso fue \$1'621375 (variador de velocidad + sensor) + \$400.000 (tablero de distribución eléctrico), de acuerdo a esto se tiene lo siguiente:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$ahorro_{mensual} = \$374.400 - \$243.360$$

$$ahorro_{mensual} = \$131.040$$

$$Tiempo\ de\ recuperacion = \frac{\$2'021.375}{\$131.040}$$

$$Tiempo\ de\ recuperacion = 15.4\ meses \approx 16\ meses$$

Se espera que el tiempo de recuperación de la inversión sea de 16 meses aproximadamente, generando luego utilidades para la empresa.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 5.1. Conclusiones

Se logra la implementación del control mediante la estrategia propuesta, obteniendo resultados óptimos en su comportamiento el cual se evidencia en la comparación de los datos tomados en el diagnóstico y los datos finales, además se obtiene un ahorro del 35%, retornando la inversión en un tiempo no mayor a 16 meses, lo cual genera rentabilidad para la empresa.

El control de la torre de enfriamiento se puede realizar utilizando como variable controlada: flujo de aire, temperatura de entrada al proceso, temperatura de salida. Para este caso particular se utiliza como variable controlada la temperatura de salida del proceso, ya que para tareas posteriores se necesita una temperatura específica, la cual abarca todo el proceso (torre de enfriamiento) como tal, es decir la carga del sistema es asumida por esta variable, debido a que las variables antes mencionadas actúan de forma indirecta en esta, por tal motivo a la temperatura de salida no le interesa de cierto modo la cantidad de máquinas que estén trabajando, esto lo asume por la particularidad del sistema, es decir la variable elegida para realizar el control fue la más adecuada, puesto que es la variable global, esto se evidencia en el comportamiento de la gráficas de toma final.

La elección del sistema de control y los elementos que lo componen, dependen básicamente del tipo de aplicación, para este caso la utilización del sensor con una señal de 4-20mA proporciona un respuesta muy estable, lo que no se puede decir de un sensor con una salida en voltaje, se evidencia claramente en las gráficas fluctuaciones en la red lo que afectaría la medición, por otro lado la utilización de sistemas de alta tecnología como lo es el variador de velocidad Sinamic, proporciona versatilidad para realizar el trabajo, además minimizan el tiempo de configuración, calculo y puesta en marcha proporcionando resultados óptimos, por otro lado con el cálculo de las constantes del control el dispositivos fue acertado, la respuesta del sistema fue satisfactoria, y responde a las condiciones de operación, esto es una herramienta útil en la medida que la aplicación sea difícil de identificar.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5.2. Recomendaciones

Con relación al comportamiento del sistema de control se deduce que es óptimo para esta aplicación, pero es importante realizar seguimiento a la respuesta del sistema, debido a que los límites de velocidad (Hz) fueron ajustados de manera experimental. Partiendo de esto se puede llegar a obtener valores más preciso y quizás más ahorro de energía solo encontrando la relación del valor mínimo de operación obteniendo un eficiencia aceptable, logrando que el sistema trabaje en su punto de operación, además evaluar la posibilidad de apagar el motor cuando las condiciones del sistema lo amerite, posiblemente con la evaluación del comportamiento del sistema, se evidencia lo anterior, teniendo en cuenta que el sistema depende de la temperatura ambiente y en el municipio de la estrella en horas de la noche y madrugada se puede llegar a 16 -17°C aproximadamente, suficiente para que el sistema trabaje de manera óptima.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

---

- Bolton, W. (2001). *Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. Mexico: Alfaomega.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación industrial*. Mexico: Alfaomega.
- González, M. J. (10 de 01 de 2017). <http://iesdionisioaguado.org>. Obtenido de <http://iesdionisioaguado.org/joomla/images/tecnologias/tecnoin2bach/sisautoma.pdf>
- Hanel Elektronik. (15 de 01 de 2017). *PM-PA/PM-PAC Power analyzer*. Obtenido de [http://www.hanel.com.tr/dosya/ENG\\_Pdf/EN2/PM-PA-C.pdf](http://www.hanel.com.tr/dosya/ENG_Pdf/EN2/PM-PA-C.pdf)
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de Control Automático*. Naucalpan de Juárez, Mexico: Prentice Hall.
- Ma, Y., Borelli, F., Henecey, B., Coffey, B., Bengoa, S., & Haves, P. (2012). Model Predictive Control for the Operation of Building Cooling Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 20, NO. 3*, 796-803.
- Maldonado, R., & Piña Flores, F. G. (2009). *Diseño y construcción de un módulo didáctico*. Quito, Ecuador.
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Naucalpan de Juárez, Mexico: Prentice Hall.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Naucalpan de Juárez, Mexico: Prentice - Hall.
- Perez Lorenzana , M. A. (15 de 01 de 2017). El ahorro de energía con un variador de frecuencia y las diferentes aplicaciones, en la industria con equipo Mitsubishi. Guatemala.
- Pincolini, E. (2017). *Recomendaciones para el Ahorro de Energía en Motores Eléctricos*. Argentina: Ciet consultora.
- Singla, R. K., & Das, R. (2016). Retrieval of Controlling Parameter in Induced Draft Cooling Tower Using Inverse Method. *2nd International Conference on Control Science and Systems Engineering* (págs. 223-226). India: IEEE.
- Smith, C. (s.f.). *Capítulo1, Conceptos generales*.

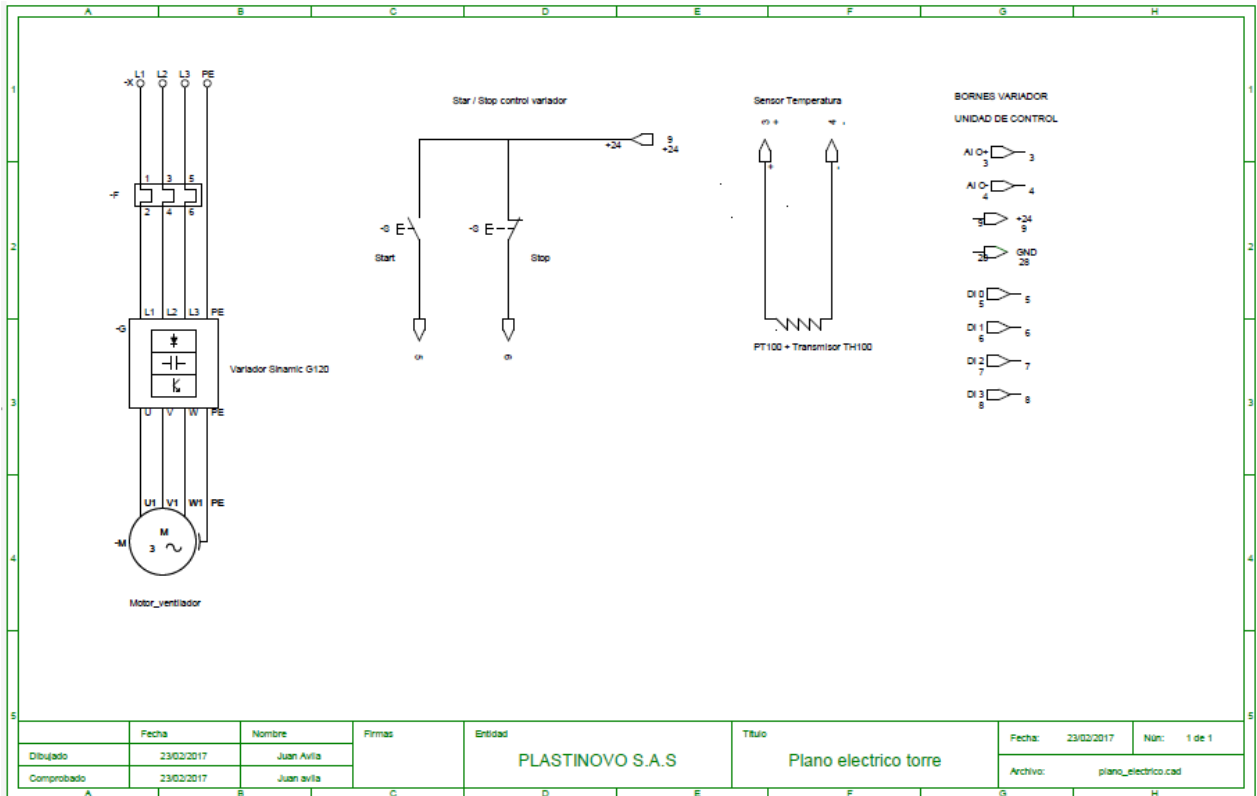


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Xiao, L., Yaoyu, L., Seem, J. E., & Pengfei, L. (2012). Extremum Seeking Control of Cooling Tower for Self-optimizing Efficient Operation of Chilled Water Systems. *American Control Conference* (págs. 3396-3401). Montréal, Canada: IEEE.

# APÉNDICE

## A. Plano eléctrico



 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## B. Cotización sensor + transmisor



CARRERA 808 No. 34A - 14 Medellín Tel (57 4) 4444630  
 NIT 900260723-6 I.V.A RÉGIMEN COMÚN

### COTIZACIÓN

Nº	956	FECHA	31/ 01/ 2017
----	-----	-------	--------------

**SIEMENS**  
 Distribuidor Autorizado

<b>Señor (es):</b>	Plastinovo S.A.S.	<b>Teléfono:</b>	(4) 3792020
<b>Sr (a):</b>	Elkin Alonso Loaliza L.	<b>Cargo:</b>	Mantenimiento
<b>Dirección:</b>	Carrera 55 No 79 C Sur 02	<b>Ciudad:</b>	La Estrella
<b>Asunto:</b>			

Estimado Señor,  
 Atendiendo a su amable solicitud, estamos presentando a usted nuestra mejor propuesta, en caso de requerir información adicional, no dude en comunicarse con nosotros.

CODIGO	T. ENTREGA	DESCRIPCIÓN	CANT.	Valor Unitario	Total
100018944+S 5	2-3 Días	Transmisor de Temperatura TH100 + Sensor 6cm / 7NG3211-0NND0(S)	1	393.375	393.375

**Observación:** Los precios dados no incluyen IVA. **SUBTOTAL** 393.375

<b>Fecha entrega:</b>	Ver Columna T. Entrega	<b>Validez:</b>	30 Días
<b>Forma de pago:</b>	Credito	<b>Asesor:</b>	ALEJANDRO GIRALDO BARRERA
<b>Garantía:</b>	1 Año por defectos de Fabricación.	<b>Teléfono:</b>	4444630 Ext. 1105
<b>Correo:</b>	yvargas@sumecon.com	<b>Celular:</b>	318-6532328

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### C. Cotización variador de velocidad



COTIZACIÓN	FECHA
NP 464-20	24/06/2016

**SIEMENS**  
Distribuidor Autorizado

SEÑOR (ES): Plastinero S.A.S.		TELEFONO: 3792020				
Sr (a): Elin Alonso Lasaica		CARGO: Jefe Mantenimiento				
DIRECCION: Carrera 55 Nº 79 C Sur - 02		CIUDAD: La Estrella				
ASUNTO: Maniobra y Automatización - Siemens						
Estimado señor, Atendiendo a su amable solicitud, estamos presentando a usted nuestra mejor propuesta, en caso de requerir información adicional, no dude en comunicarse con nosotros. <b>Nota: En caso de que se realice la compra favor enviar DROSH DE COMPRA.</b>						
Item	Código	T. Entrega	Descripción	Cant.	Precio U.	Total
1	100325156	2-3 Días	Módulo Potencia 6100 PM240, 2HP, 220V / 6SL3210-1PB13-BUL0	1	\$ 532.000	\$532.000
2	100236799	2-3 Días	Unidad Control CU240B-2 / 6SL3244-0BB00-1BA1-2D	1	\$ 584.000	\$584.000
					Subtotal	\$1.116.000
3	100325158	2-3 Días	Módulo Potencia 6100 PM240, 2HP, 220V / 6SL3210-1PB17-AUL0	1	\$ 644.000	\$644.000
4	100236799	2-3 Días	Unidad Control CU240B-2 / 6SL3244-0BB00-1BA1-2D	1	\$ 584.000	\$584.000
					Subtotal	\$1.228.000
Subtotal						\$2.344.000
<b>Observación:</b> Los precios dados no incluyen IVA.						
Fecha entrega: <b>Ver Columna T. Entrega</b>				Validez: 30 días		
Forma de pago: <b>Credito</b>				Asesor: Alejandro Giraldo Barrera		
Garantía: 1 Año por defectos de Fabricación.				Telefono: 4444630 Ext. 808		
Correo: <a href="mailto:ajgiraldo@sumecon.com">ajgiraldo@sumecon.com</a>				Celular: 316-4497789		

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### **D. Base de datos antes de implementación de control**

Por efectos de la cantidad de datos se redirección al siguiente link (Anexo 1):

<https://drive.google.com/open?id=0Bxa4TOgUKhQOeVFNRHdLNXF2QIk>

### **E. Base de datos después de implementación de control**

Por efectos de la cantidad de datos se redirección al siguiente link (Anexo 2):

<https://drive.google.com/open?id=0Bxa4TOgUKhQOUnNzejhKQXJMTjA>

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

<p>FIRMA ESTUDIANTES _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>
<p>FIRMA ASESOR _____</p>
<p>FECHA ENTREGA: _____</p>

<p>FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____</p>
<p>RECHAZADO___      ACEPTADO___      ACEPTADO CON MODIFICACIONES___</p>
<p>ACTA NO. _____</p> <p>FECHA ENTREGA: _____</p>

<p>FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____</p>
<p>ACTA NO. _____</p> <p>FECHA ENTREGA: _____</p>