

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:**  
**Implementación de un Control Predictivo Funcional (PFC) de**  
**temperatura en la plataforma de entrenamiento de procesos continuos,**  
**utilizando un PAC.**

**AUTORES:**  
**JUAN CARLOS MERA PUGA**  
**WILSON HERNÁN SANTOS CHAMORRO**

**TUTOR:**  
**WILLIAM MANUEL MONTALVO LÓPEZ**

**Quito, diciembre del 2018**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Juan Carlos Mera Puga con documento de identificación N° 171944334-1 y Wilson Hernán Santos Chamorro con documento de identificación N° 171612909-1, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO FUNCIONAL (PFC) DE TEMPERATURA EN LA PLATAFORMA DE ENTRENAMIENTO DE PROCESOS CONTINUOS, UTILIZANDO UN PAC”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELECTRÓNICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....  
Juan Carlos Mera Puga  
C.I.171944334-1

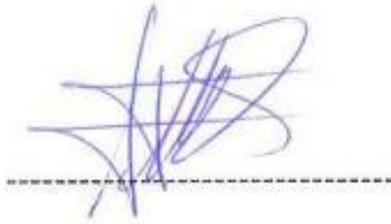
.....  
Wilson Hernán Santos Chamorro  
C.I. 171612909-1

Quito, diciembre del 2018

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el tipo de trabajo Proyecto Técnico, “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO FUNCIONAL (PFC) DE TEMPERATURA EN LA PLATAFORMA DE ENTRENAMIENTO DE PROCESOS CONTINUOS, UTILIZANDO UN PAC” realizado por Juan Carlos Mera Puga y Wilson Hernán Santos Chamorro, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre del 2018



William Manuel Montalvo López

C.I. 171278998-9

## DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a la memoria de mi abuelo Segundo Manuel Puga, que a pesar de su partida lo siento cerca de mí siempre como un ángel que me cuida día a día, para mí fue un ejemplo a seguir por su honestidad, respeto, responsabilidad y por el gran cariño que mostró a toda nuestra familia durante su vida.

A mis abuelos Carmela, Teresa y Brakdeli que siempre estuvieron apoyándome para que pueda conseguir este logro.

A mis hermanos Michael y Diego, mis sobrinos, mis tíos, mis primos y todas las personas que durante todo este proceso estuvieron apoyándome en todo momento con sus oraciones, consejos y palabras de aliento para hacer de mí una buena persona, esperando que ellos vean en mí un ejemplo a seguir.

A mi pequeña Daniela, la luz de mis ojos, mi inspiración para lograr este éxito en mi vida. Tu afecto y tu cariño serán siempre los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo y de mis ganas de buscar lo mejor para ti. Pese a tu corta edad mi pequeña deseo que comprendas que este logro obtenido sea para ti un pilar en tu futuro, para que tu seas la mejor. Recuerda mi amor quién eres, encuentra una meta, un sueño y nunca te rindas hasta hacerlo realidad. Mi pequeña se que tu seras la mejor, yo confiare en ti siempre.

*Juan Carlos*

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación está dedicado a mis padres a quienes admiro porque supieron forjarme como la persona que soy, siendo mi guía, inculcándome buenos valores, brindándome su apoyo incondicional, motivándome día a día a seguir adelante y luchar por cumplir mis objetivos, mostrándome que nada es imposible en la vida. Me siento afortunado de tenerlos a mi lado y que sean parte de mis logros.

A mi pequeña sobrina Gisselle que es fuente de fuerza e inspiración para seguirme superando como persona y profesional, mi anhelo es que en un futuro cercano vea en mí un ejemplo a seguir.

A mi hermano a quién admiro por ayudarme en momentos difíciles y por ser la principal persona involucrada a que este proyecto fuera posible.

***Wilson***

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios en especial por proporcionarme sabiduría, con su amor y bondad ha hecho de mi una buena persona permitiéndome cerrar una etapa mas en mi vida junto a las personas que me valoran.

A mis padres por su apoyo incondicional durante mis estudios, con su amor me han enseñado a no rendirme, a conseguir mis sueños y mis metas por medio de sus valiosos consejos. Gracias por ser los mejores padres y gracias por permitirme ser su hijo.

Con todo mi corazón a una mujer muy especial, la colaboración que me has brindado durante este tiempo ha sido muy valiosa para mi, estuviste a mi lado en los momentos más difíciles apoyandome, siempre seras mi consejera, mi apoyo, mi luz y mi gran amor. Gracias a tus palabras y concejos he llegado a realizar la más grande de mis metas . Siempre confiaste en mi, gracias Katherine.

A la Universidad Politécnica Salesiana, los docentes que me supieron orientar en el transcurso de la carrera inculcándome conocimientos y valores que me permitirán ser un excelente profesional.

De manera especial al Ing. William Montalvo por aceptarme para realizar bajo su dirección este proyecto, por su ayuda y orientación para realizar este proyecto, también por haberme facilitado los medios técnicos y academicos suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de este proyecto.

A los amigos y compañeros de la universidad con quienes compartimos conocimientos en las aulas durante los periodos academicos.

*Juan Carlos*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios en especial por brindarme sabiduría y ayudarme a cerrar una etapa más en mi vida. A mis padres porque con su apoyo y consejo he llegado a realizar la más grande de mis metas, la cuál constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir. A mi hermano quien siempre estuvo dispuesto a ayudarme y también por sus palabras de aliento y entusiasmo. A Mauricio por ser incondicional y motivarme a culminar mi carrera, enseñándome que hay muchas metas más por cumplir. A mis Tíos Edgar, Juan, Nelly, Carmela que siempre estuvieron aportando en mi formación profesional, y a todos los familiares y amigos que de una u otra manera formaron parte de este proceso académico.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por permitirme cursar la carrera de Ingeniería Electrónica en tan prestigiosa institución. Al Ing. William Montalvo por su gran ayuda y colaboración ya que bajo su tutela nos guio de manera acertada en la realización del proyecto de titulación. A los docentes que nos formaron profesionalmente inculcándonos conocimientos y valores, a los compañeros y amigos de la universidad con quienes compartimos las aulas.

***Wilson***

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....</b>	<b>ii</b>
<b>DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>vi</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvi</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>2</b>
<b>1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>2</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	2
1.2 Justificación .....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General .....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Delimitación espacial .....	4
1.5 Beneficiarios del proyecto .....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 descripción de la Teoría del controlador .....	5
2.1.1 Controladores automáticos industriales .....	5
2.1.2 Control (PID) proporcional integral derivativo.....	6
2.1.3 Función discreta .....	7
2.1.4 Control predictivo.....	8
2.1.5 Estrategia de los controladores predictivos.....	8
2.1.6 Control Predictivo Funcional .....	9
1.1.5 Variables de las hipótesis del control PFC .....	10
1.1.6 Criterio de desempeño IAE.....	11

1.1.5 Prueba de Wilcoxon .....	11
1.1.6 Test de Wilcoxon para muestras grandes .....	12
2.1 TEORÍA DE LOS ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL LAZO DE CONTROL .....	13
2.1.1 Controlador de Automatización Programable (PAC).....	13
2.1.2 Ventajas de los controladores automáticos en la adquisición de datos .....	14
2.1.3 Controlador CompactRIO-9073.....	14
2.1.4 Unidad de salidas Analógicas NI-9263 .....	15
2.1.5 Unidad de entradas analógicas NI-9201 .....	15
2.1.5 Elementos de la planta de temperatura .....	16
2.2 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMA .....	17
2.2.1 Sistemas de control en lazo cerrado .....	17
2.2.2 Análisis de la realimentación del proceso.....	18
2.2.3 Función de transferencia del proceso .....	18
2.2.4 Modelo de un sistema .....	19
2.2.5 Clasificación de sistemas .....	19
2.2.6 Tipos de modelo .....	19
2.2.7 Métodos de obtención del modelo.....	20
2.2.8 Pasos para la identificación del modelo.....	20
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>21</b>
<b>3. DESARROLLO DEL CONTROL PREDICTIVO FUNCIONAL .....</b>	<b>21</b>
3.1 Descripción de la planta de temperatura .....	21
3.2 Instalación del Controlador de Automatización Programable (PAC) en la planta.....	22
3.2.1 Instalación del hardware del Controlador Automático Programable (PAC) en la planta.....	22
3.2.2 Configuración del software del Controlador Automático Programable (PAC) en la planta.....	23
3.3 Migración de los elementos de control para el funcionamiento del algoritmo en la plataforma de procesos continuos .....	26
3.3.1 Circuito en la entrada del controlador para el sensor RTD.....	27
3.3.2 Circuitos adicionales en las salidas del proceso de temperatura.....	27
3.4 Identificación y Modelamiento del Sistema de Control en el proceso de Temperatura.....	30

3.4.1 Obtención de datos .....	30
3.4.2 Adquisición de datos .....	32
3.4.3 Modelamiento del sistema en Matlab.....	34
3.4.3.1 Curva de comportamiento de la planta .....	34
3.4.3.2 Obtención del modelo matemático .....	36
3.4.4 Validación del modelo .....	39
3.5 Desarrollo de un de un controlador Proporcional Integral Derivativo (pid) convencional en el CompactRIO-9073 .....	42
<b>CAPITULO IV.....</b>	<b>46</b>
<b>4. PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
4.1 Funcionamiento del controlador PID con la variable temperatura en la planta..	46
4.2 Resultados del funcionamiento del controlador PID con la variable temperatura en la planta.....	46
4.3 Funcionamiento del controlador predictivo PFC con la variable temperatura en la planta .....	47
4.4 Resultados del funcionamiento del controlador predictivo PFC con la variable temperatura en la planta .....	47
4.5 Comparación entre el control PID y el control predictivo PFC.....	48
4.6 Resultados de la comparación de los índices de desempeño IAE entre el control PID y el control predictivo PFC.....	49
4.7 Análisis del desempeño entre el control PID y el control PFC, de acuerdo al IAE índice de error absoluto.....	51
4.8 PRUEBA de Wilcoxon en el proceso de temperatura para el control PID y el controlador predictivo PFC .....	51
4.9 Interpretación de los resultados obtenidos en la Tabla 4.3 .....	53
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>56</b>
<b>7. LISTA DE REFERENCIAS .....</b>	<b>58</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Tabla para el análisis de hipótesis en la Pueba de Wilcoxon.....	12
<b>Tabla 2.2</b> Tabla comparativa de tecnologías de control entre PAC y PLC.....	14
<b>Tabla 2.3</b> Elementos que intervienen en el proceso del control de temperatura .....	16
<b>Tabla 3.1</b> Elementos de control en el proceso de temperatura.....	26
<b>Tabla 3.2</b> Nomenclatura diagrama PI&D.....	29
<b>Tabla 3.3</b> Parámetros del proceso de temperatura para el algoritmo PFC .....	31
<b>Tabla 4.1</b> Valores del índice de desempeño IAE del comportamiento para el control PID y el control predictivo PFC. ....	50
<b>Tabla 4.2</b> Valores obtenidos y análisis de la prueba de Wilcoxon para los controladores PID vs PFC en el proceso de control de temperatura de la planta.....	52
<b>Tabla 4.3</b> Resultados estadísticos para el estudio de la prueba de Wilcoxon para los controladores PID vs PFC en el proceso de control de temperatura de la planta.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Ubicación geográfica del Campus Sur perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana.....	4
<b>Figura 2.1</b> Sistema de control industrial. Esquema de bloques.....	5
<b>Figura 2.2</b> Esquema del controlador PID.....	6
<b>Figura 2.3</b> Parámetros de ajuste de la curva de reacción .....	7
<b>Figura 2.4</b> Representación gráfica de una secuencia discreta .....	8
<b>Figura 2.5</b> Estrategia del Control Predictivo .....	9
<b>Figura 2.6</b> Puntos de coincidencia.....	9
<b>Figura 2.7</b> Controlador CompactRIO-9073 .....	14
<b>Figura 2.8</b> Unidad de salidas analógicas NI-9263.....	15
<b>Figura 2.9</b> Unidad de entradas analógicas NI-9201.....	15
<b>Figura 2.10</b> Sistema de control de lazo cerrado .....	18
<b>Figura 2.11</b> Realimentación de un sistema de control simple.....	18
<b>Figura 2.12</b> Representación de la ganancia del sistema.....	19
<b>Figura 2.13</b> Proceso para la identificación de un modelo matemático .....	20
<b>Figura 3.1</b> Plataforma de procesos continuos.....	21
<b>Figura 3.2</b> Propiedades de la conexión de red del CompactRIO-9073.....	23
<b>Figura 3.3</b> Interruptores DIP del controlador CompactRIO-9073.....	23
<b>Figura 3.4</b> (a) Configuración inicial NI MAX. (b) Menú de Inicio. (c) Propiedades del proyecto .....	24
<b>Figura 3.5</b> (a) Enlace de la tarjeta. (b) Interfaces del proceso.....	24
<b>Figura 3.6</b> (a) Ejecución de LabVIEW. (b) Creación de nuevo proyecto.....	25
<b>Figura 3.7</b> (a) Conexión del controlador. (b) Reconocimiento de software al controlador. (c) Conexión al módulo de control. (d) Creación de VI para la programación del proceso .....	26
<b>Figura 3.8</b> Diagrama de bloques del sensor RTD en el proceso de temperatura .....	27
<b>Figura 3.9</b> Diagrama de bloques de los actuadores en el proceso de temperatura .....	28
<b>Figura 3.10</b> Diagrama P&ID para el control de la planta .....	29
<b>Figura 3.11</b> Diagrama de identificación del sistema .....	30
<b>Figura 3.12</b> Representación de entradas y salidas en el proceso de temperatura .....	32
<b>Figura 3.13</b> Diagrama de bloques de hardware para la adquisición de datos.....	33
<b>Figura 3.14</b> Adquisición de datos, LabVIEW panel frontal.....	33

<b>Figura 3.15</b>	Panel de diagramas de bloque en LabVIEW para la adquisición de datos	34
<b>Figura 3.16</b>	Curva de comportamiento del voltaje en la planta.....	35
<b>Figura 3.17</b>	Curva de comportamiento de la corriente en la planta.....	35
<b>Figura 3.18</b>	Curva de comportamiento de temperatura en tiempo real de la planta....	36
<b>Figura 3.19</b>	IDENT de Matlab para la obtención del modelo matemático .....	37
<b>Figura 3.20</b>	Gráficas de las funciones de transferencia obtenidas.....	37
<b>Figura 3.21</b>	Función de transferencia del proceso .....	38
<b>Figura 3.22</b>	Función discreta del proceso .....	39
<b>Figura 3.23</b>	Panel frontal de LabVIEW del controlador PFC.....	40
<b>Figura 3.24</b>	Panel de control en LabVIEW del controlador PFC.....	41
<b>Figura 3.25</b>	Diagrama subVI PID en LabVIEW .....	42
<b>Figura 3.26</b>	Panel de control Frontal del controlador PID.....	43
<b>Figura 3.27</b>	Diagrama de bloques del controlador PID .....	44
<b>Figura 3.28</b>	Valores de $K_p$ , $K_i$ , y $K_d$ en PID Tuner .....	45
<b>Figura 4.1</b>	Curva de comportamiento del controlador PID en la planta de temperatura con set point ( $22^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al tiempo .....	47
<b>Figura 4.2</b>	Curva de comportamiento del controlador predictivo PFC en la planta de temperatura con set point ( $22^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al tiempo .....	48
<b>Figura 4.3</b>	Comparación del comportamiento entre el controlador PID y PFC en la planta de temperatura con set point ( $22^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al tiempo .....	48
<b>Figura 4.4</b>	Comparación del error de estabilización entre el controlador PID y PFC en la planta de temperatura con set point ( $22^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al tiempo.....	49
<b>Figura 4.5</b>	a) Índice de desempeño IAE control PID y b) Índice de desempeño IAE control PFC.....	50

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Panel frontal CompactRIO-9073 .....	61
<b>Anexo B.</b> Características de funcionamiento eléctrico CompactRIO-9073 .....	62
<b>Anexo C.</b> Panel frontal del modulo de salidas NI-9263 .....	63
<b>Anexo D.</b> Panel del modulo de entradas NI-9201 .....	64
<b>Anexo E.</b> Características de funcionamiento eléctrico del modulo de entradas NI-9201.....	64
<b>Anexo F.</b> Valores estándar de temperatura del sensor PT-100.....	65
<b>Anexo G.</b> Placa PCB de una fuente voltaje ( $\pm 16$ V) .....	66
<b>Anexo H.</b> Conexión de 3 hilos para el sensor PT-100 .....	66
<b>Anexo I.</b> Diseño y esquema del conversor voltaje-corriente .....	67
<b>Anexo J.</b> Placa PCB de una fuente conversor corriente-voltaje .....	67
<b>Anexo K.</b> Esquema Proteus del circuito para la activación de actuadores del proceso	68
<b>Anexo L.</b> Placa PCB del circuito para la activación de actuadores del proceso.....	68
<b>Anexo M.</b> Programa para cálculo del índice de desempeño IAE .....	69
<b>Anexo N.</b> Descripción de la estrategia del control predictivo .....	70
<b>Anexo O.</b> Clasificación de los sistemas de acuerdo a su naturaleza.....	71
<b>Anexo P.</b> Clasificación de los modelos por la particularidad del formalismo matemático .....	72
<b>Anexo Q.</b> Pasos para la identificación del modelo .....	73
<b>Anexo R.</b> Datos obtenidos con el set point de 22°C con el control PID del proceso...	74
<b>Anexo S.</b> Respuesta del sistema set point de 22°C con el control PID del proceso.....	75
<b>Anexo T.</b> Datos obtenidos con el set point de 22°C con el control PFC del proceso ..	76
<b>Anexo U.</b> Respuesta del sistema set point de 22°C con el control PFC del proceso ...	77

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad realizar la simulación e implementación de un controlador predictivo funcional, denominado como PFC (del inglés Predictive Funtional Control), manipulando la variable temperatura en el módulo de procesos continuos mismo que se encuentra en Quito, en la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, en el laboratorio de Teoría de Control.

La simulación se realiza por medio del software Matlab y LabVIEW respectivamente, la implementación del proceso la ejecuta un dispositivo CompactRIO-9073, este controlador ofrece una mayor flexibilidad al software y hardware con respecto a otros controladores. El modelamiento de la planta de temperatura se realiza empleando ecuaciones en espacio de estados por medio de una metodología que presenta etapas como obtención de datos, adquisición de datos, modelamiento del sistema y validación del sistema.

Por último se implementa el algoritmo predictivo PFC al proceso de temperatura en tiempo real para examinar su desempeño, también se elabora un controlador PID para realizar una comparación de los parámetros de desempeño con respecto al controlador predictivo.

**PALABRAS CLAVE:** Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), Controlador Predictivo Funcional (PFC), CompactRIO-9073, Plataforma de procesos continuos, Prueba de Wilcoxon.

## ABSTRACT

The purpose of this project is to simulate and implement a functional predictive controller, known as PFC (Predictive Functional Control), manipulating the temperature variable in the continuous process training platform of the Control Theory laboratory of the Polytechnic University Salesian from the South Campus in Quito.

The simulation is done through the software Matlab and LabVIEW respectively, the implementation of the process is executed by a CompactRIO-9073 NI device, this controller offers greater flexibility to software and hardware with respect to other controllers.

The modeling of the temperature plant is done using equations in the state space by means of a methodology that presents stages such as data acquisition, data acquisition, system modeling and system validation.

Finally, the PFC predictive algorithm of the real-time temperature process is implemented to examine its performance. A PID controller is also developed to make a comparison of the performance parameters with respect to the predictive controller PFC.

**KEY WORDS:** Proportional Integral Derivative Controller (PID), Functional Predictive Controller (PFC), CompactRIO-9073, Continuous Process Platform, Wilcoxon Test.

## INTRODUCCIÓN

En el campo industrial los algoritmos de predicción originalmente fueron desarrollados para tener un alto grado de eficiencia, por lo tanto la implementación de un control predictivo funcional (PFC) manipulando la variable temperatura en la plataforma de entrenamiento de procesos continuos utilizando un controlador CompactRIO-9073 el cual permitirá realizar experimentación e investigación a los usuarios que utilizan el espacio físico del laboratorio de Teoría de Control.

El documento está compuesto de la siguiente manera:

El Capítulo I contiene los objetivos propuestos, los antecedentes del proyecto, el planteamiento del problema y por último los beneficios del proyecto.

En el Capítulo II se desarrolla el marco conceptual, ingresando definiciones básicas acerca de los dispositivos utilizados en la elaboración del proyecto, conceptos que permitirán realizar el desarrollo del algoritmo de predicción que se va a utilizar en este caso el control predictivo funcional (PFC), la teoría de los elementos utilizados en el lazo de control y conceptos para interpretar el modelamiento del sistema que va a emplearse en el proyecto.

El Capítulo III contiene el diseño planteado para el prototipo del proceso de temperatura, aquí se presentan los requerimientos tecnológicos del proceso, los diagramas de bloque y de flujo que exponen el funcionamiento del sistema, la instalación del CompactRIO-9073 en la planta, la programación y lógica del algoritmo de predicción, la exposición de un control PID, la simulación del modelamiento del sistema a utilizarse en el proyecto y la implementación del control de la variable temperatura en la planta de procesos continuos.

El Capítulo IV presenta las pruebas y resultados de las etapas del proceso; también se agrega la prueba estadística de Wilcoxon para verificar el parámetro más eficiente del algoritmo PFC finalmente conclusiones y recomendaciones que se determinan en el proyecto de titulación.

# CAPÍTULO I

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 Planteamiento del problema

En la industria ecuatoriana el controlador proporcional integral derivativo (PID) se ha convertido en la herramienta esencial para resolver problemas de control de variables de proceso, siendo aplicada sobre sistemas dinámicos lineales y no lineales, pero estos controladores han generado dificultades de control para el área industrial, produciendo reducción de la calidad en los productos elaborados y perjuicio en la eficacia de la productividad. (Ollero B., 1991)

Los retardos de tiempo o tiempo muerto son fenómenos muy comunes que suelen aparecer en procesos industriales de mayor complejidad. No obstante, en la actualidad y por el crecimiento de procesos más complejos existen otras alternativas que pueden complementar las necesidades del sector industrial como los controles modernos que presentan un mejor comportamiento que el control clásico, lo que permite afirmar que se tienen menores desviaciones del punto de control cuando se utilizan controladores modernos.

### 1.2 Justificación

En la actualidad la mayoría de áreas industriales se han inclinado al uso de nuevas tecnologías, estas tecnologías son conocidas como controles modernos tales como:

- Controladores que utilizan como herramientas la lógica difusa convirtiéndole en un sistema inteligente.
- Controladores que se enfocan en la acción de control de variable, conocido como controladores automáticos.
- Controles que tienen como particularidad la identificación del sistema, que se los conoce como controles predictivos.

Por las características y la información científica generada, los controladores modernos han reemplazado a los tradicionales en el área técnica del sector industrial.

La variable temperatura a controlar y monitorear comúnmente se usa en diversas áreas de la industria ecuatoriana como son procesos de manufactura de alimentos, medicina, textiles, entre otros.

Una característica del controlador predictivo es la manipulación en el control de varias entradas y salidas sincronizadas en un mismo tiempo, para lo cual utilizan un enfoque centralizado como estrategia de control.

Este tipo de control son aplicados en sistemas no lineales y lineales, una propiedad de este control es nivelar el tiempo de retraso del proceso generado por las perturbaciones del sistema.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Implementar un control predictivo funcional (PFC) de temperatura en la plataforma de entrenamiento de procesos continuos, utilizando un PAC.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Acoplar el controlador de automatización programable en la plataforma de procesos continuos del laboratorio de Teoría de Control para controlar la variable temperatura.
- Determinar el modelo matemático del proceso de temperatura para ensayar el algoritmo de control.
- Simular del algoritmo de control predictivo funcional (PFC) sobre un modelo de la planta para verificar su comportamiento.
- Implementar el algoritmo de control predictivo funcional en el controlador de automatización programable para el control real de la variable temperatura.
- Verificar el comportamiento del controlador moderno respecto a un controlador PID convencional, para determinar su efectividad en procesos de temperatura.

#### 1.4 Delimitación espacial

El presente proyecto se implementará en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur Sede Quito, en el Bloque C, Laboratorio de Teoría de Control (Ver Figura 1.1), este es un espacio que contiene dispositivos que utilizan estudiantes y docentes para realizar prácticas de investigación y estudio referente a materias de la malla curricular de la Carrera de Ingeniería Electrónica.

**Figura 1.1.** Ubicación geográfica del Campus Sur perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana



Fuente: (Mapas de Google, 2018)

#### 1.5 Beneficiarios del proyecto

El presente proyecto beneficiará a la Universidad Politécnica Salesiana Quito Campus Sur a la carrera de Ingeniería Electrónica directamente al área de Investigación, Control y Automatización, puesto que, con el mejoramiento del módulo de entrenamiento en procesos continuos, se podrá adquirir mayor conocimiento de técnicas del control predictivo funcional (PFC), empleando la variable temperatura.

Del mismo modo se beneficiarán, todas las empresas que manejen procesos industriales basados en técnicas de control clásico, ya que con este proyecto se plantea adquirir nuevos conocimientos que a futuro permitan la implementación de una nueva tecnología en las industrias que así lo requieran, permitiendo reducir tiempo y mejorar la producción.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se lleva a cabo la descripción de conceptos fundamentales de los componentes que participan dentro del algoritmo del control predictivo. La descripción teórica esta orientada bajo la recolección de datos de varios libros técnicos y documentaciones de páginas Web registradas en la nube de internet.

#### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA TEORÍA DEL CONTROLADOR

A continuación se presenta una descripción de conceptos básicos sobre los controladores que se van a usar en el proceso, estos se muestran a continuación:

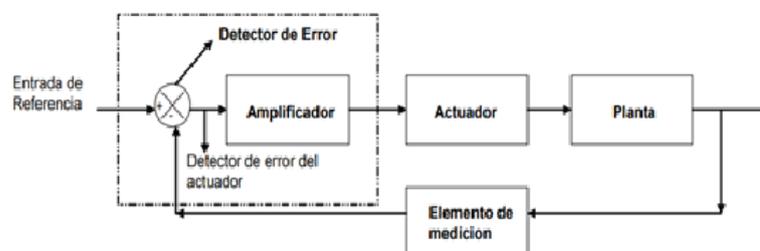
##### 2.1.1 Controladores automáticos industriales

Un sistema de control para disminuir su error utiliza un controlador automatico que tiene como función relacionar el valor pretendido con respecto al valor real en la salida.

Según (Paz, 2011), “el controlador determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño, la forma en que el controlador produce la señal se llama acción de control”.

Dentro del estudio de un sistema es importante comprender las propiedades esenciales del control con el propósito de seleccionar un control lógico adecuado, cuando se haga el análisis del sistema.

**Figura 2.1** Sistema de control industrial. Esquema de bloques



Fuente: (Paz, 2011)

En la Figura 2.1, se observa elementos como: **controlador** cuya función es localizar el error ejecutado en la señal, **actuador** su funcionamiento se basa en la generación

de una señal a la entrada de la planta referenciando la señal de control con el propósito de que la señal de entrada de la planta concuerde con la señal de realimentación del sistema, finalmente un **elemento de medición** que es instrumento o mecanismo que tiene como función es transformar la variable de la salida en una nueva variable, con la particularidad de que esta es la comparación de de la señal de entrada con la salida del sistema. Estas componentes pertenecen al diagrama de un controlador automático industrial .

Los controladores automáticos industriales ejecutan acciones de control que tienen como función mantener el sistema con los parámetros adecuados de operación y minimizar los errores de desempeño, los mas comunes en el ámbito industrial son:

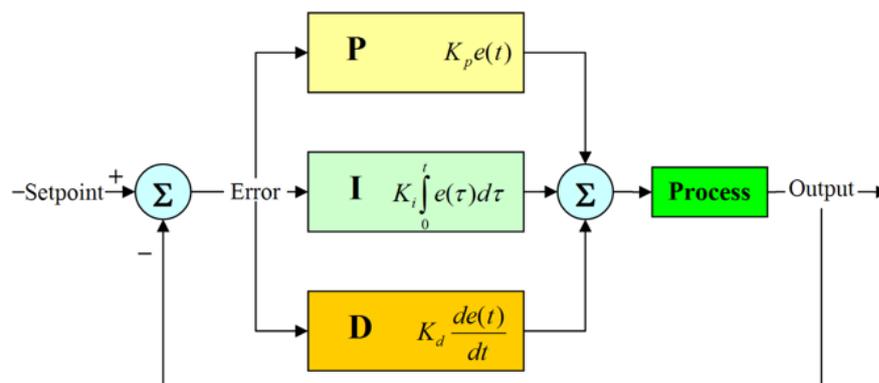
- El de dos posiciones encendido y apagado.
- Proporcional.
- Integral.
- Derivativo.

### 2.1.2 Control (PID) proporcional integral derivativo

Para (SIEMENS, 2014), “el PID (Proporcional Integral Derivativo), es un sistema de control que por medio de un actuador es capaz de conservar una variable o proceso en un punto deseado dentro del rango de medición del sensor que la evalúa”.

Por ser un control frecuente y preciso, este es un método constantemente usado en los controles automáticos.

**Figura 2.2** Esquema del controlador PID



Fuente: (SIEMENS, 2014)

Según (LozanoValencia, 2012), “el control PID proporciona un tratamiento tanto para la respuesta de estado estacionario como la respuesta transitoria, y ofrece una solución genérica y eficiente a los problemas de control”.

La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_{pe}(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec. (1)}$$

Para el control PID del proceso de temperatura se utiliza el parámetro Ziegler y Nichols, cuya particularidad es lograr la relación 4:1 del amortiguamiento para el primer y segundo pico de la respuesta de la referencia escalon. Los parámetros recomendados por Ziegler y Nichols se visualiza en la Figura 2.3.

**Figura 2.3** Parámetros de ajuste de la curva de reacción

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{u_0}{K_0 \tau_0}$		
PI	$\frac{0.9 u_0}{K_0 \tau_0}$	$3 \tau_0$	
PID	$\frac{1.2 u_0}{K_0 \tau_0}$	$2 \tau_0$	$0.5 \tau_0$

Fuente: (Paz, 2011)

### 2.1.3 Función discreta

Según (Carrillo, 2012), “una función de tiempo discreto se caracteriza por que su variable independiente solo puede tomar determinados valores.”

La función discreta esta constituido en el dominio de un conjunto de números reales, los mismos que no se relacionan entre sí.

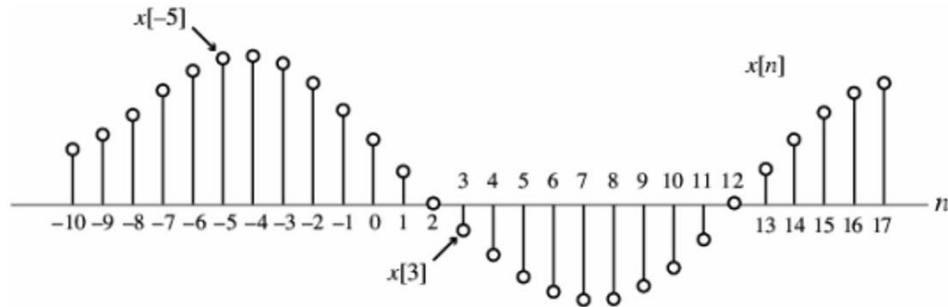
La secuencia o una muestra de una señal se expresa por  $x[n]$  siendo  $n$ , entero en el intervalo  $-\infty < n < \infty$ ; ( $x[n]=x[nT]$ ).

- $x[n]$  está determinada únicamente para valores enteros de  $n$ .
- La señal en tiempo discreto se define como  $\{x[n]\}$ .

- Una señal discreta se pueden representar en una secuencia de números entre paréntesis.

En la Figura 2.4 se muestra una señal discreta.

**Figura 2.4** Representación gráfica de una secuencia discreta



Fuente: (Carrillo, 2012)

#### 2.1.4 Control predictivo

El control predictivo funcional se lo define como un método de control específico que tiene como particularidades:

- El control centralizado para el uso de múltiples entradas y salidas con una misma sincronización de tiempo en un proceso.
- Sistemas que presentan controles con tiempos muertos.
- Sistemas con control óptimo que se presentan en los procesos.
- Sistemas estocástico que se presentan durante la ejecución de procesos .

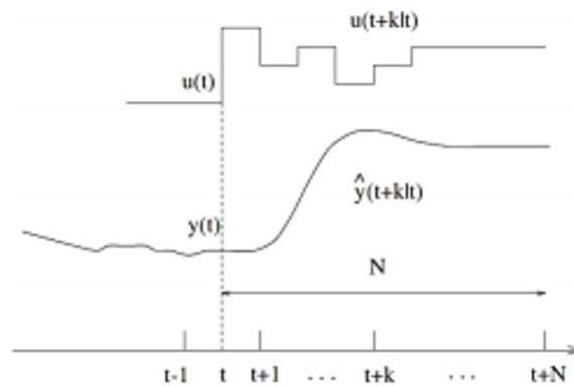
El controlador predictivo utiliza dos características fundamentales durante su ejecución estos son:

1. Empleo categorico del modelo que va a predecir la salida del proceso para futuros momentos de tiempos a este se lo define como horizonte.
2. Evaluar las las señales de control disminuyendo la función objetivo.

#### 2.1.5 Estrategia de los controladores predictivos.

La metodología en los controladores que integran la familia del MPC se define por la siguiente estrategia, la cual se observa en la Figura 2.5.

**Figura 2.5** Estrategia del Control Predictivo



Fuente: (Moreno, 2015)

La descripción de la estrategia del control predictivo, se lo puede analizar y verificar en el anexo N.

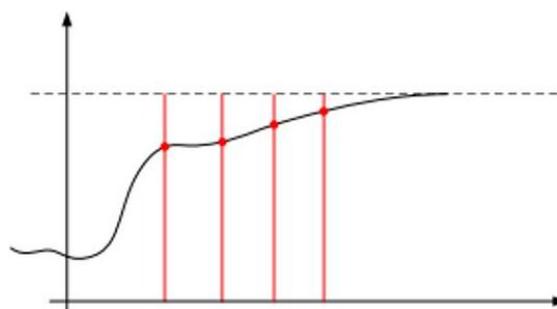
### 2.1.6 Control Predictivo Funcional

Este controlador fue realizado por Richalet para la ejecución de procesos rápidos en el área industrial. Este controlador emplea un modelo con la particularidad que presenta un modelo en espacio de estados de tiempo, esta característica permite empleo de procesos inestables. Esta particularidad también se la aplica al proceso no lineal.

Este esquema de control tiene dos propiedades que lo diferencian del resto de controladores estos son:

Para (Palomo, 2006), “Los **puntos de coincidencia** se emplean para sintetizar los cálculos examinando solo un subconjunto de puntos en el horizonte de predicción. La salida deseada y la predicción deben coincidir en dichos puntos, no todo en el horizonte de predicción.”

**Figura 2.6** Puntos de coincidencia



Fuente: (Palomo, 2006)

Otro planteamiento innovador de este método es la parametrización (Función Discreta) de la señal de control utilizada como la conexión lineal de algunas funciones base, estas funciones tienen como característica que son seleccionadas por la naturaleza del proceso.

**Método de la función de transferencia discreta.** Se emplea el criterio de la función de transferencia  $a: G = B/A$ , la salida está representada por:

$$A(z - 1)y(t) = B(z - 1)u(t) \quad \text{Ec. ( 2 )}$$

$$A(z - 1) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{na}z^{-na} \quad \text{Ec. ( 3 )}$$

$$B(z - 1) = 1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{nb}z^{-nb} \quad \text{Ec. ( 4 )}$$

Entonces la predicción del sistema está definida por:

$$\hat{y}(t + k|t) = \frac{B(z - 1)}{A(z - 1)} u(t + k|k) \quad \text{Ec. ( 5 )}$$

Para (Palomo, 2006), “esta representación es aceptada incluso para procesos inestables y tiene la virtud el uso de pocos parámetros, aunque es fundamental un conocimiento previamente del proceso sobre todo en cuanto al orden de los polinomios A y B.”

### 1.1.5 Variables de las hipótesis del control PFC

Según ( Rossiter , 2005), el PFC elige los grados de libertad para ser los coeficientes de un polinomio. Por ejemplo, supongamos que la entrada futura se da como:

$$u(k) = a + bk + ck^2; \quad k \geq 0 \quad \text{Ec. ( 6 )}$$

Para los algoritmos de PFC más comunes, solo se usa la variable a. Las variables b, c se proporcionan para escenarios donde la trayectoria del objetivo es una rampa o parábola.

Para seguir un objetivo constante, asintóticamente se necesita una entrada constante, por lo que una opción sensata de entrada es:

$$u(k) = a; \quad k \geq 0 \quad \text{Ec. ( 7 )}$$

Para seguir una rampa, típicamente (excluyendo las formas integradoras) la entrada necesitaría incluir una rampa y por lo tanto la entrada sería la siguiente:

$$u(k) = a + bk ; \quad k \geq 0 \quad \text{Ec. ( 8 )}$$

### 1.1.6 Criterio de desempeño IAE

Este criterio de desempeño con la nomenclatura IAE, se define como la integral del valor absoluto este método consiste en mostrar el principio del comportamiento de un sistema de control ejecutado frecuentemente en un proceso. (Angulo Bahón & Raya Giner, , 2004)

Este criterio tiene como propiedad proporcionar una respuesta y disminución razonable en la salida de un lazo de control. Este principio se aplica a errores cortos de los sistemas que se generan en los procesos.

Este parámetro se muestra en la Ecuación 9.

$$\int_0^{\infty} |e| dt \quad \text{Ec. ( 9 )}$$

### 1.1.5 Prueba de Wilcoxon

Según (Aragón Salgado, 2016) “es una estudio no paramétrico, adoptado en muestras desmedidas, generalmente mayores a 25; la peculiaridad de esta prueba es transformar los valores en Z para conocer su probabilidad respectiva.”

Dicha prueba fue diseñada para detectar cualquier clase de diferencia entre dos grupos; algunas de ellas son: ubicación, dispersión, forma, o las tres. Es posible usarla cuando se ha logrado una medición de la información en cuanto menos escala ordinal y se desea probar que dos muestras mutuamente independientes se han tomado o no de la misma población o de poblaciones idénticas. Los únicos supuestos necesarios para aplicar la prueba son los siguientes:

- Para evitar empates que la variable aleatoria de interés sea continua.
- Que los datos a recopilar cuando menos tengan una escala ordinal de medición, tanto entre como dentro de las dos muestras.

- Que ambas muestras sean elegidas en forma aleatoria e independiente de sus respectivas poblaciones. En resumen, el procedimiento de la prueba de Wilcoxon de suma de rangos requiere un conjunto de suposiciones menos estrictas que la prueba t de Student, ya que solo se especifica que las poblaciones tengan distribución continua con la misma forma sesgada o simétrica, así como que los datos se logren medir en una escala ordinal en ambas muestras.

Esta prueba determina la diferencia de la probabilidad entre dos muestras vinculadas, esta comparación se da por pareja de datos o criterios IAE respectivamente. Para esta prueba también se analiza los siguientes aspectos:

- Se producen diferencias con magnitudes positivas y negativas.
- Aparece la Hipótesis
- De carácter ordinal al trabajar con sus datos.
- Aplicado para muestras grandes, generalmente mayores de 25.

**Tabla 2.1** Tabla para el análisis de hipótesis en la Prueba de Wilcoxon

Hipótesis no Direccionales	Hipótesis Direccionales	El signo se puede cambiar según las necesidades
$H_0 - X_1 = X_2$	$H_0 - X_1 > X_2$	$H_0 > \text{ó } H_0$
$H_1 - X_1 \neq X_2$	$H_1 - X_1 < X_2$	
Pruebas de dos colas	Pruebas de una cola	

**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

Los parámetros de la hipótesis de la Prueba de Wilcoxon se muestra en la Tabla 2.1.

### 1.1.6 Test de Wilcoxon para muestras grandes

Para valores mayores de 25, estos valores se transforman en valor de Z, determinando si la probabilidad tiene la propiedad de carácter significativo.

Si el número de muestras (n) es mayor a 25, se puede admitir que Z se asigna de forma aproximadamente Normal, rechazando  $H_0$ . Para este estudio se utilizan las siguientes ecuaciones:

- **Estadístico Z:**

$$ZT = \frac{T \cdot \bar{xT}}{\sigma T} \quad \text{Ec.( 10 )}$$

- **Media del estadístico:**

$$\bar{xT} = \frac{N(N+1)}{4} \quad \text{Ec.( 11 )}$$

- **Cálculo del error estándar:**

$$\sigma T = \frac{\sqrt{N(N+1)(N+2)}}{24} \quad \text{Ec.( 12 )}$$

## 2.1 TEORÍA DE LOS ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL LAZO DE CONTROL

A continuación se detalla ideas fundamentales de los elementos que participan en el desarrollo del lazo de control. Estos se detallan a continuación:

### 2.1.1 Controlador de Automatización Programable (PAC)

El controlador de automatización programable denotado con siglas PAC es un dispositivo de control avanzado de alta tecnología utilizada en el ámbito industrial en sectores que utilizan equipos para la medición de magnitudes análogas.

El controlador de automatización programable esta compuesto por una memoria denominada como CPU, módulos de entradas y salidas que tienen como función la conexión de uno o algunos buses de datos. Este dispositivo tiene la característica de flexibilidad en los monitoreos, cálculos y ejecución de procesos industriales.

Mismo que tiene como finalidad el uso en las siguientes aplicaciones:

- Control independiente de múltiples lazos cerrados.
- Función de control robusto en lazos de sistemas.
- Exáctitud de la adquisición de datos.
- Estudio del análisis matemático del sistema.
- Monitoreo remoto de procesos.

- Aplicaciones con funcionamiento de visión artificial.

### 2.1.2 Ventajas de los controladores automáticos en la adquisición de datos

Se realiza el siguiente cuadro comparativo entre las dos tecnologías de control como se visualiza en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Tabla comparativa de tecnologías de control entre PAC y PLC

Característica	PLC	PAC	PC Estándar
Soporta shocks eléctricos y vibración	Si	Si	No
Seguridad y Estabilidad			
Rango de temperatura industrial			
Trabajo en tiempo real			
Entradas de fuente de poder redundantes	No	Si	Si
Procesador de punto flotante			
Memoria no volátil			
Conectividad a Ethernet vía WEB			
Capacidad de administración de recursos			
Capacidad ilimitada en lazos de control			

**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

### 2.1.3 Controlador CompactRIO-9073

Es un controlador robusto con procesador que tiene como particularidad la función en tiempo real. Incluye un dispositivo conocido como FPGA, puertos para la conectividad de redes como Ethernet y Serial. Los diagramas, características, componentes y configuraciones se presentan en los Anexos A y B.

**Figura 2.7** Controlador CompactRIO-9073



**Fuente:** (Instruments, cRIO-9073 Chasis CompactRIO (Legado), 2017)

### 2.1.4 Unidad de salidas Analógicas NI-9263

Es un módulo que permite el funcionamiento de salidas analógicas para sistemas con operatividad CompactRIO y CompactDAQ. Los diagramas, características, componentes y configuraciones se presentan en el Anexo C.

**Figura 2.8** Unidad de salidas analógicas NI-9263



**Fuente:** (Instruments, NI-9263 Módulo de Salida de Voltaje de la Serie C, 2017)

### 2.1.5 Unidad de entradas analógicas NI-9201

Es un módulo que permite la operatividad de entradas analógicas en sistemas con funcionamiento CompactRIO y CompactDAQ. Los diagramas, características, componentes y configuraciones se presentan en los Anexos D y E.

**Figura 2.9** Unidad de entradas analógicas NI-9201



**Fuente:** (Instruments, NI-9201 Módulo de Entrada de Voltaje de la Serie C, 2018)

### 2.1.5 Elementos de la planta de temperatura

El proceso de temperatura presenta los actuadores, el sensor que tiene como particularidad la realimentación del proceso y el controlador. A continuación, en la Tabla 2.3 se enumeran los elementos que forman parte del funcionamiento del control de la variable temperatura en la plataforma de procesos continuos:

**Tabla 2.3** Elementos que intervienen en el proceso del control de temperatura

Nombre del Elemento	Etiqueta en PAC	Característica	Instrumento Físico
<b>Servoválvula-Bomba</b>	A0.0	Servoválvula actuador en el proceso, su función es que al ser un accionador de tipo neumático conecta dos vías por las que circula el líquido (agua).	
		Bomba actuador en el proceso, su función es bombear agua desde el almacenamiento hacia el suministro de los tanques.	
<b>Niquelina (1500 W)</b>	A0.1	Actuador en el proceso, su función es calentar el líquido (agua) en un tiempo determinado con una potencia de 1500W.	
<b>Niquelina (750 W)</b>	A0.2	Actuador en el proceso, su función es calentar el líquido (agua) en un tiempo determinado con una potencia de 750W.	
<b>Mixer</b>	A0.3	Actuador del proceso, su función es mezclar el líquido (agua) para obtener una temperatura uniforme en el tanque suministro.	
<b>RTD (PT-100)</b>	AI.5	Sensor del proceso, su funcionamiento se basa en la variación de resistencia del conductor (platino) con la temperatura generada.	

**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

**Continuación Tabla 2.3** Elementos que intervienen en el proceso del control de temperatura

Nombre del Elemento	Etiqueta en PAC	Etiqueta en PAC	Característica	Instrumento Físico
<b>Tanque Suministro</b>		No	Depósito de aluminio utilizado para reservar el líquido que es enviado desde el tanque de reserva para ser utilizado en el proceso de temperatura.	
<b>Tanque Reserva</b>			Depósito de aluminio utilizado para el almacenamiento de diversos fluidos que van a emplearse en los diferentes procesos de control.	
<b>Regulador</b>			Elemento cuya función es normalizar el suministro de aire que alimenta la servoválvula.	
<b>Fusibles Auxiliares</b>			Estos elementos se encuentran instalados para protección en caso de una falla eléctrica impidan el daño de los elementos de control y del PAC.	
<b>Computador</b>			Dispositivo cuya función es la de procesar información en forma rápida y precisa de los elementos de hardware y software empleados en el proceso.	

**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

## 2.2 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMA

Se considera un procedimiento que por medio de ensayos adquiere con exactitud el modelo matemático del sistema, este modelo puede ser representado por medio de su estructura discreta o continua generando con precisión las características dinámicas del proceso.

Por medio de datos reales obtenidos en la planta del proceso, este método con propiedades computacionales y experimentales elabora el modelo matemático del sistema.

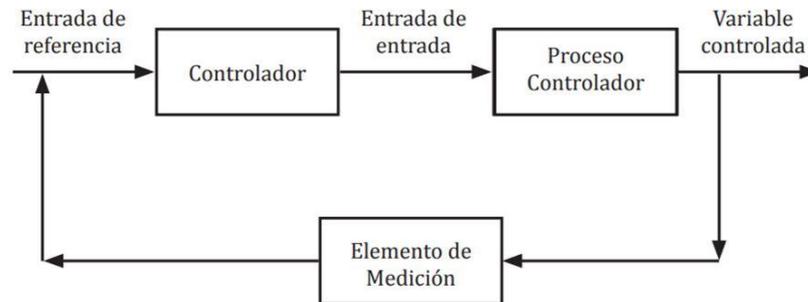
### 2.2.1 Sistemas de control en lazo cerrado

Para (Paz, 2011), “El término lazo cerrado siempre indica una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.”

Este tipo de sistema de control tiene como virtud mantener su precisión y a la vez se hacen imperceptibles a las perturbaciones generadas en el proceso.

El lazo de control cerrado se visualiza en la Figura 2.10.

**Figura 2.10** Sistema de control de lazo cerrado

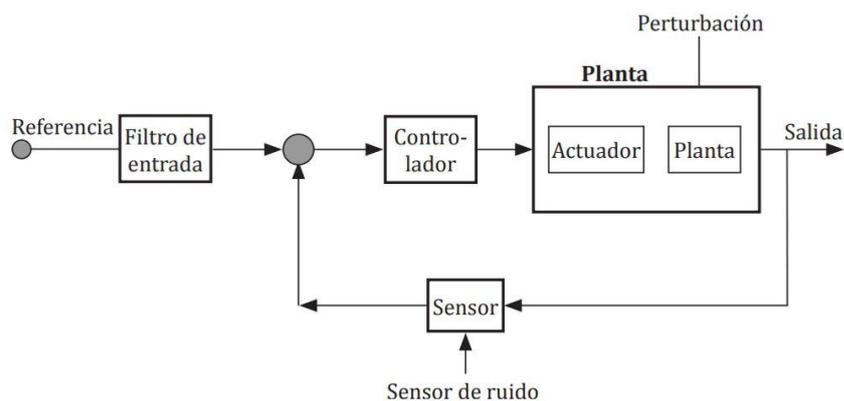


Fuente: (Paz, 2011)

### 2.2.2 Análisis de la realimentación del proceso

La realimentación es una propiedad en la cual la variable controlada como la temperatura la cual es utilizada en el proceso, son valoradas por el sensor luego la información es retornada al controlador que actúa sobre la variable controlada. En la Figura 2.11, se visualiza las conexiones y componentes de un sistema retroalimentado.

**Figura 2.11** Realimentación de un sistema de control simple



Fuente: (Paz, 2011)

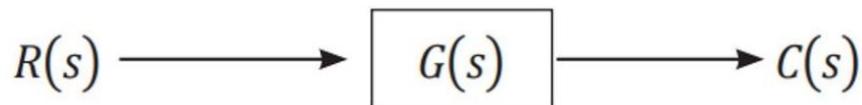
### 2.2.3 Función de transferencia del proceso

La función de transferencia se determina por medio de la razón entre la función de respuesta del sistema obtenida por la transformada de Laplace en la salida del

sistema y la función obtenida por la transformada de Laplace en la entrada del sistema.

A continuación se presenta los parámetros de una función de transferencia donde la salida del sistema es  $C(s)$ ,  $R(s)$  se define como la entrada del sistema y  $G(s)$  esta determinado por el producto de la ganancia.

**Figura 2.12** Representación de la ganancia del sistema.



**Fuente:** (Paz, 2011)

#### **2.2.4 Modelo de un sistema**

De manera general es un esquema de forma matemática en un sistema, es también una herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema sin necesidad de experimentar sobre él, en determinados procesos la experimentación puede ser complicada o incluso imposible desarrollarla.

Para (Vaca Guilcamaigua & Curay Flores, 2015), “El modelo matemático equivale a una ecuación matemática o un conjunto de ellas en base a las cuales podemos conocer el comportamiento general del sistema.”

#### **2.2.5 Clasificación de sistemas**

Para determinar el sistema en el cual actuará el proceso, se analiza la clasificación de los sistemas de acuerdo a su naturaleza, concluyendo que por sus propiedades se utilizará un sistema determinístico. Las características, conceptos de los sistemas por su naturaleza se muestran en el Anexo O.

#### **2.2.6 Tipos de modelo**

Para determinar el tipo de modelo que actuará en el proceso, se analiza la clasificación de los modelos de acuerdo a la particularidad del formalismo matemático que cada uno de estos poseen, concluyendo que por sus propiedades se utilizará un modelo discreto.

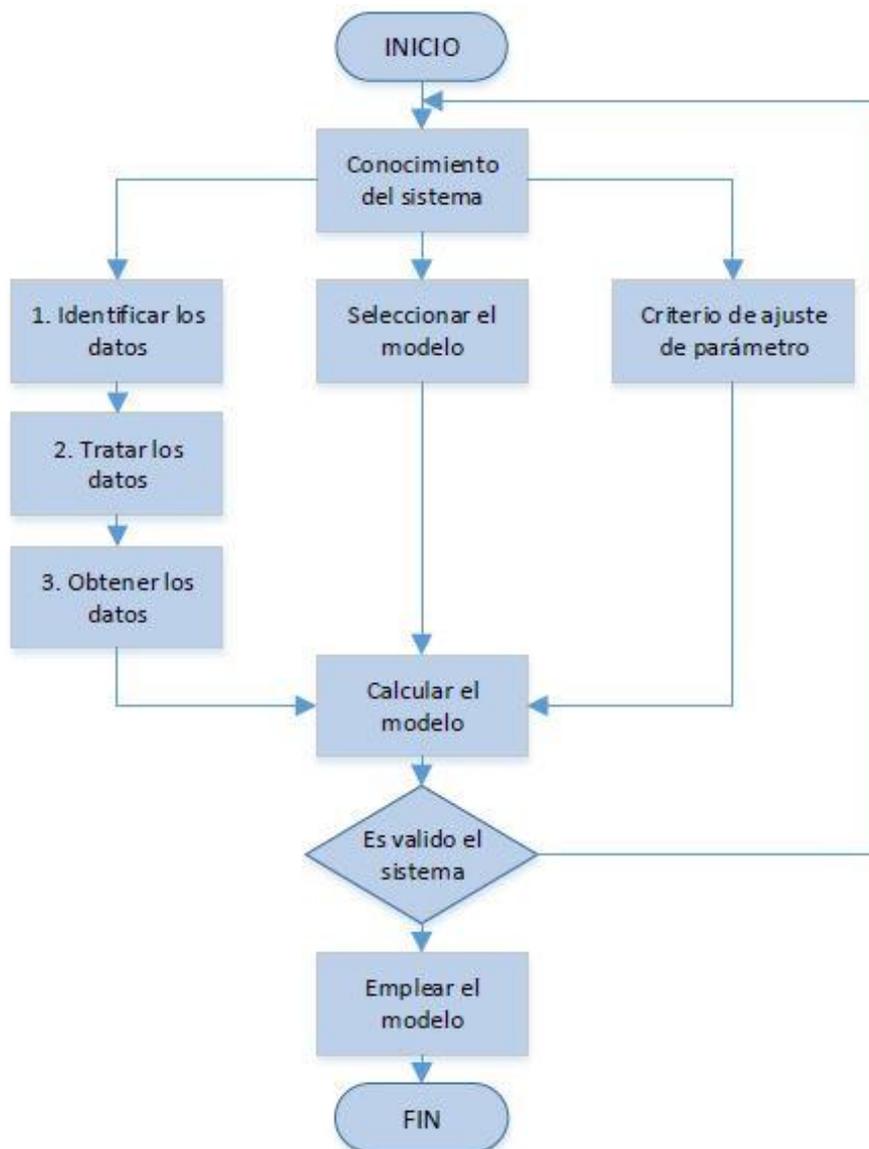
### 2.2.7 Métodos de obtención del modelo

Para definir el método para la obtención del modelo en el cual actuará el proceso, se analiza los principales métodos. Las características, conceptos del método para la obtención del modelo se analizan en el Anexo P.

### 2.2.8 Pasos para la identificación del modelo

El proceso de identificación es una técnica repetitiva, para su interpretación se realiza un diagrama de flujo el cual se muestra en la Figura 2.13, los conceptos de cada parámetro se visualiza en el Anexo Q.

**Figura 2.13** Proceso para la identificación de un modelo matemático



**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

## CAPÍTULO III

### 3. DESARROLLO DEL CONTROL PREDICTIVO FUNCIONAL

En este capítulo se detallan los procesos de configuración y comunicación del controlador CompactRIO-9073, además de la obtención del modelo matemático del sistema en el software Matlab, la implementación del control PID y control predictivo PFC en el software LabVIEW, para el proceso de temperatura.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TEMPERATURA

Para el diseño del Control Predictivo Funcional, se debe realizar un estudio detallado de la planta con el objetivo de controlar un rango de temperatura variable (0-50 °C). El estudio permitirá conocer el rango de operación, perturbaciones y las unidades de trabajo se utiliza, las entradas (sensor) y las salidas (actuadores) involucradas en el proceso, con las cuales se obtendrá el modelamiento matemático óptimo de la planta. Se identifica como planta del proceso a la plataforma de procesos continuos como se muestra en la Figura 3.1.

**Figura 3.1** Plataforma de procesos continuos



Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

Este módulo permite controlar tres variables: caudal, nivel y temperatura; los cuales tienen sus respectivos sensores y actuadores que funcionaran de acuerdo al proceso de control.

## **3.2 INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR DE AUTOMATIZACIÓN PROGRAMABLE (PAC) EN LA PLANTA**

Para el funcionamiento del controlador CompactRIO-9073 se realiza la instalación del hardware y la respectiva configuración de software, como se detalla a continuación:

### **3.2.1 Instalación del hardware del Controlador Automático Programable (PAC) en la planta**

Para el funcionamiento del proceso de temperatura se utilizará:

- a. El controlador en tiempo real CompactRIO.
- b. El módulo CompactRIO-9073. (Chasis).
- c. El módulo para entradas analógicas (AI).
- d. El módulo para salidas analógicas (AO).
- e. Fuente de Alimentación DC (+24 Voltios).
- f. Cable Ethernet.

A continuación, se describe el procedimiento de instalación del hardware del controlador:

1. Se debe asegurar que el controlador no se encuentre alimentado con energía.
2. Se une el controlador con el conector del chasis.
3. Se realiza la conexión de los módulos de entrada y salida en el chasis del módulo.

La red Ethernet es utilizada en la comunicación del sistema CompactRIO-9073 por medio de un cable Ethernet estándar de par trenzado. A continuación se muestra las propiedades para la comunicación del CompactRIO-9073 en la Figura 3.2.

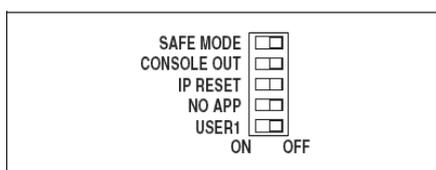
**Figura 3.2** Propiedades de la conexión de red del CompactRIO-9073

Network Adapters	
Ethernet Adapter eth0 (Primary)	
Adapter Mode	TCP/IP Network
MAC Address	00:80:2f:12:20:a4
Configure IPv4 Address	Static
IPv4 Address	192.168.1.101
Subnet Mask	255.255.255.0
Gateway	192.168.1.101
DNS Server	0.0.0.0

**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

Antes de energizar el módulo los interruptores DIP deben configurarse como se muestra en la Figura 3.3.

**Figura 3.3** Interruptores DIP del controlador CompactRIO-9073



**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

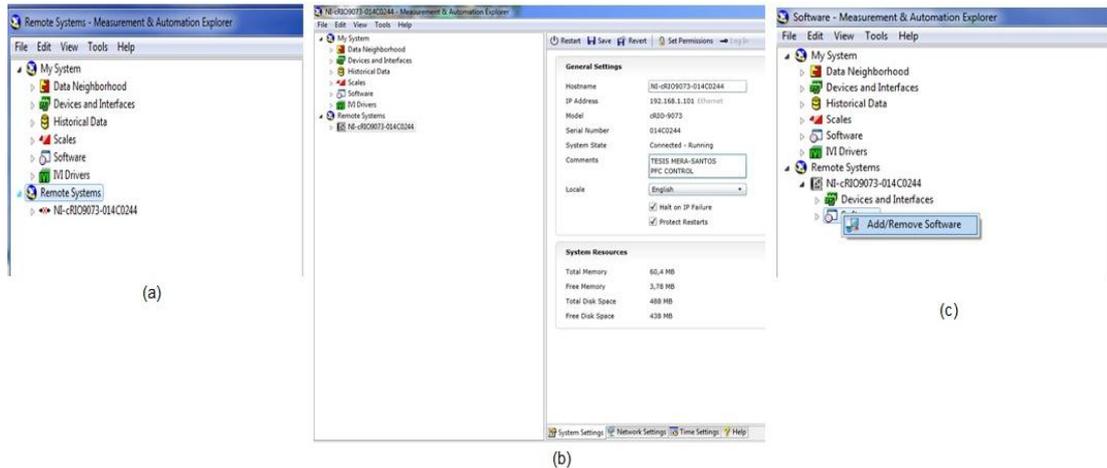
### 3.2.2 Configuración del software del Controlador Automático Programable (PAC) en la planta

Para la configuración de red del controlador CompactRIO-9073, se debe tener instalado el software adecuado al ordenador que realiza el respectivo control además el controlador CompactRIO-9073 debe estar armado, energizado y conectado a una red local para su conectividad. Para la comunicación del controlador con la planta (Plataforma de procesos continuos) se realiza el siguiente proceso:

1. Desactivar las interfaces de redes secundarias. (Firewall, Tarjeta de acceso inalámbrico).
2. Se realiza la configuración inicial, en la Figura 3.4 (a), se muestra el software NI-MAX de National Instruments el cual registra el sistema del controlador CompactRIO-9073 por medio de la interfaz de red primaria en el ordenador.
3. En la Figura 3.4 (b), se observa la interfaz Measurement & Automation Explorer de NI-MAX la cual despliega el menú de inicio.

- En la Figura 3.4(c) se puede visualizar el procedimiento para vincular el software del controlador con sus respectivas propiedades para la puesta en marcha del CompactRIO-9073.

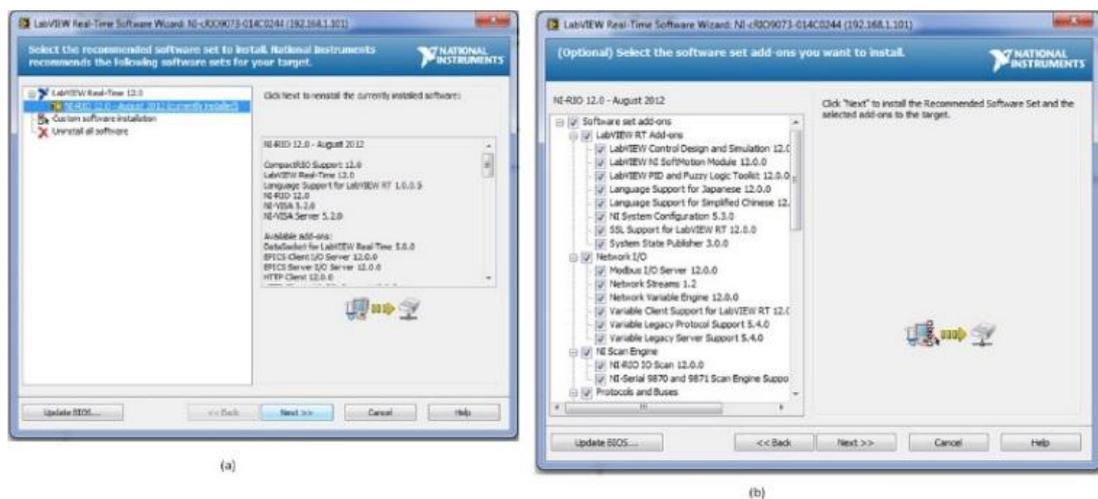
**Figura 3.4** (a) Configuración inicial NI MAX. (b) Menú de Inicio. (c) Propiedades del proyecto



**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

- El enlace de la tarjeta que se añadió con sus respectivas propiedades se muestra En la Figura 3.5 (a), consecutivamente se selecciona las interfaces que se encuentran vinculadas en el proceso para su funcionamiento como se visualiza en la Figura 3.5 (b).

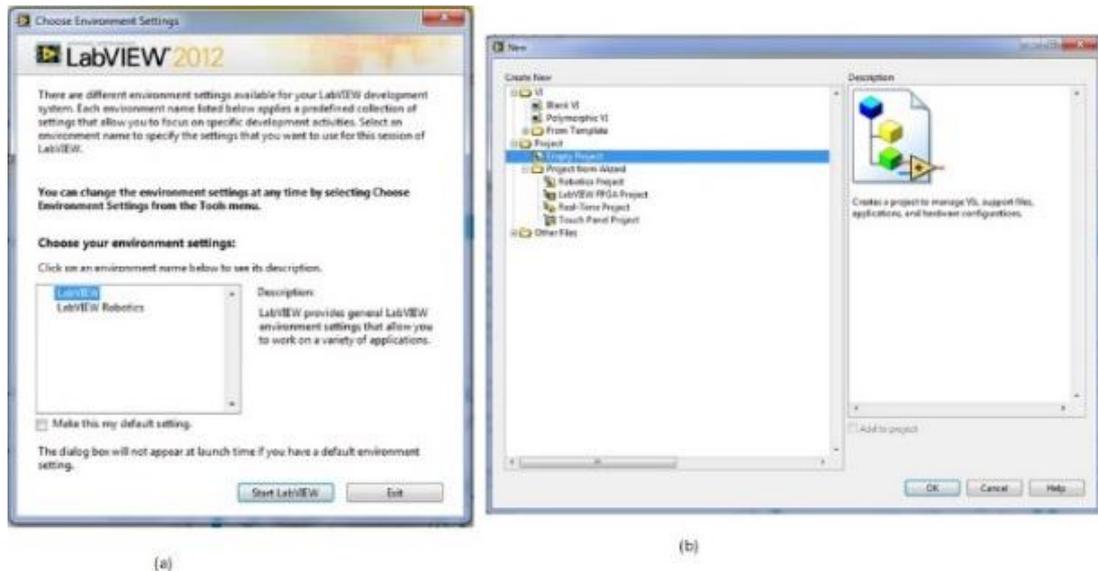
**Figura 3.5** (a) Enlace de la tarjeta. (b) Interfaces del proceso



**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

6. Para el control del proceso se ejecuta el software LabVIEW que tiene una licencia estudiantil para su uso como se visualiza en la Figura 3.6 (a).
7. En la Figura 3.6 (b), se muestra la creación de un nuevo proyecto (Empty Project), el mismo nos permitirá realizar la programación de nuestro proceso.

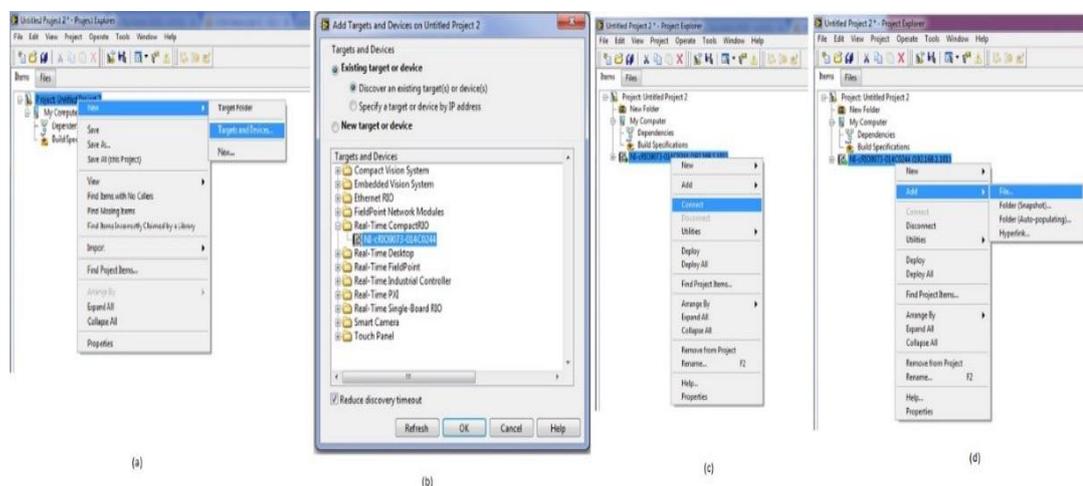
**Figura 3.6** (a) Ejecución de LabVIEW. (b) Creación de nuevo proyecto



**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

8. En la ventana Empty Project se realiza la conexión del software al controlador agregando el dispositivo en la opción TARGETS AND DEVICES como se muestra en la Figura 3.7 (a) además el software reconoce el controlador con el cual se realizará el proceso como se visualiza en la Figura 3.7 (b).
9. Para realizar el control del proceso se debe realizar la conexión del módulo de control como se observa en la Figura 3.7 (c), luego se realiza la adición del VI de LabVIEW para su respectiva programación como se visualiza en la Figura 3.7 (d).

**Figura 3.7** (a) Conexión del controlador. (b) Reconocimiento de software al controlador. (c) Conexión al módulo de control. (d) Creación de VI para la programación del proceso



**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

### 3.3 MIGRACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO EN LA PLATAFORMA DE PROCESOS CONTINUOS

Debido a que el controlador CompactRIO-9073 utiliza voltaje para su funcionamiento, se emplea el uso de circuitos adicionales que permiten a los elementos de control obtener señales de voltaje debido a que estos elementos originalmente funcionan con señales de corriente en la plataforma. Los elementos de control que se utilizan en el proceso de temperatura, se detalla en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Elementos de control en el proceso de temperatura

Nombre del elemento	Etiqueta en PAC	Característica
Servoválvula - Bomba	A0.0	Salida del proceso
Niquelina (1500 W)	A0.1	
Niquelina (750 W)	A0.2	
Mixer	A0.3	
RTD (PT-100)	AI.5	Entrada del proceso

**Elaborado por:** Juan Mera, Wilson Santos

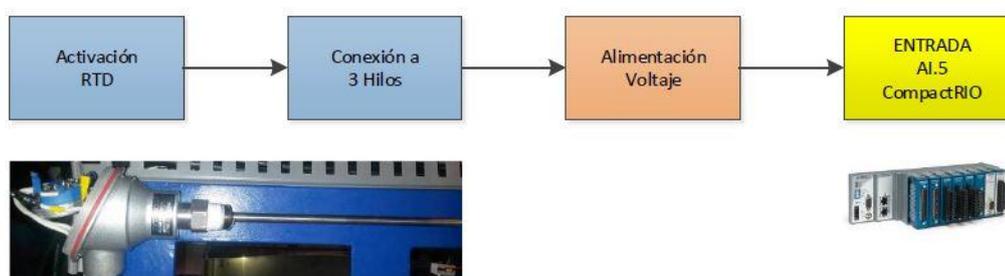
Para realizar la migración de los elementos de entrada, salida y determinar el modelo adecuado en el proceso se realiza los correspondientes diagramas de control los cuales se detallan a continuación:

### 3.3.1 Circuito en la entrada del controlador para el sensor RTD

Para el control del proceso se utiliza un sensor RTD PT-100, el mismo emplea la conexión a tres hilos, este modo es usado típicamente en los controles industriales debido a que soluciona un problema generado en los cables dando un error en la lectura de la temperatura. Para esta conexión se necesita únicamente que los hilos tengan una misma resistencia ya que la medición esta basada en el puente de Wheatstone .

Para la activación del sensor se emplea el siguiente diagrama de control, como se muestra en la Figura 3.8.

**Figura 3.8** Diagrama de bloques del sensor RTD en el proceso de temperatura



**Elaborado por:** Juan Mera, Wilson Santos

Además, la lectura para la temperatura tiene que funcionar con la conexión establecida debido a que la gran parte de controladores industriales vienen prediseñados para la conexión RTD PT-100 a tres hilos. La conexión a tres hilos se muestra en el Anexo H.

El sensor se encuentra calibrado bajo sus propias normas de funcionamiento, es decir que tiene un rango de medición de temperatura de 0 °C a 150 °C con la salida estandarizada en corriente de 4 mA a 20 mA. (Arian Control & Instrumentacion, n.d.)

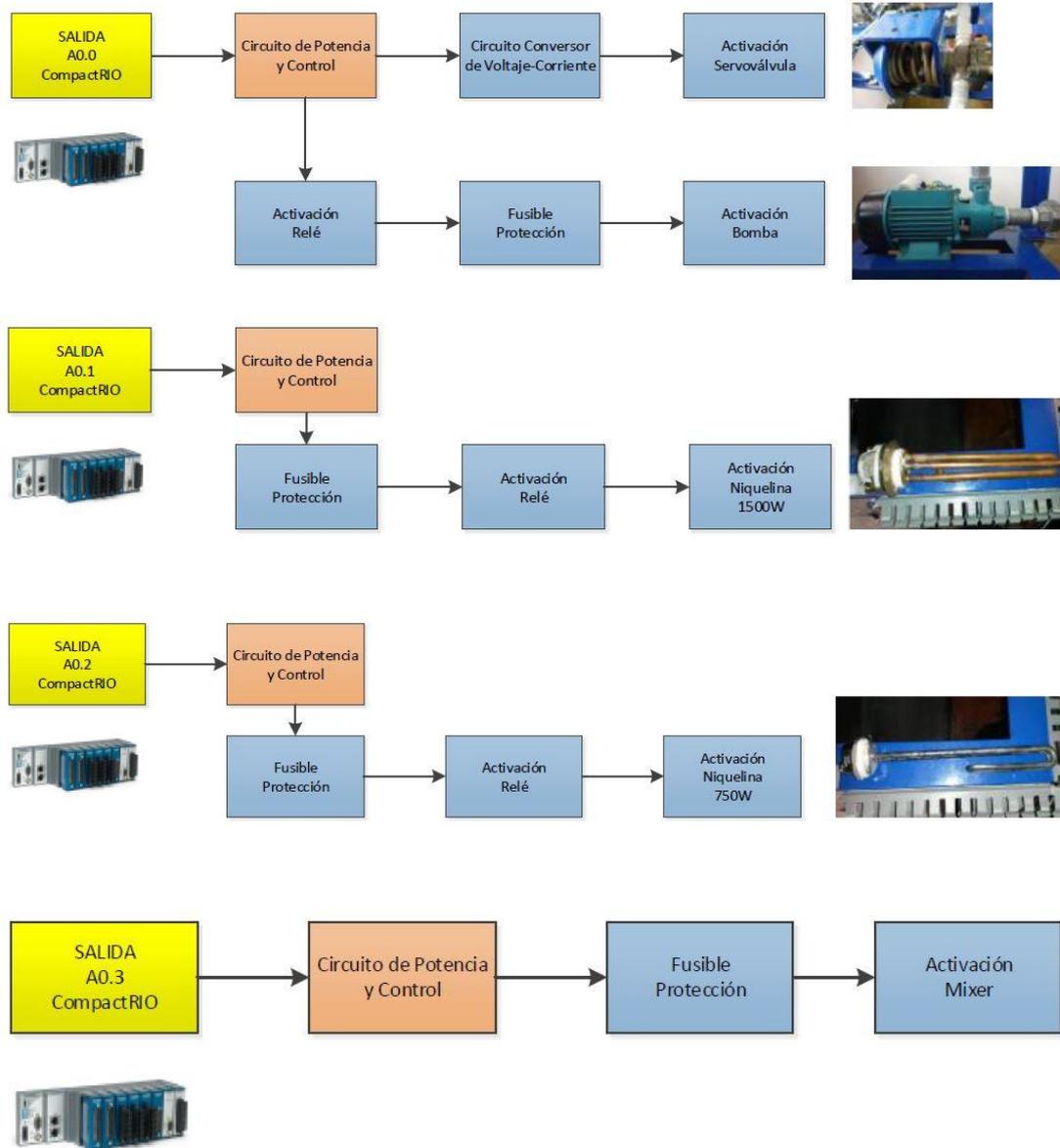
Estos valores estándar se los muestra en el Anexo F.

### 3.3.2 Circuitos adicionales en las salidas del proceso de temperatura

Para realizar la migración de los elementos de salida y determinar el modelo adecuado en el proceso se realiza los correspondientes diagramas de control de cada actuador como se detalla a continuación:

Para la activación de las salidas del proceso se emplea un circuito que separa la parte de control y la parte de potencia como se muestra en la Figura 3.9. Los esquemas electrónicos se muestran en los Anexos K y L.

**Figura 3.9** Diagrama de bloques de los actuadores en el proceso de temperatura

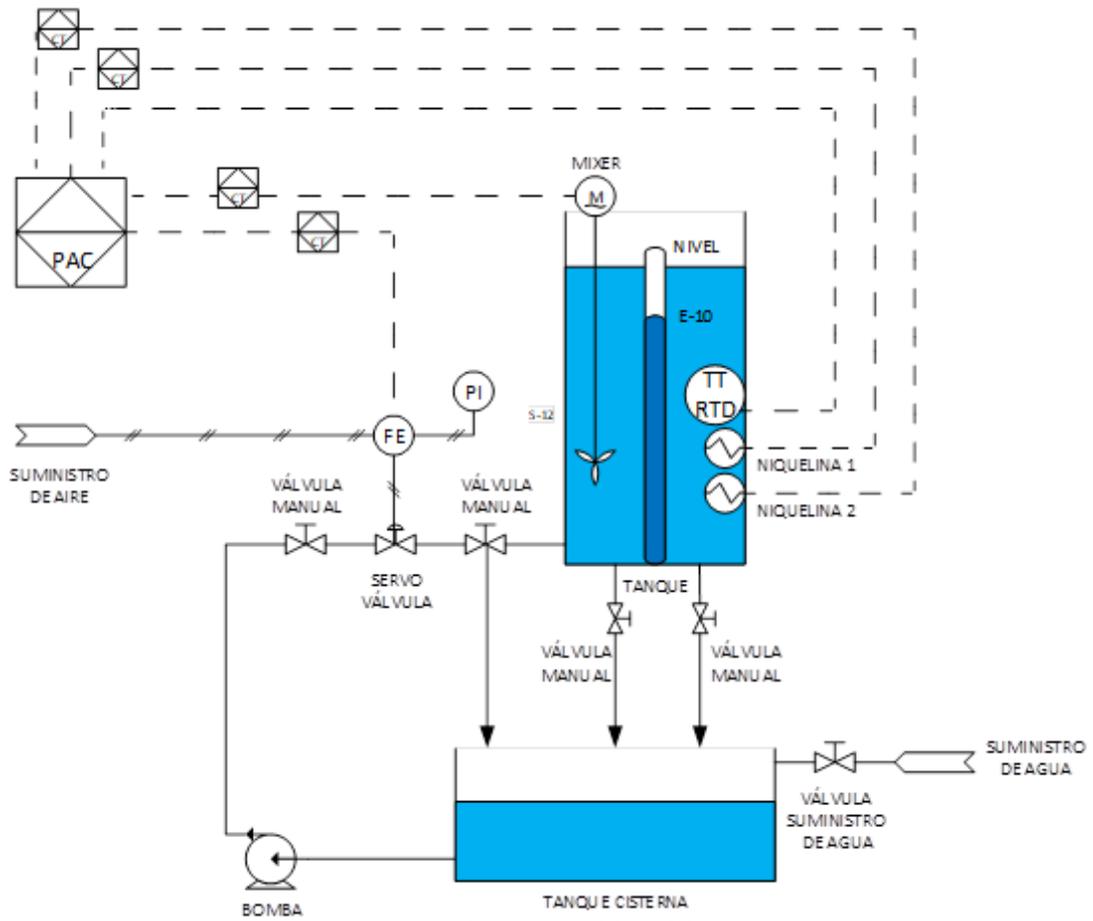


**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

Estos circuitos permiten que los actuadores utilizados reciban un pulso de voltaje (5V) por medio del CompactRIO-9073 para su control en el proceso de temperatura.

Para la activación de la servoválvula se utiliza adicionalmete un circuito conversor de voltaje a corriente como se muestra en la Figura 3.9.

**Figura 3.10** Diagrama P&ID para el control de la planta



Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

**Tabla 3.2** Nomenclatura diagrama PI&D

NOMENCLATURA			
SIMBOLO	NOMBRE	SIMBOLO	NOMBRE
	Controlador PAC		Indicador de presión
	Circuito adicional		Flujo transmisión separado
	Mixer		Válvula manual
	Bomba		Servoválvula
	Sensor RTD PT-100		Suministro aire-agua
	Niquelina		Tanque

Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

En la Figura 3.10 se visualiza el diagrama P&ID de los elementos que actúan en los procesos del control PID y PFC en la planta con sus conexiones.

### 3.4 IDENTIFICACIÓN Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL EN EL PROCESO DE TEMPERATURA

Para la identificación del sistema en el proceso primero se genera de forma experimental el modelo de un sistema dinámico que se apegue con mayor porcentaje de exactitud a las propiedades dinámicas del mismo, partiendo de datos obtenidos tanto en la salida como en la entrada pertenecientes al sistema. El diagrama general de la identificación del proceso se describe en la Figura 3.11.

**Figura 3.11** Diagrama de identificación del sistema



**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

La identificación del modelo de un sistema dinámico en la planta de temperatura se lleva a cabo por medio del programa MATLAB con su herramienta IDENT para encontrar el modelo matemático de la planta representado por ecuaciones de estados.

En consecuencia la ecuación matemática obtenida se la emplea al control PID como también es aplicado luego de discretizarla al algoritmo del control predictivo funcional PFC, en el software LabVIEW.

Para elaborar la identificación del sistema dinámico se elaboran ensayos que consisten en forzar las entradas del sistema para posteriormente calibrar la respuesta del proceso. Entonces este tendrá como característica, ser un sistema de lazo cerrado con su respectiva realimentación.

#### 3.4.1 Obtención de datos

Para efectuar el modelamiento del sistema primero se obtiene los valores de la salida y de la entrada del comportamiento de la planta, el modelo y las etapas posteriores para establecer el correspondiente sistema dependerán exclusivamente de los mismos.

Por lo que es necesario tener en cuenta parámetros como tipo de entrada del sistema, dinámica del proceso, rangos apropiados de medición, número de muestras generadas durante los ensayos, tiempo muerto del sistema y la frecuencia de muestreo en el proceso.

Las señales de entrada son proporcionadas por el sensor RTD PT-100 partiendo con la de temperatura ambiente del agua (18 °C), luego se establece una temperatura máxima (55 °C). Al identificar este valor las niquelinas llegan a la temperatura límite de calentamiento en el proceso y se desactivan automáticamente, este es el rango de temperatura en el cual se basa el análisis de los controles PID y PFC.

Estos datos se obtienen con la ayuda de un termómetro especial el cual puede medir altas temperaturas en el agua, finalmente con un multímetro se consiguen las mediciones de corriente y voltaje del sensor RTD.

En la Tabla 3.3 se detalla los parámetros para desarrollar el algoritmo matemático para el proceso.

**Tabla 3.3** Parámetros del proceso de temperatura para el algoritmo PFC

Temperatura (°C)	Corriente (mA.)	Voltaje (V)
0	4,6858	1,3285
5	5,3108	1,506
10	5,9358	1,6835
15	6,5608	1,861
18	6,950	1,974
20	7,220	2,050
25	7,700	2,177
30	8,430	2,390
35	9,090	2,582
40	9,720	2,760
45	10,350	2,935
50	10,950	3,104
55	11,5	3,265

**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

El controlador PFC posee la capacidad de controlar sistemas de múltiples entrada y múltiples salidas sistemas que se los conoce como MIMO, el cual permite la manipulación de las salidas de acuerdo a las entradas que influyen en el proceso dependiendo de la planta y mejorando la ganancia del controlador.

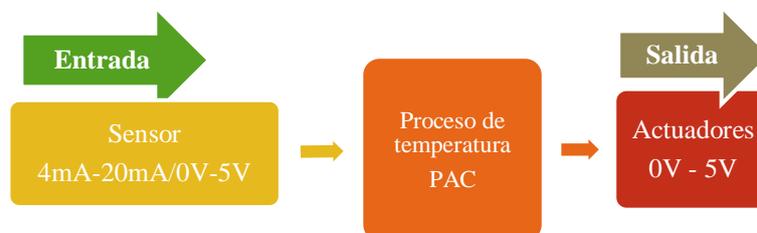
Para el caso SIMO que es el que constituye el estudio del control de temperatura, se lo utiliza ya que controla una entrada y varias salidas durante el proceso.

El sensor RTD de entrada proporciona una señal de voltaje que corresponde a valores de 0V a 5V, estos valores ingresan al controlador CompactRIO-9073 para verificar la medida de temperatura que se registra, en la salida se entrega la señal de voltaje de 0V a 5V para los actuadores, los cuales participan para regular la temperatura del proceso.

Durante la experimentación del modelamiento matemático será considerada perturbación externa a una entrada diferente a la del sensor RTD.

Mediante la Figura 3.12 se puede visualizar una representación de las entradas y salidas con sus límites de magnitud.

**Figura 3.12** Representación de entradas y salidas en el proceso de temperatura



**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

### 3.4.2 Adquisición de datos

Con la previa obtención de los datos, el siguiente paso para el modelamiento del sistema es la adquisición de datos en el hardware y software en el proceso de temperatura para lo cual se utiliza LabVIEW proporcionado por National Instruments.

El controlador a utilizarse es el CompactRIO-9073 mismo que comunica los datos obtenidos a un computador para su almacenamiento en el software de LabVIEW.

Debido a que los elementos de la planta de temperatura operan con corriente y el controlador CompactRIO-9073 funciona con voltaje, se agrega un convertor corriente-voltaje.

En la Figura 3.13 se visualiza un diagrama de bloques para la adquisición de datos del proceso.

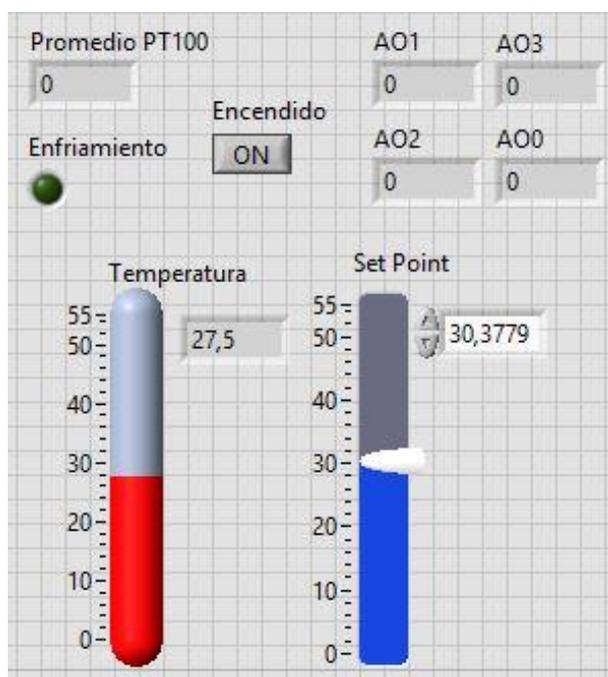
**Figura 3.13** Diagrama de bloques de hardware para la adquisición de datos



**Fuente:** Juan Mera, Wilson Santos

El panel de control frontal es la interfaz de usuario para el VI de LabVIEW esta contiene los controles e indicadores que se utilizan para crear el algoritmo de predicción en el proceso, este panel se visualiza en la Figura 3.14.

**Figura 3.14** Adquisición de datos, LabVIEW panel frontal



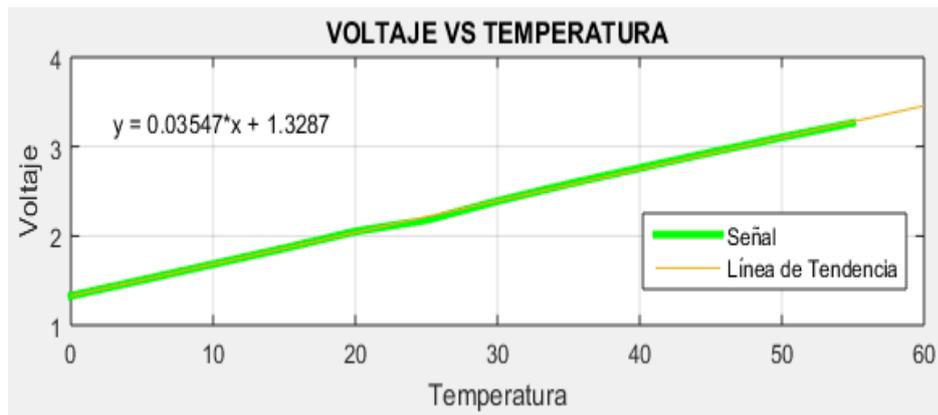
**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

El panel de diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico que define la funcionalidad del VI de LabVIEW aquí se ejecuta la estructura del programa, su algoritmo y respectiva función en el sistema.

Para la adquisición son tomadas las muestras a la entrada analógica AI.5 luego se realiza un pre-escalamiento de señales para que envíe voltaje por las salidas analógicas AO.0, AO.1, AO.2, AO.3 mismas que se ubican en el CompactRIO-9073, este panel se muestra en la Figura 3.15.



**Figura 3.16** Curva de comportamiento del voltaje en la planta



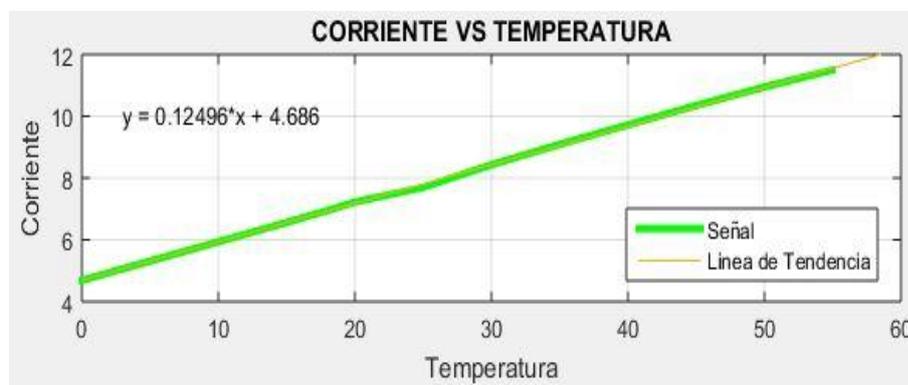
**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

Este análisis permite obtener la ecuación de comportamiento con respecto al voltaje que se generan con los datos del proceso, la cual se muestra en la Ecuación 3.1.

$$y = 0,03547x + 1.3287 \quad \text{Ec. ( 3.1 )}$$

Se visualiza la curva de comportamiento de las mediciones de la corriente a diferentes temperaturas en la Figura 3.17.

**Figura 3.17** Curva de comportamiento de la corriente en la planta.



**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

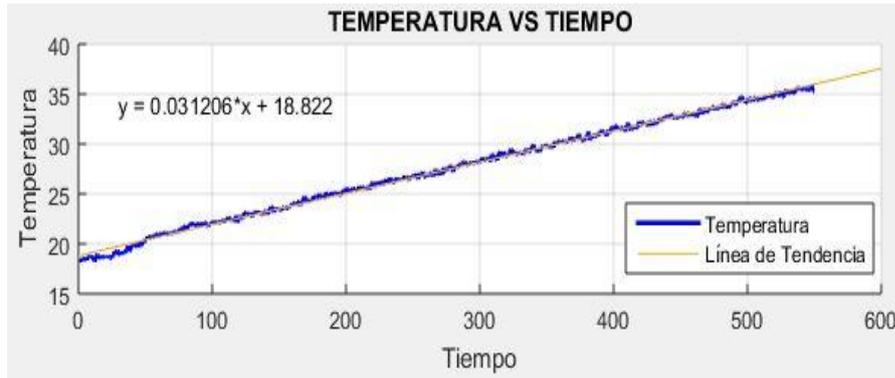
Este análisis permite obtener la ecuación de comportamiento con respecto a la corriente que se genera con los datos del proceso, la cual se muestra en la Ecuación 3.2.

$$y = 0,12496x + 4,686 \quad \text{Ec. ( 3.2 )}$$

En la Figura 3.18 se muestra la curva de comportamiento real de la temperatura en el tiempo, la toma de muestras se las obtiene con la planta en funcionamiento mediante

el software LabVIEW con el programa de la sección 3.4.2 con la herramienta Write To Measurement la cual guarda las muestras en el software Excel y posteriormente importadas al Matlab, se toma una muestra por cada segundo en un rango de calentamiento del agua desde los 18°C temperatura ambiente del agua hasta los 35°C, el tiempo que se demora el proceso es de 550 segundos.

**Figura 3.18** Curva de comportamiento de temperatura en tiempo real de la planta



**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

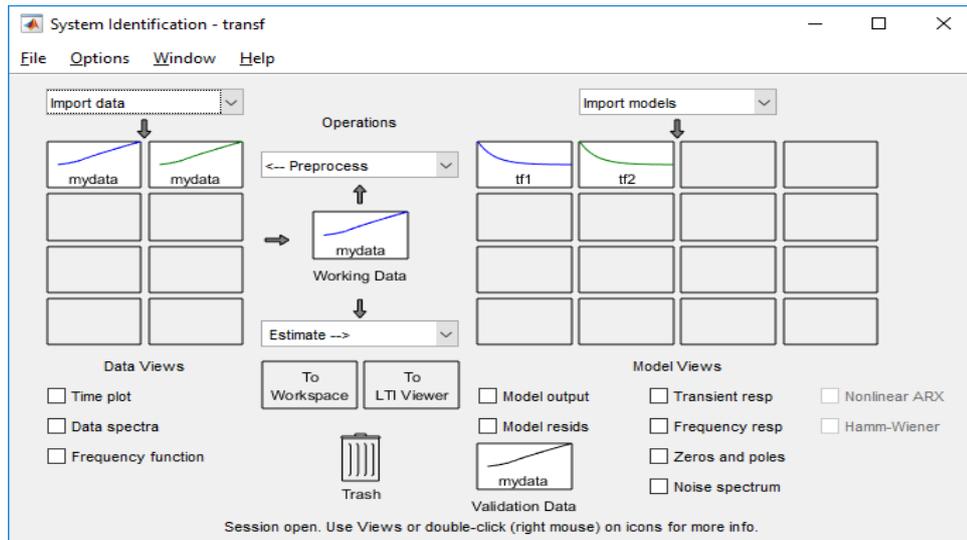
Este análisis permite obtener la ecuación de comportamiento con respecto a la temperatura en el tiempo que se generan con los datos del proceso, la cual se muestra en la Ecuación 3.3.

$$y = 0.031206x + 18.822 \quad \text{Ec. ( 3.3 )}$$

### 3.4.3.2 Obtención del modelo matemático

Realizada la adquisición de datos con los parámetros anteriores, se lo importa al workspace de Matlab luego estos valores se insertan en la herramienta IDENT como lo indica la Figura 3.19.

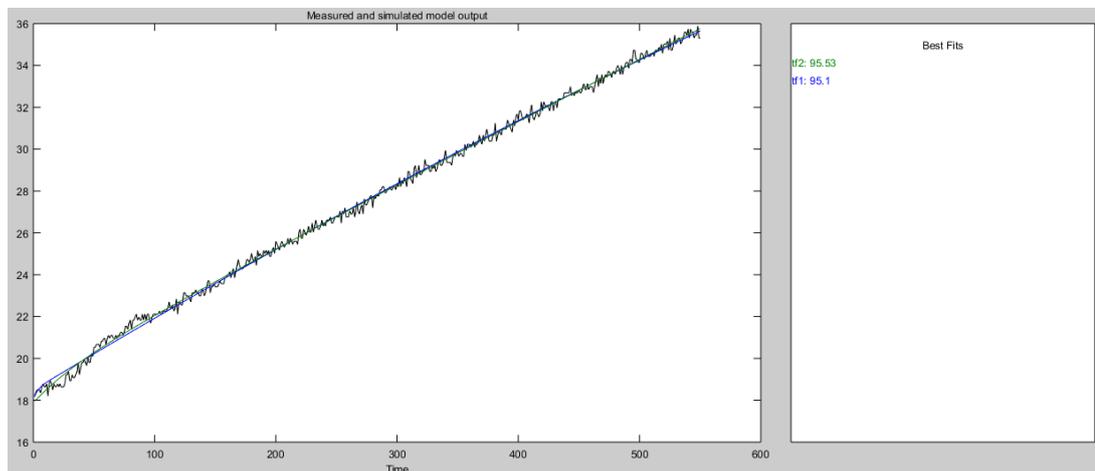
**Figura 3.19** IDENT de Matlab para la obtención del modelo matemático



**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

De las funciones de transferencia obtenidas se realiza la comparación con las muestras importadas y con la ayuda de la herramienta Model Output se escoge la de mayor aproximación en este caso la tf2 con el 95,53% como se muestra en la Figura 3.20.

**Figura 3.20** Gráficas de las funciones de transferencia obtenidas

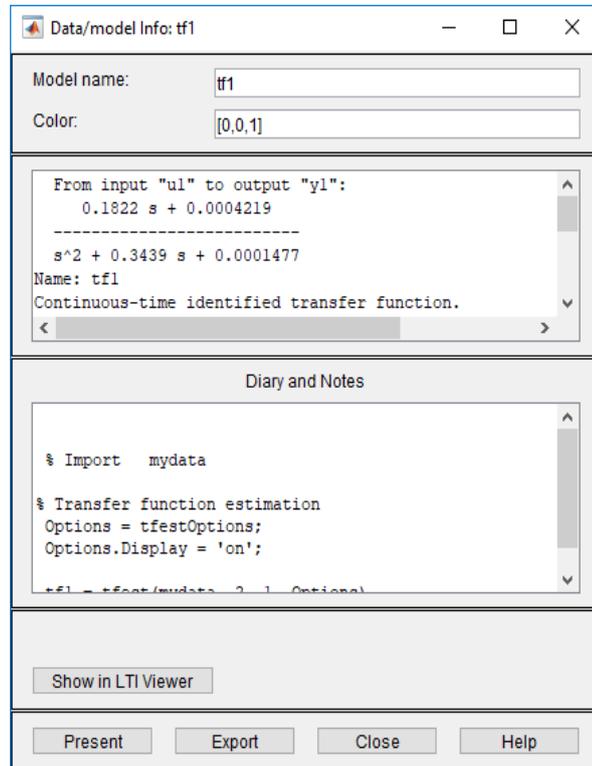


**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

Se puede representar los valores de manera gráfica ya sea en dominio de frecuencia o mediante dominio de tiempo. Los ensayos que se ejecutaron en el proceso se representan en función del tiempo.

En la Figura 3.21 se observa la reacción de la salida (Temperatura) según las entradas escalón de corriente pre-escaladas anteriormente que reproducen la excitación del sistema.

**Figura 3.21** Función de transferencia del proceso



**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

De esta manera se obtiene el modelo matemático de la planta este modelo se acoge a la respuesta dinámica del proceso, mismo que se muestra en la Ecuación 3.4 el cual es utilizado para realizar el control PID.

$$G(s) = \frac{0,1822 s - 0,0004219}{s^2 + 0,3439 s + 0,0001477} \quad \text{Ec. ( 3.4 )}$$

De la función de transferencia obtenida mediante la aplicación IDENT de Matlab se realiza la discretización del sistema con un tiempo muerto de 60 segundos, La función discreta se obtiene con el comando “c2d” de Matlab: este procedimiento se muestra en la Figura 3.22.

**Figura 3.22** Función discreta del proceso

```
>> T=60

T =

    60

>> tf(tf1)

ans =

    From input "u1" to output "y1":
    0.1822 s + 0.0004219
    -----
    s^2 + 0.3439 s + 0.0001477

Name: tf1
Continuous-time transfer function.

>>

    From input "u1" to output "y1":
    0.1543 z^-1 - 0.154 z^-2
    -----
    1 - 1.709 z^-1 + 0.709 z^-2
```

**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

La función discreta es una herramienta que sirve en el desarrollo del algoritmo en el control PFC del sistema, la cual se muestra en la Ecuación 3.5.

$$G(z) = \frac{0,1543 z^{-1} - 0,154 z^{-2}}{1 - 1,709 z^{-1} + 0.709 z^{-2}} \quad \text{Ec. ( 3.5 )}$$

Con la función discreta calculada se realiza la siguiente igualdad donde el parámetro T es la temperatura y V es el voltaje respectivamente. En consecuencia se obtiene la ecuación en diferencias, la cual se indica en la Ecuación 3.6.

$$T = 1,709T_{-1} - 0,709T_{-2} - 0,1543V_{-1} + 0,154V_{-2} \quad \text{Ec. ( 3.6 )}$$

Esta ecuación será empleada con el algoritmo de control, en un Math Script de LabVIEW en el programa del controlador PFC. La herramienta IDENT presenta varios tipos de modelos, dependiendo de la aplicación, al utilizarse ecuaciones en espacio de estados se define el modelo directamente bajo esta representación.

#### **3.4.4 Validación del modelo**

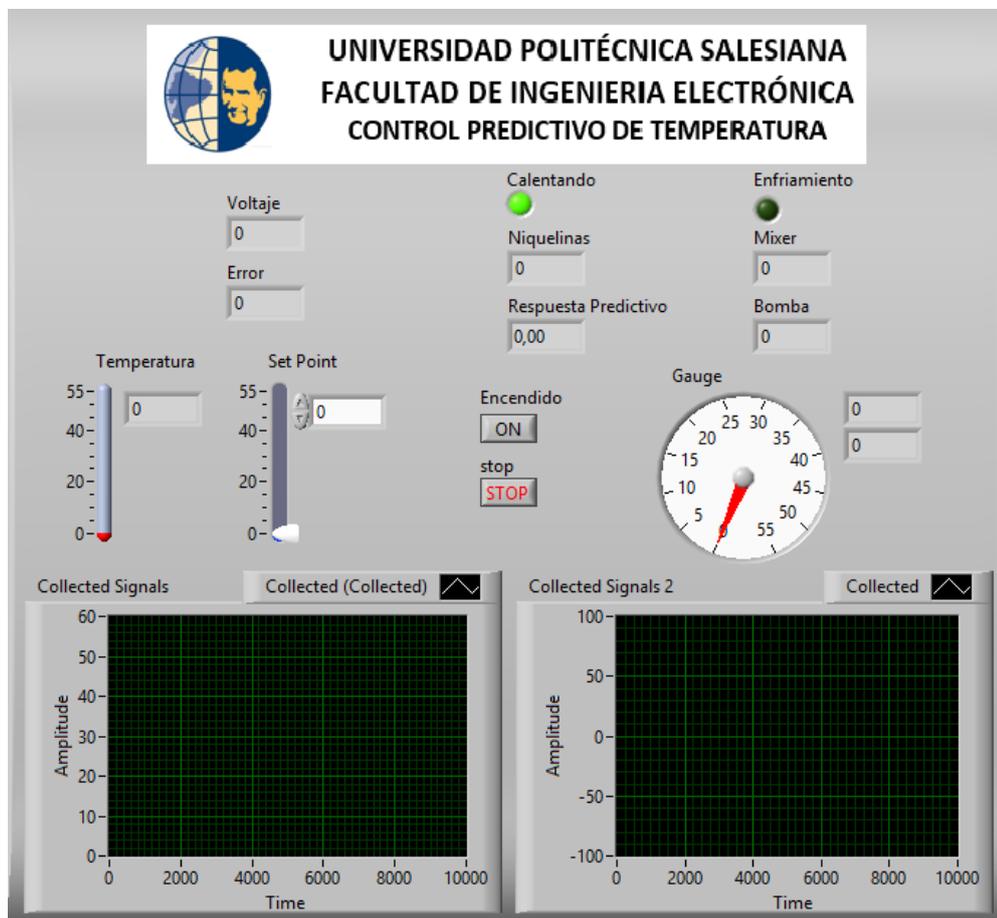
A continuación se comprueba la validez del modelo para ejecutarlo al proceso real, para eso se evalúa que el orden del modelo sea el indicado para el sistema. Al aumentar el orden se tienen un modelo mejorado pero no siempre los modelos con un

orden alto son los mejores al ejecutarse debido a que los mismos presentan una reducción en la coincidencia del sistema.

El algoritmo del proceso nos permite crear un controlador predictivo basado en modelos para su posterior implementación, este tipo de controlador requiere de una inicialización con parámetros específicos.

El panel de control frontal será la interfaz de usuario para el VI de LabVIEW esta contiene los controles e indicadores que se utilizan para crear el algoritmo de predicción en el proceso, este panel se visualiza en la Figura 3.23.

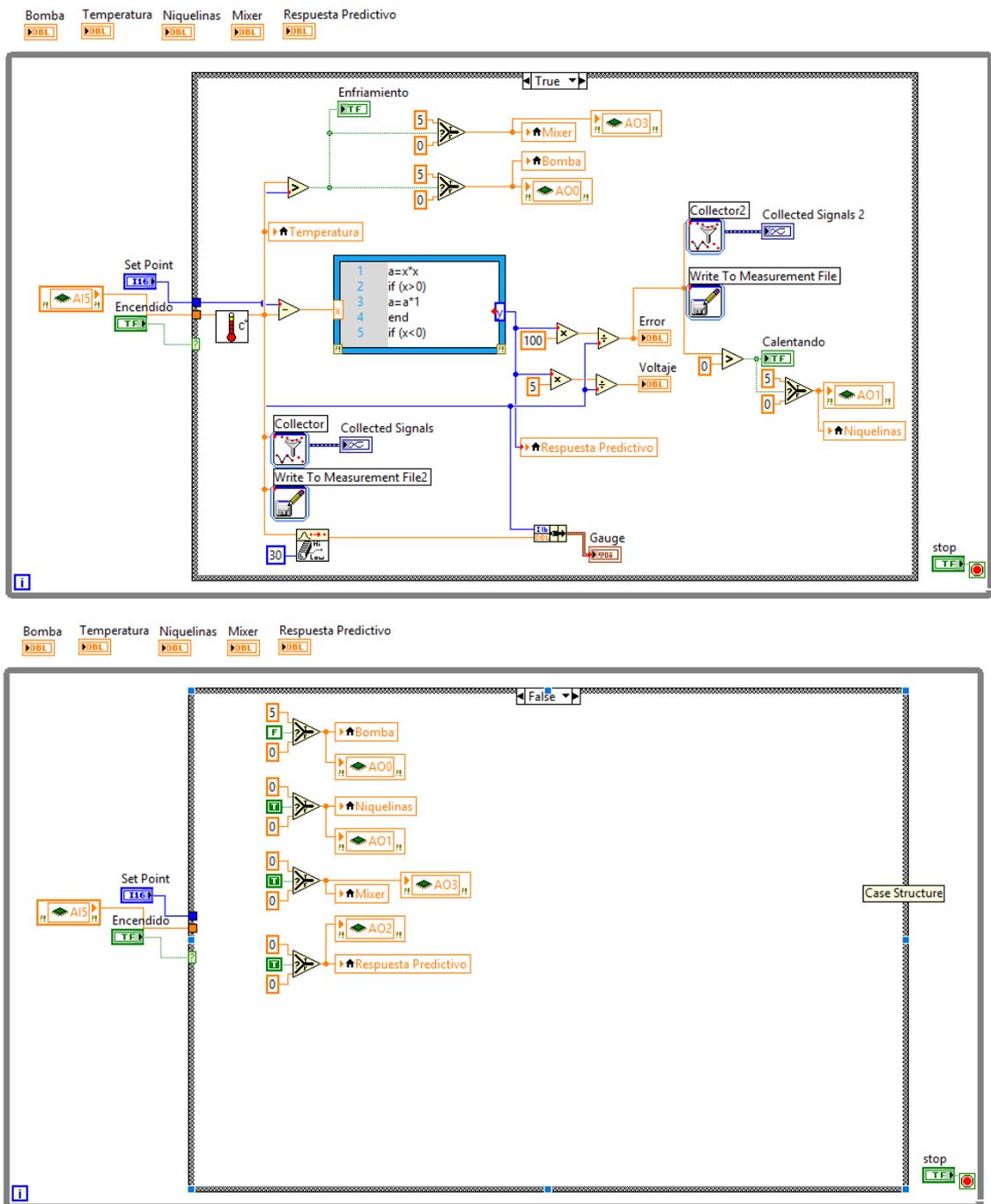
**Figura 3.23** Panel frontal de LabVIEW del controlador PFC



**Fuente:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

Ahora se presenta de diagrama de bloques, este contiene el código fuente grafico que define la funcionalidad del VI de LabVIEW aquí se ejecuta la estructura del programa, su algoritmo y respectiva función en el sistema, este programa se visualiza en la Figura 3.24.

**Figura 3.24** Panel de control en LabVIEW del controlador PFC



**Fuente:** Juan Mera, Wilson Santos

Una vez seleccionado el orden del modelamiento del sistema se lleva a cabo pruebas con el modelo determinado para que en la ejecución del proceso coincida en porcentajes similares a cualquier tipo de entrada si durante la ejecución del proceso se tiene un modelo eficiente este se acepta como válido.

### 3.5 Desarrollo de un de un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) convencional en el CompactRIO-9073

A continuación, se describe la implementación en hardware y software del controlador PID en tiempo real que funciona de forma autónoma, también el acondicionamiento de las señales de entrada-salida para adquirir y procesar las señales.

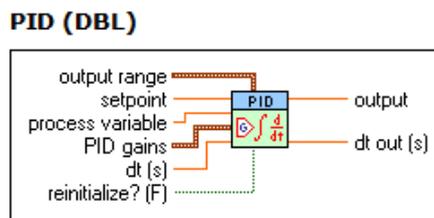
El control PID en el área industrial se aplica frecuentemente debido a que este tipo de controlador tiene una implementación factible para emplearse, esto se debe al toolkit que posee LabVIEW.

Debido a que este control es de carácter analógico, para su funcionamiento se necesitan los siguientes elementos:

- a. La entrada de referencia generada por el sensor.
- b. La realimentación que representa el setpoint en el proceso.
- c. La salida que representa la acción de control misma que será condicionada por los parámetros de sus acciones proporcionales, derivativas e integrales.

En la barra de funciones de LabVIEW se utiliza la herramienta CONTROL DESING & SIMULATION en la cual se encuentra el icono PID para ingresar sus respectivos parámetros, en la Figura 3.25 se detalla las componentes del subVI PID.

**Figura 3.25** Diagrama subVI PID en LabVIEW



**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

Donde el icono del PID de LabVIEW proporciona como estándar las siguientes características:

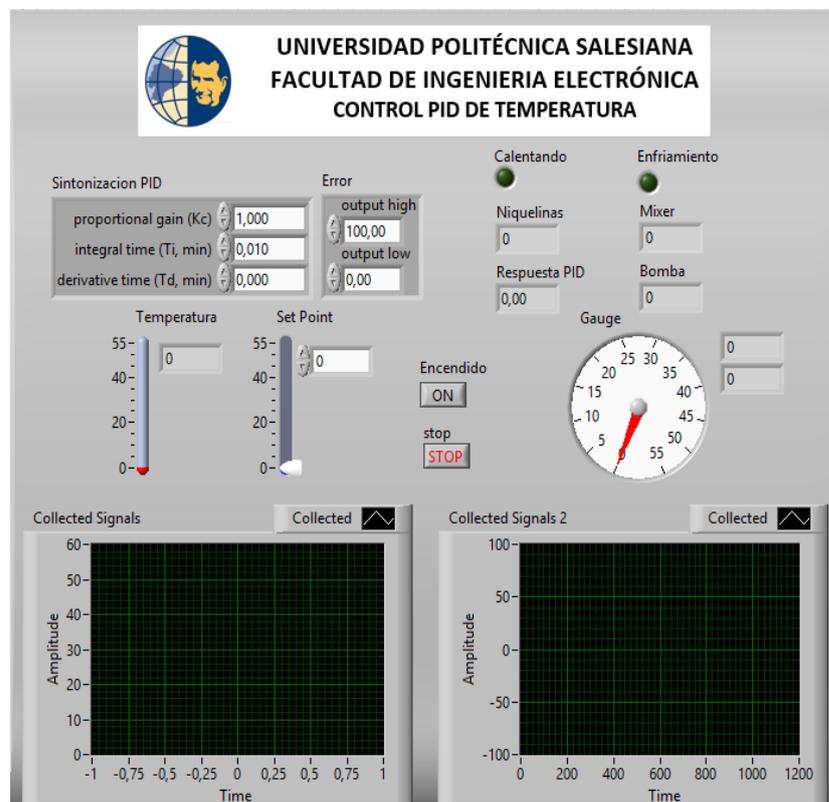
- Setpoint: Es la referencia del PID.
- Process variable: Es el valor de la variable de proceso o de retroalimentación.

- PID gains (PID parámetros): Es el conjunto de las ganancias de las tres acciones: Ganancia Proporcional  $K_c$ , Constante de Tiempo Integral  $T_i$ , Constante de Tiempo Derivativa  $T_d$ .
- Output rango (Rango de salida). Permite ingresar el valor de error máximo y mínimo a la salida en el controlador.
- Output (Salida): Salida del algoritmo de control, es decir proporciona la acción de control.

Estos parámetros permiten implementar el controlador PID, destacando que los acondicionamientos de las variables son los mismos por lo tanto este subVI se implementa al controlador PID con la ayuda de esta herramienta de LabVIEW.

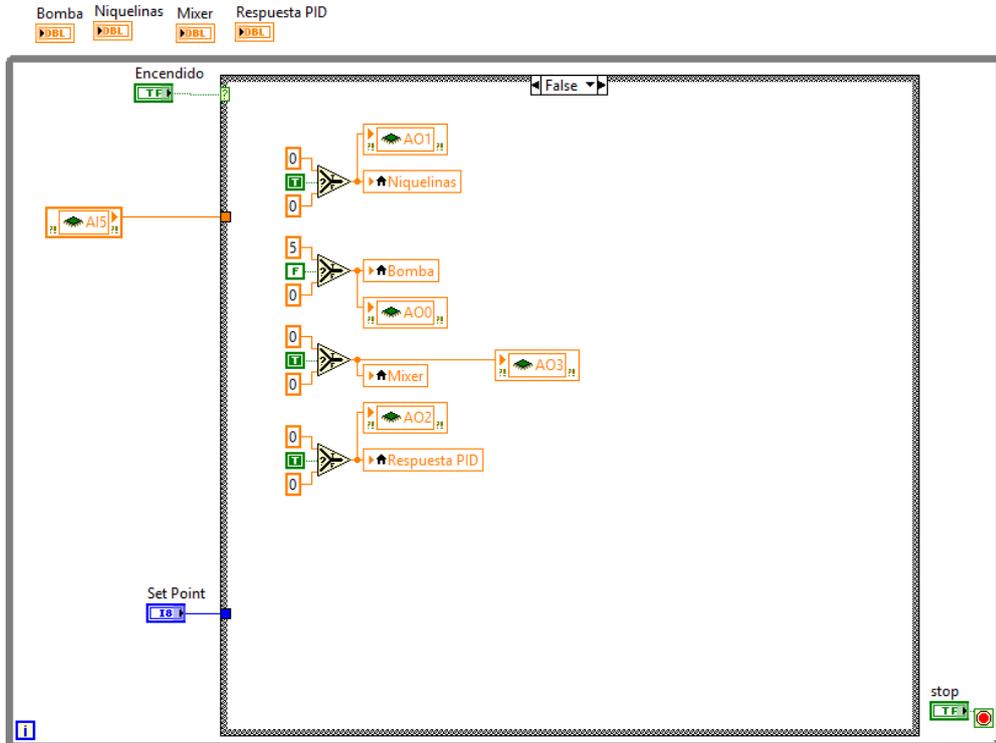
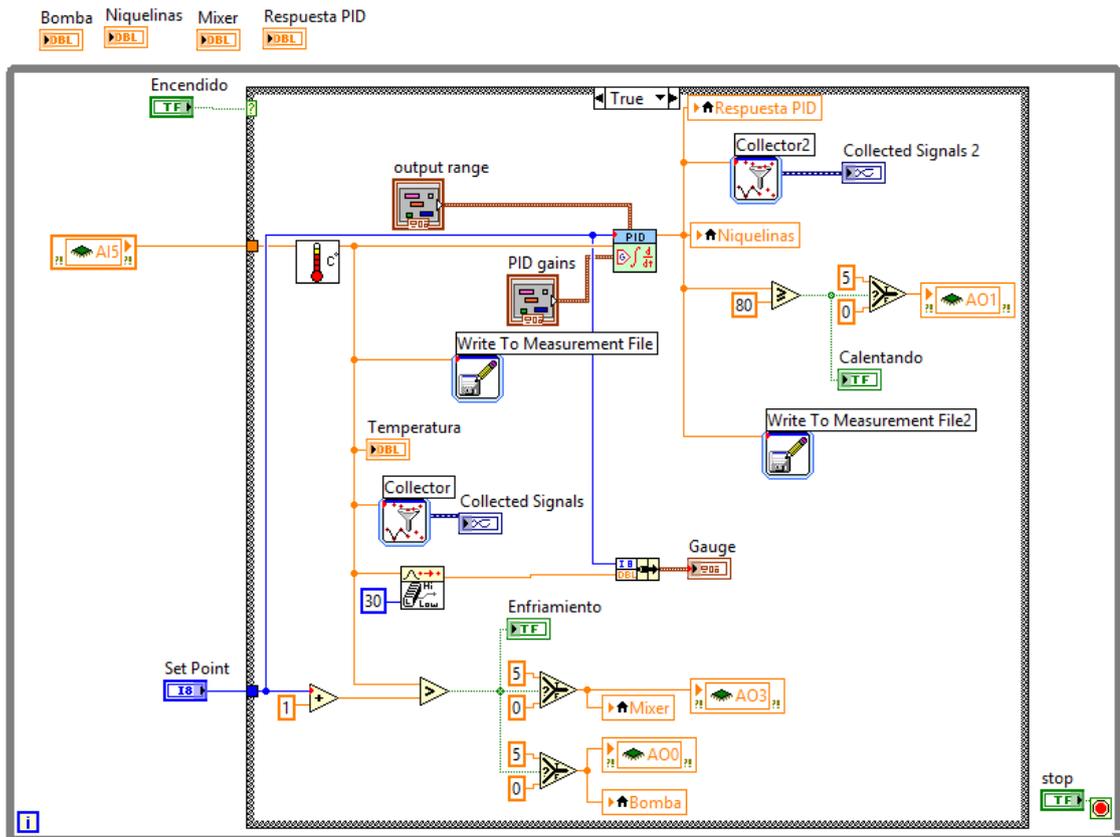
Además, se elabora los acondicionamientos correspondientes a través del software con los datos adquiridos en el CompactRIO-9073 durante el funcionamiento del proceso de temperatura. En las Figura 3.26 se muestra la programación del panel frontal de control en LabVIEW también el diagrama de bloques del controlador en tiempo real como se visualiza en la Figura 3.27.

**Figura 3.26** Panel de control Frontal del controlador PID



**Fuente:** Juan Mera, Wilson Santos

**Figura 3.27** Diagrama de bloques del controlador PID

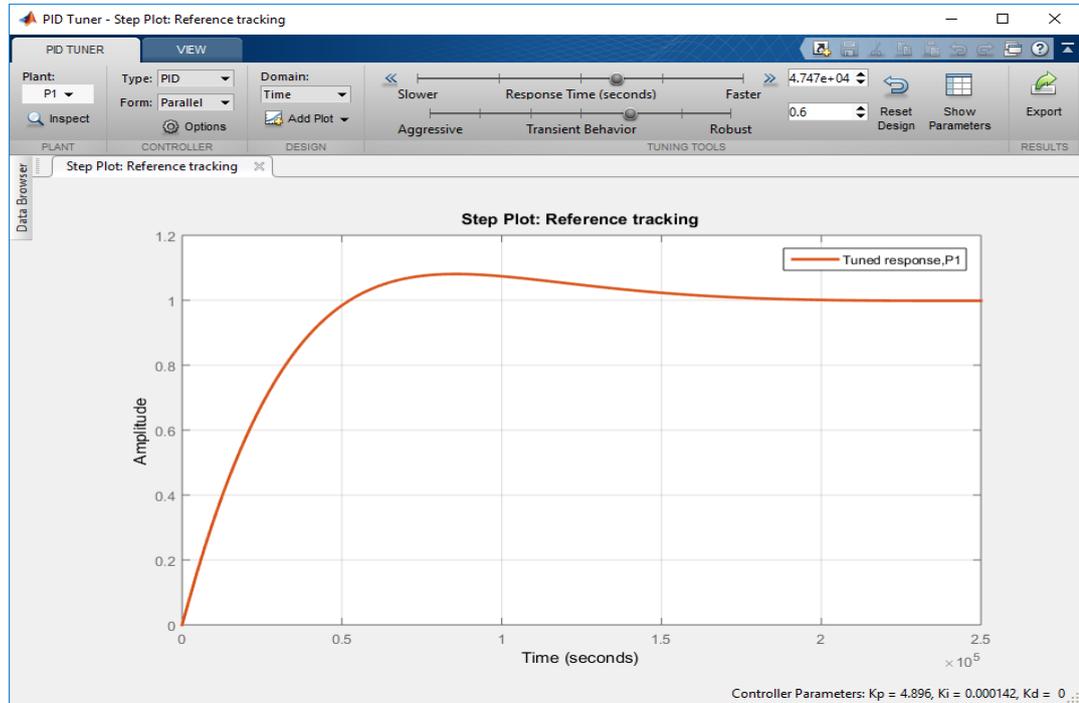


Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

### 3.4.1 Sintonización en el control PID del proceso de temperatura

En el control PID se realizó la sintonización de los valores óptimos de este tipo de control, estos parámetros son  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  con apoyo de la herramienta PID Tuner de Matlab.

**Figura 3.28** Valores de  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$  en PID Tuner



**Elaborado por:** Juan Mera, Wilson Santos

Esta herramienta permite disminuir el tiempo de estabilización y optimizar la salida del error. La sintonización del controlador con los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  se muestra en la Figura 3.28.

Valores de sintonización:

- **$K_p$** = 4,896
- **$K_i$** = 0.000142
- **$K_d$** = 0

## **CAPITULO IV**

### **4. PRUEBAS Y RESULTADOS**

En este capítulo se presenta las pruebas realizadas y los resultados obtenidos de la variable temperatura en la planta con la implementación de los controladores PID y Predictivo Funcional (PFC) en el CompactRIO-9073 , además de la comparación entre los controladores por medio de los parámetros IAE y el Test de Wilcoxon.

#### **4.1 FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PID CON LA VARIABLE TEMPERATURA EN LA PLANTA**

Para los resultados de las pruebas en la planta se implementó el controlador PID en el CompactRIO-9073 con los parámetros de sintonización del PID por medio de un algoritmo ejecutado en un programa del software LabVIEW.

Las medidas que se establecieron como set point (SP) del proceso son ingresadas en el rango de 18°C (temperatura ambiente del agua) hasta 55°C (temperatura para evitar el desgaste de las niquelinas en la planta), con el envío los datos en tiempo real se puede estabilizar el proceso en el set point seleccionado por la temperatura que fue sensada en la planta.

#### **4.2 RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PID CON LA VARIABLE TEMPERATURA EN LA PLANTA**

El control PID se ejecuta en la planta de temperatura con un set point de 22°C, el controlador estabiliza la temperatura en este valor mientras no exista una perturbación o hasta que se ingrese un nuevo set point en el proceso.

**Figura 4.1** Curva de comportamiento del controlador PID en la planta de temperatura con set point ( $22^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al tiempo



**Elaborado por:** Juan Calos Mera, Wilson Santos

En la Figura 4.1 se observa como al ingresar el registro de la temperatura del agua ( $19.5^{\circ}\text{C}$ ), el proceso se estabiliza cuando el set point llega a  $22^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 203 segundos. Durante los ensayos la estabilización de un grado de temperatura del proceso fue de aproximadamente 60 segundo, además se muestra que el Máximo sobre-impulso es de  $22.78295^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.3 FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PREDICTIVO PFC CON LA VARIABLE TEMPERATURA EN LA PLANTA**

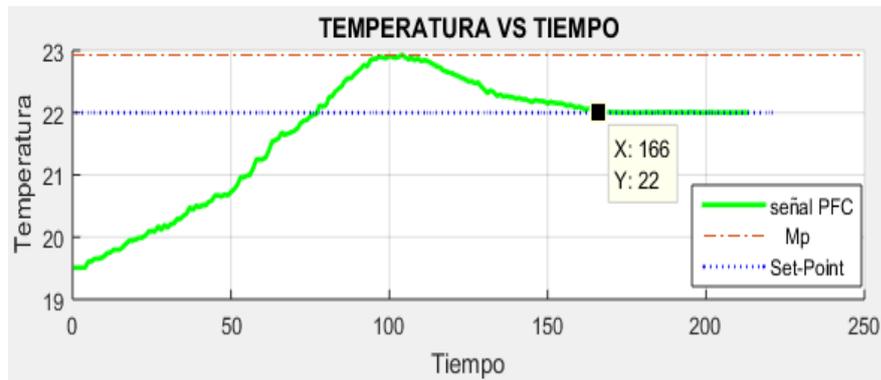
Para los resultados de los ensayos de la planta se implementó el controlador predictivo PFC en el CompactRIO-9073 mediante la función de transferencia y su correspondiente función discreta, este proceso se realizó en la sección 3.5.5.

Las medidas que se establecieron como set point (SP) del proceso son ingresadas en el rango de  $18^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente del agua) hasta  $55^{\circ}\text{C}$  (temperatura para evitar el desgaste de las niquelinas en la planta), con el envío los datos en tiempo real se puede estabilizar el proceso en el set point seleccionado por la temperatura que fue sensada en la planta.

#### **4.4 RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PREDICTIVO PFC CON LA VARIABLE TEMPERATURA EN LA PLANTA**

El control predictivo PFC se ejecuta en la planta de temperatura con un set point de  $22^{\circ}\text{C}$ , el controlador estabiliza la temperatura en este valor mientras no exista alguna perturbación o hasta que se ingrese un nuevo set point en el proceso.

**Figura 4.2** Curva de comportamiento del controlador predictivo PFC en la planta de temperatura con set point ( $22^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al tiempo



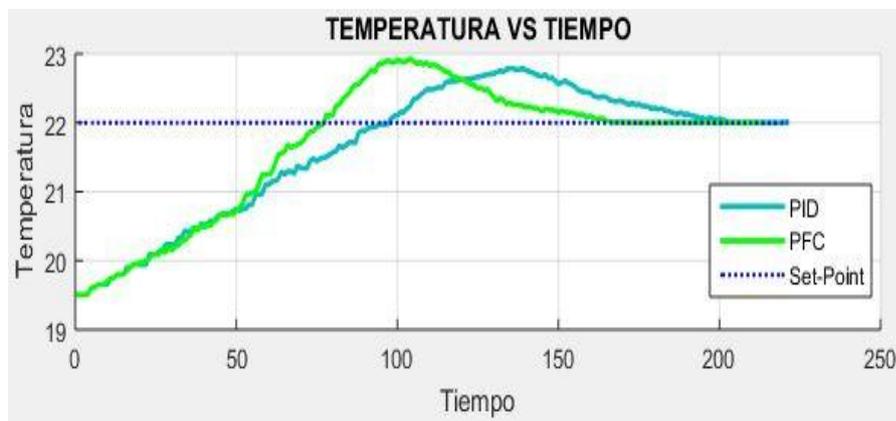
**Elaborado por:** Juan Calos Mera, Wilson Santos

En la Figura 4.2 se observa como al ingresar el registro de la temperatura del agua ( $19.5^{\circ}\text{C}$ ), el proceso se estabiliza cuando el set point llega a  $22^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 166 segundos. Durante los ensayos la estabilización de un grado de temperatura del proceso fue de aproximadamente 60 segundo, además se muestra que el Máximo sobre-impulso es de  $22.9274^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.5 COMPARACIÓN ENTRE EL CONTROL PID Y EL CONTROL PREDICTIVO PFC

Al realizar la comparación del comportamiento entre los controles PID y PFC se obtiene las siguientes curvas de comportamiento en la planta fijando el set point en  $22^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 4.3** Comparación del comportamiento entre el controlador PID y PFC en la planta de temperatura con set point ( $22^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al tiempo



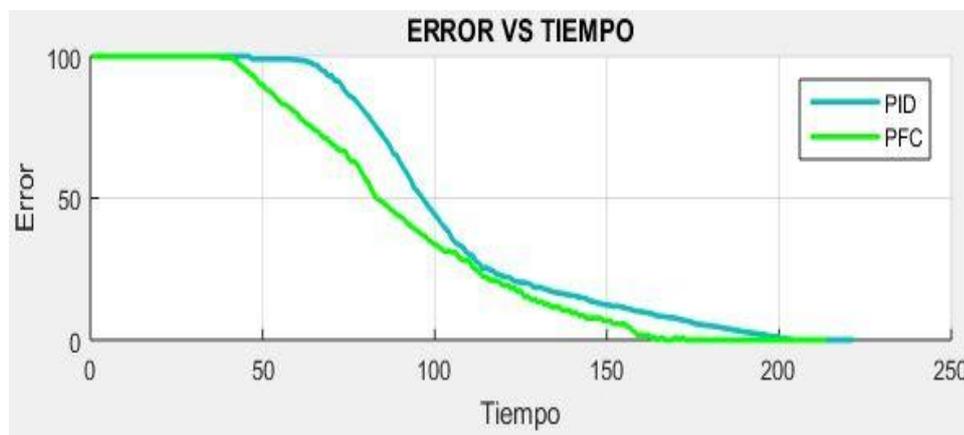
**Elaborado por:** Juan Calos Mera, Wilson Santos

En la Figura 4.3 se realiza la comparación de las señales de salida del proceso de temperatura en la planta en consecuencia se aprecia que la señal del control predictivo PFC se estabiliza antes que la señal del control PID en el set point señalado también se visualiza que el controlador predictivo PFC tiene un  $M_p$  mayor que el controlador PID.

A continuación se presenta las curvas de respuesta del error de estabilización de cada controlador, aquí se muestra que el error tiene un valor de inicio del 100% mientras el proceso se estabiliza este valor disminuye hasta llegar a 0%.

Este proceso se mantiene estable hasta que exista una perturbación o se cambie el valor del set point del proceso. En la Figura 4.4 se visualiza que la curva del error de establecimiento del controlador predictivo PFC es menor y a la vez que tarda menos tiempo en llegar al 0% que el error de establecimiento del controlador PID.

**Figura 4.4** Comparación del error de estabilización entre el controlador PID y PFC en la planta de temperatura con set point ( $22^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al tiempo



**Elaborado por:** Juan Calos Mera, Wilson Santos

#### **4.6 RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE LOS ÍNDICES DE DESEMPEÑO IAE ENTRE EL CONTROL PID Y EL CONTROL PREDICTIVO PFC**

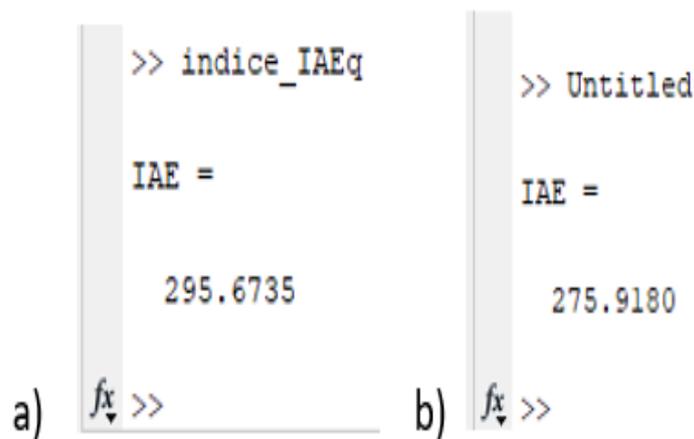
Al ser la temperatura un proceso con mediciones en tiempo real, este se lo determina en un rango específico para así determinar los índices de desempeño IAE en el set point definido durante el funcionamiento del sistema predictivo.

Para la obtención de los datos del índice de desempeño IAE se realizó la programación en el software Matlab por medio de las muestras obtenidas.

Al ejecutar los comandos que se visualizan en la Figura 4.5 se visualiza el valor IAE de cada controlador.

El Programa para cálculo del índice de desempeño IAE se lo puede visualizar en el Anexo 11.

**Figura 4.5** a) Índice de desempeño IAE control PID y b) Índice de desempeño IAE control PFC



**Elaborado por:** Juan Calos Mera, Wilson Santos

También se presenta en la Tabla 4.1 los valores del índice de desempeño IAE obtenidos durante la ejecución de los controladores:

**Tabla 4.1** Valores del índice de desempeño IAE del comportamiento para el control PID y el control predictivo PFC.

SP (°C)	PID			PFC		
	Ts (s)	Mp (%)	IAE	Ts (s)	Mp (%)	IAE
22	203	3,59	295,6735	166	4,22	275,9180

**Elaborado por:** Juan Calos Mera, Wilson Santos

#### **4.7 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO ENTRE EL CONTROL PID Y EL CONTROL PFC, DE ACUERDO AL IAE ÍNDICE DE ERROR ABSOLUTO**

Para el análisis de desempeño se lo realiza mediante el test de Wilcoxon para (n) muestras pequeñas mayores a 25, a través de este test se demostrará si el control PID es igual o diferente que el control predictivo PFC.

En el procedimiento de demostración se toman en cuenta los siguientes parámetros:

- a. Si el  $IAE_{PID}$  es igual al  $IAE_{PFC}$  no habría optimización deseada.
- b. Si el  $IAE_{PID}$  es mayor al  $IAE_{PFC}$  se demostraría que con la implementación del control PFC la estabilización del sistema es mejor.
- c. Si el  $IAE_{PID}$  es menor al  $IAE_{PFC}$  se demostraría que el sistema ha empeorado en su funcionamiento.

#### **4.8 PRUEBA DE WILCOXON EN EL PROCESO DE TEMPERATURA PARA EL CONTROL PID Y EL CONTROLADOR PREDICTIVO PFC**

Para la prueba de Wilcoxon se muestran los valores conseguidos en el proceso del control de temperatura; para lo cual se ha tomado 30 muestras (n) tanto para el control PID y el controlador predictivo PFC respectivamente para determinar si el índice de desempeño IAE entre las muestras son iguales o diferentes.

La prueba de Wilcoxon toma en consideración las siguientes hipótesis:

- Si  $IAE_{PID}$  es igual o menor al  $IAE_{PFC}$  se considera que la hipótesis  $H_0$  es nula.
- Si  $IAE_{PID}$  es mayor al  $IAE_{PFC}$ , se considera que la hipótesis  $H_a$  alternativa

En la Tabla 4.2 se muestran los valores del análisis de la prueba de Wilcoxon para los controladores PID y predictivo PFC respectivamente.

**Tabla 4.2** Valores obtenidos y análisis de la prueba de Wilcoxon para los controladores PID vs PFC en el proceso de control de temperatura de la planta.

Nº	IAE PID	IAE PFC	Diferencias	Rangos Designados	T+	T-	Diferencias de menor a mayor	Rangos de menor a mayor
1	192,2586	182,5872	9,6714	30	30		9,6714	1
2	205,7488	188,8259	16,9229	10	10		16,1229	2
3	211,2235	190,2154	21,0081	15	15		16,9229	3
4	220,6863	191,3531	29,3332	25	25		17,6903	4
5	213,3025	190,4971	22,8054	17	17		18,4925	5
6	207,9928	189,5003	18,4925	12	12		19,3266	6
7	218,1492	191,0450	27,1042	22	22		20,1525	7
8	209,0881	189,7615	19,3266	13	13		21,0081	8
9	227,5372	193,3527	34,1845	37	37		21,488	9
10	225,0871	192,2918	32,7953	32	32		21,9104	10
11	206,8758	189,1855	17,6903	11	11		22,8054	11
12	219,0190	191,1576	27,8614	23	23		23,7145	12
13	215,3491	190,7200	24,6291	19	19		24,6291	13
14	227,0874	193,0877	33,9997	36	36		26,3032	14
15	204,5340	188,4111	16,1229	9	9		27,1042	15
16	210,1587	190,0062	20,1525	14	14		27,8614	16
17	219,8664	191,2679	28,5985	24	24		28,5985	17
18	226,1095	192,6372	33,4723	34	34		29,3332	18
19	212,2733	190,3629	21,9104	16	16		30,0205	19
20	217,2507	190,9475	26,3032	21	21		30,6029	20
21	214,3268	190,6123	23,7145	18	18		31,1202	21
22	216,3280	194,8400	21,4880	20	20		31,6059	22
23	225,6029	192,4546	33,1483	33	33		32,441	23
24	223,4418	191,8359	31,6059	29	29		32,7953	24
25	226,6011	192,8474	33,7537	35	35		33,1483	25
26	222,8186	191,6984	31,1202	28	28		33,4723	26
27	221,4612	191,4407	30,0205	26	26		33,7537	27
28	222,1687	191,5658	30,6029	27	27		33,9997	28
29	224,5678	192,1268	32,4410	31	31		34,1845	29
30	227,9447	193,6503	34,2944	38	38		34,2944	30

**Elaborado por:** Juan Calos Mera, Wilson Santos

Continuando con el procedimiento de la prueba de Wilcoxon se realiza el análisis estadístico como se observa en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Resultados estadísticos para el estudio de la prueba de Wilcoxon para los controladores PID vs PFC en el proceso de control de temperatura de la planta

$T +$	705
$T -$	-
$T = \text{Min}[T+, T-]$	705
$Z = \frac{T - n \frac{(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}$	9,718540345
Grado de certeza del 95% $Z_a$	1,96
$Z \leq Z_a$ es aceptada $H(o)$	No
$Z > Z_a$ es aceptada $H(a)$	Si

**Elaborado por:** Juan Calos Mera, Wilson Santos

#### **4.9 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA TABLA 4.3**

Según los valores obtenidos en la tabla se visualiza que el IAE del PID es mayor que el IAE del PFC, por lo tanto se demuestra que el PFC es el más eficiente en el desarrollo del control de temperatura, ya que logra atenuar el deterioro de energía del sistema.

Como el estadígrafo ( $Z=9,718540345$ ) es mayor a ( $Z_a=1,96$ ) que es la zona de aceptación, entonces el estadístico se establece dentro del grado de certeza y se acepta la hipótesis  $H(a)$  alternativa.

## 5. CONCLUSIONES

Por medio del presente proyecto se obtuvo como resultado la implementación del Control Predictivo Funcional (PFC) en el CompactRIO-9073, constatando su funcionamiento a través de ensayos realizados con la manipulación de la variable temperatura en el módulo de procesos continuos .

Se consiguió como resultado la implementación del Control Proporcional Integrativo Derivativo (PID) en el CompactRIO-9073, este controlador a través de sus parámetros permitió realizar un seguimiento tentativo a la señal de la curva de comportamiento y el error de establecimiento propuesta por el set point originado en el controlador predictivo del proceso.

Por medio de la caracterización de los elementos de control que intervienen en el proceso de temperatura, se identificó que para la manipulación con el CompactRIO-9073 dichos elementos se activan por medio del envío y recepción de señales de voltaje y corriente para su funcionamiento en el sistema del controlador predictivo.

Se adquirió datos de voltaje de la entrada (Sensor RTD) en el software LabVIEW y se realizó el acondicionamiento de esta señal a temperatura en grados centígrados (°C) utilizando como referencia la tabla 3.2, y de esta manera se pudo tomar muestras de temperatura en el tiempo para mayor facilidad en el proceso de la obtención del modelo matemático del sistema.

En la plataforma de procesos continuos al instalar el CompactRIO-9073 para el control de temperatura también fue necesario implementar hardware adicional con el fin de que las salidas analógicas del PAC que entregan de 0V a 10V funcionen como salidas digitales ya que el acondicionamiento de los actuadores (bomba, niquelinas y mixer) en la planta tienen el comportamiento on/off.

El control PID convencional de temperatura fue desarrollado con las constantes  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$  mismas que fueron variadas con la herramienta PID Tuner de Matlab hasta llegar al valor en el control del sistema una vez ajustadas las variables al modelo matemático se lo aplicó al control PID realizado en LabView demostrando una estabilización eficiente al poner en funcionamiento la planta.

Al realizar los ensayos empíricos se obtuvo que el control predictivo PFC tiene una respuesta rápida y eficaz el cual mejora aproximadamente en treinta segundos con respecto al control PID implementado anteriormente debido a que la ecuación implementada en el MathScript de Laview tiende a dar el comportamiento exacto del PID sosteniendo y mejorando el proceso de la planta ya que dedica todos los recursos del CompactRIO-9073 al procesamiento matemático del algoritmo predictivo.

En la industria la implementación de controles predictivos han tenido un lento avance especialmente por la falta de recursos y equipos necesarios para alta capacidad requerida en procesamiento al ejecutarlos, actualmente con los avances en la tecnología se demuestra que ya los controladores actuales no tienen este impedimento y poseen las características necesarias para realizar este tipo de controles.

Se puede apreciar en el desarrollo del proyecto que obtener el modelo matemático de la planta (ecuación de transferencia) para el proceso de temperatura este es muy importante ya que el mismo modelo se lo puede aplicar a cualquier tipo de control que se realice, en este caso se lo implementó en el control PID y en el control PFC.

Realizando la Prueba de Wilcoxon entre los controles PID y PFC se observa que el índice de error absoluto IAE del PID es mayor que el índice de error absoluto IAE del PFC siendo mayor el área bajo la curva en el control PID se demuestra que el control PFC es un método práctico excelente ya que optimiza recursos y disminuye la pérdida de energía mejorando el proceso de control de temperatura .

## 6. RECOMENDACIONES

Al no contar con planos electrónicos de la plataforma de procesos continuos, se sugiere efectuar ensayos eléctricos a cada uno de los elementos para obtener un esquema de conexión adecuado en la ejecución el proceso de temperatura.

En el tanque de reserva de agua se debe llevar a cabo un mantenimiento recurrente, debido a que el filtro que está acoplado en la bomba por medio de la tubería no captura las impurezas generadas por el uso, esto puede causar el desgaste de la bomba generando problemas en el funcionamiento del proceso.

Se recomienda evaluar el modelo del algoritmo predictivo antes de su implementación por medio de simulaciones con la herramienta de MATLAB la cual permitirá observar su comportamiento durante la ejecución en el proceso de temperatura.

Se recomienda efectuar la caracterización de los elementos de la plataforma de procesos continuos para identificar que tipo sensores y actuadores serán útiles para la implementación del proceso evitando problemas durante el funcionamiento del proceso.

En la comunicación del ordenador con el CompactRIO-9073 se recomienda tener en cuenta parámetros como memoria, versión del sistema operativo, procesador entre otros para que en el funcionamiento del algoritmo predictivo no exista problemas de saturación de memoria.

En el hardware adicional es necesario utilizar un optoacoplador al transmitir una señal de control a un circuito de potencia, con el fin de no perder voltaje como sucede al implementar los relés.

Es importante fijar límites de trabajo en los cuales los actuadores puedan desarrollar el control normal ya que si se los hace funcionar de manera forzada estos se desgastan y el tiempo de vida de los mismos se acortaría.

Asignar una dirección IP estática al CompactRIO-9073 y al computador en la red local con el fin de poder mantener siempre la conexión en línea al momento de realizar la programación en LabVIEW.

Es necesario optimizar la programación para no saturar la memoria del CompactRIO-9073 ya que al trabajar en línea la memoria va saturándose en cada puesta en marcha por eso es necesario liberar el espacio antes de la ejecución del control realizado en LabVIEW.

## 7. LISTA DE REFERENCIAS

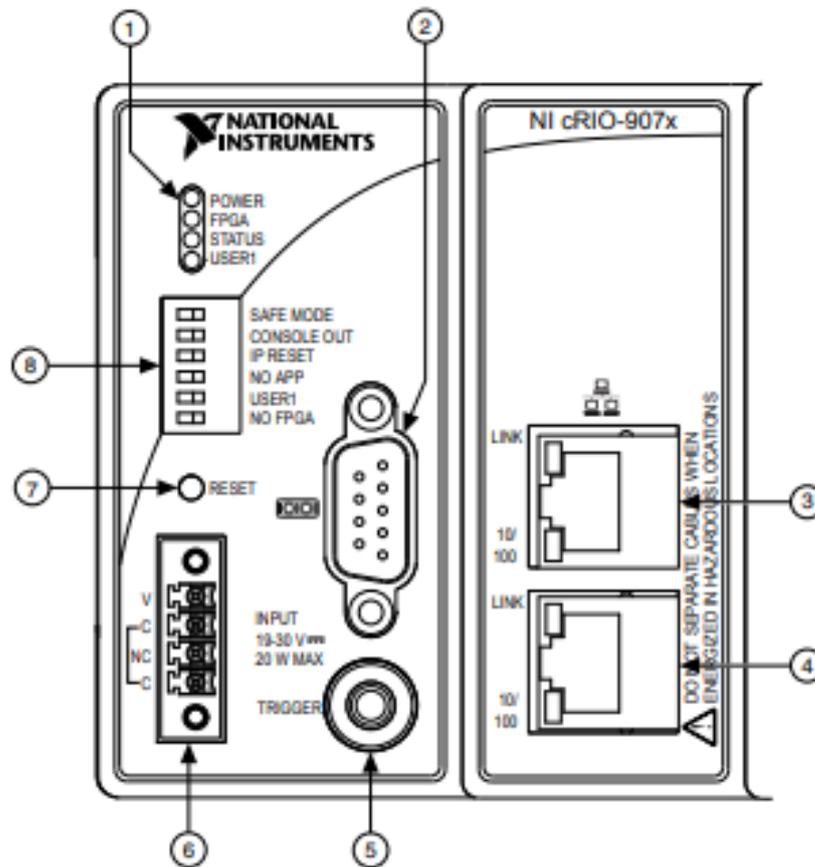
- Rossiter , J. (2005). Model Based Predictive Control. London. Obtenido de <http://kavediasir.yolasite.com/resources/40514311-Model-Based-Predictive-Control.pdf>
- Angulo Bahón, C., & Raya Giner, , C. (2004). *Tecnología de sistemas de control*. Barcelona, España: Edicions UPC. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.3/36817>
- ANILLO, A. F., & GUTIERREZ MEJIA, L. (2012). ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGIAS EN CONTROL DE MOVIMIENTO. Obtenido de <http://biblioteca.unitecnologica.edu.co/notas/tesis/0063889.pdf>
- Antonio, C. G., & Fuentes, R. C. (2014). AUTOMATIZACIÓN DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO APLICADO A SISTEMAS DE TRASLADO DE MATERIALES. MEXICO D.F, MEXICO. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/14995/1/AUTOMATIZACI%C3%93N%20DE%20UN%20M%C3%93DULO%20DE%20ENTRENAMIENTO%20APLICADO%20A%20SISTEMAS%20DE%20TRASLADO%20DE%20MATERIALES.pdf>
- Aragón Salgado, L. G. (2016). *Estadística - En el área de las ciencias sociales y administrativas*. Alfaomega. Obtenido de <http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/868/free/data/cap12.pdf>
- Carrillo, M. A. (2012). Funciones discretas. Obtenido de [https://maixx.files.wordpress.com/2011/08/dspc\\_c02\\_diferenciasfinitas\\_v07\\_03\\_021.pdf](https://maixx.files.wordpress.com/2011/08/dspc_c02_diferenciasfinitas_v07_03_021.pdf)
- César, R. M. (2015). DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA EL BANCO DE PRESIÓN DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL. LOJA, ECUADOR. Obtenido de <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11851/1/Ramos%20Moreno%20C%20Paulo%20C%20A9sar.pdf>
- Flores, P., Cando, J., & Arévalo, J. (2018). IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE MATRIZ DINÁMICA (DMC) DE LA VARIABLE NIVEL, EN LA PLATAFORMA DE PROCESOS CONTINUOS, UTILIZANDO UN

- PAC. QUITO, ECUADOR. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15791/1/UPS-ST003624.pdf>
- Instrumentacion, A. C. (2018). *Arian Control & Instrumentacion*. (A. S. Chile, Productor) Obtenido de <http://www.arian.cl:> <http://www.arian.cl/downloads/nt-003.pdf>
- Instruments, N. (2017). cRIO-9073 Chasis CompactRIO (Legado). Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr/support/model.crio-9073.html>
- Instruments, N. (2017). NI-9263 Módulo de Salida de Voltaje de la Serie C. Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr/support/model.ni-9263.html>
- Instruments, N. (18 de Septiembre de 2018). NI-9201 Módulo de Entrada de Voltaje de la Serie C. Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr/support/model.ni-9201.html>
- Law, A. M., & Kelton, W. (1991). *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill. Obtenido de <https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/index.pdf>
- LozanoValencia, L. F. (2012). Implementación y Validación de un Controlador PID Autosintonizado Design, Implementation and Validation of a Self-Tuning PID Controller. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n28/n28a03.pdf>
- Mandeep Kaur, M. S. (2011). RFID Technology Principles, Advantages, Limitation and Its Applications. *International Journal of Computer and Electrical EGINEERING*, 151-154.
- Mapas de Google. (Marzo de 2018). *Google Street View*. Obtenido de [https://www.google.com.ec/maps/place/Universidad+Polit%C3%A9cnica+Salesiana+\(Sur\)/@-0.2809629,-78.5506613,16z/data=!4m8!1m2!2m1!1suniversidad+politecnica+salesiana+campus+sur!3m4!1s0x0:0x71cbab6b6dcb5b6a!8m2!3d-0.2819741!4d-78.5496283](https://www.google.com.ec/maps/place/Universidad+Polit%C3%A9cnica+Salesiana+(Sur)/@-0.2809629,-78.5506613,16z/data=!4m8!1m2!2m1!1suniversidad+politecnica+salesiana+campus+sur!3m4!1s0x0:0x71cbab6b6dcb5b6a!8m2!3d-0.2819741!4d-78.5496283)
- Mazzone, V. (2011). Controladores PID. Obtenido de <https://iaci.unq.edu.ar/caut1>
- Moreno, P. C. (2015). DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA EL BANCO DE PRESIÓN DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL. Loja, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11851/1/Ramos%20Moreno%2C%20Paulo%20C%C3%A9sar.pdf>

- Ollero B., A. (1991). *Control por Computadora: Descripción interna y diseño óptimo*. España: Marcombo.
- Palomo, G. V. (Diciembre de 2006). “Aplicación del Control Predictivo Multivariable a una Columna de Destilación Binaria”. Cuernavaca, México. Obtenido de <http://www.cenidet.edu.mx/subplan/biblio/seleccion/Tesis/ME%20Guillermo%20Valencia%20Palomo%202006.pdf>
- Paz, A. J. (2011). *Sistemas Automáticos de Control*. Editorial UNERMB. Obtenido de [http://150.185.9.18/fondo\\_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA%20DE%20CONTROL%20%201.pdf](http://150.185.9.18/fondo_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA%20DE%20CONTROL%20%201.pdf)
- Richalet, J. (1992). *Pratique de la commande predictive*. HERMES.
- SIEMENS. (2014). Ejemplo de PID con Factory IO - PROGRAMACIÓN SIEMENS. Obtenido de <https://programacionsiemens.com/ejemplo-pid-factory-io/>
- Smith, C., & Corripio, A. (2015). *Principles and Practice of Automatic*. Obtenido de [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/ocamacho/sistemas de control/CAPITULO\\_3.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/ocamacho/sistemas%20de%20control/CAPITULO_3.pdf)
- Stoica, P., & Söderström, T. (1988). *System identification*. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River. Obtenido de <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=59617>
- Vaca Guilcamaigua, A. E., & Curay Flores, S. (2015). Diseño e implementación de un algoritmo de control avanzado aplicado a un proceso de presión, utilizando un controlador de automatización programable para el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9319>

## 8. ANEXOS

### Anexo A. Panel frontal CompactRIO-9073



- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 1. LEDs                                   | 5. SMB Connector (cRIO-9074 Only) |
| 2. RS-232 Serial Port                     | 6. Power Connector                |
| 3. RJ-45 Ethernet Port 2 (cRIO-9074 Only) | 7. Reset Button                   |
| 4. RJ-45 Ethernet Port 1                  | 8. DIP Switches                   |

Fuente: (National Instruments, 2018a)

## Anexo B. Características de funcionamiento eléctrico CompactRIO-9073

### Network

Network interface	10Base-T and 100Base-TX Ethernet
Compatibility	IEEE 802.3
Communication rates	10 Mbps, 100 Mbps, auto-negotiated
Maximum cabling distance	100 m/segment

### RS-232 Serial Port

Maximum baud rate	115,200 bps
Data bits	5, 6, 7, 8
Stop bits	1, 2
Parity	Odd, Even, Mark, Space
Flow control	RTS/CTS, XON/XOFF, DTR/DSR

### SMB Connector (cRIO-9074 only)

#### Output Characteristics

Minimum high-level output voltage	
With -100 $\mu$ A output current	2.9 V
With -16 mA output current	2.4 V
With -24 mA output current	2.3 V
Maximum low-level output voltage	
With 100 $\mu$ A output current	0.10 V
With 16 mA output current	0.40 V
With 24 mA output current	0.55 V
Driver type	CMOS
Maximum sink/source current	$\pm$ 24 mA
Maximum 3-state output leakage current	$\pm$ 5 $\mu$ A

#### Input Characteristics

Minimum input voltage	0 V
Minimum low-level input voltage	0.94 V
Maximum high-level input voltage	2.43 V
Maximum input voltage	5.5 V
Typical input capacitance	2.5 pF
Typical resistive strapping	1 k $\Omega$ to 3.3 V

### Memory

#### cRIO-9072, cRIO-9073

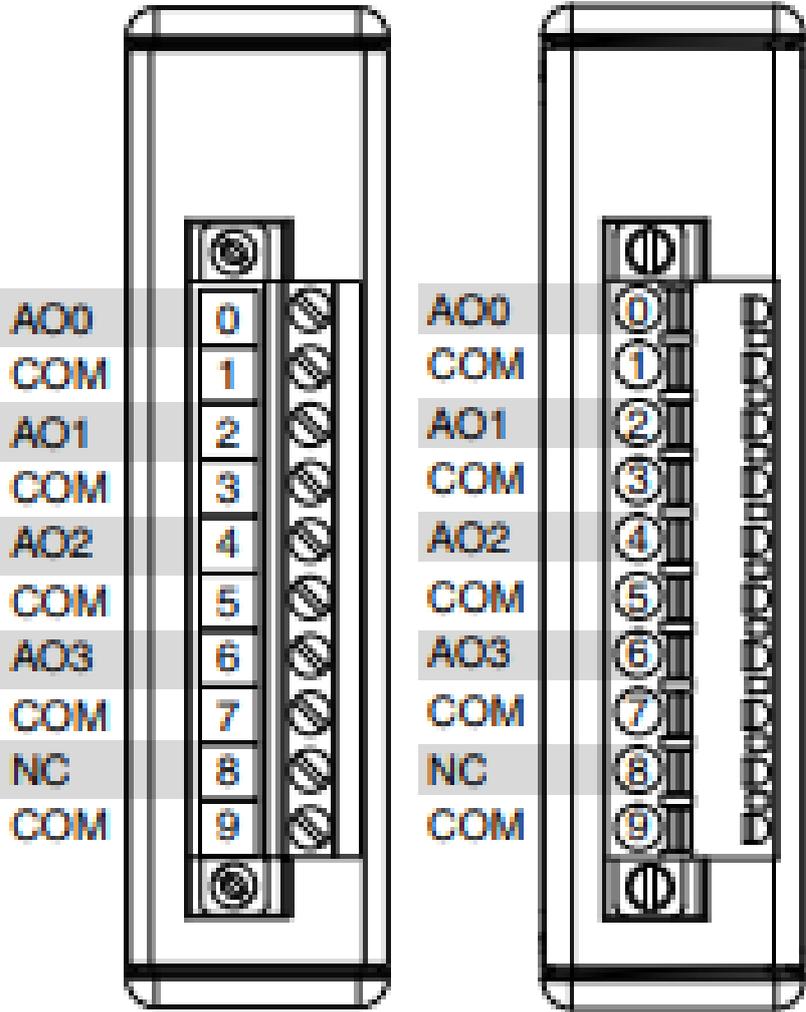
Nonvolatile	128 MB minimum
DRAM	64 MB

#### cRIO-9074

Nonvolatile	256 MB minimum
DRAM	128 MB

Fuente: (National Instruments, 2018a)

Anexo C. Panel frontal del modulo de salidas NI-9263



Signal	Description
AO	Analog output signal connection
COM	Common reference connection to isolated ground
NC	No connection

Fuente:(National Instruments, 2018b)

## Anexo D. Panel del módulo de entradas NI-9201

# NI 9201

8 AI,  $\pm 10$  V, 12 Bit, 500 kS/s Aggregate



- DSUB, screw-terminal, or spring-terminal connectivity
- 250 Vrms, CAT II, channel-to-earth isolation (screw and spring terminal); 60 VDC, CAT I, channel-to-earth isolation (DSUB)
- $-40$  °C to  $70$  °C operating range, 5 g vibration, 50 g shock

Fuente:(National Instruments, 2017)

## Anexo E. Características de funcionamiento eléctrico del modulo de entradas NI-9201

### Input Characteristics

Number of channels	8
ADC resolution	12 bits
Type of ADC	Successive approximation register (SAR)

Table 1. Sample Rate (Aggregate)

Mode	Maximum Sample Rate (R Series Expansion Chassis)	Maximum Sample Rate (All Other Chassis)
Single Channel	475 kS/s	800 kS/s
Scanning	475 kS/s	500 kS/s

Input range	$\pm 10$ V
Measurement voltage, channel-to-COM (V)	
Minimum	$\pm 10.3$
Typical	$\pm 10.53$
Maximum	$\pm 10.8$
Overvoltage protection, channel-to-COM	$\pm 100$ V

Table 2. NI 9201 Accuracy (Excludes Noise)

Measurement Conditions		Percent of Reading (Gain Error)	Percent of Range <sup>1</sup> (Offset Error)
Calibrated	Typical ( $25$ °C, $\pm 5$ °C)	$\pm 0.04\%$	$\pm 0.07\%$
	Maximum ( $-40$ °C to $70$ °C)	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.25\%$

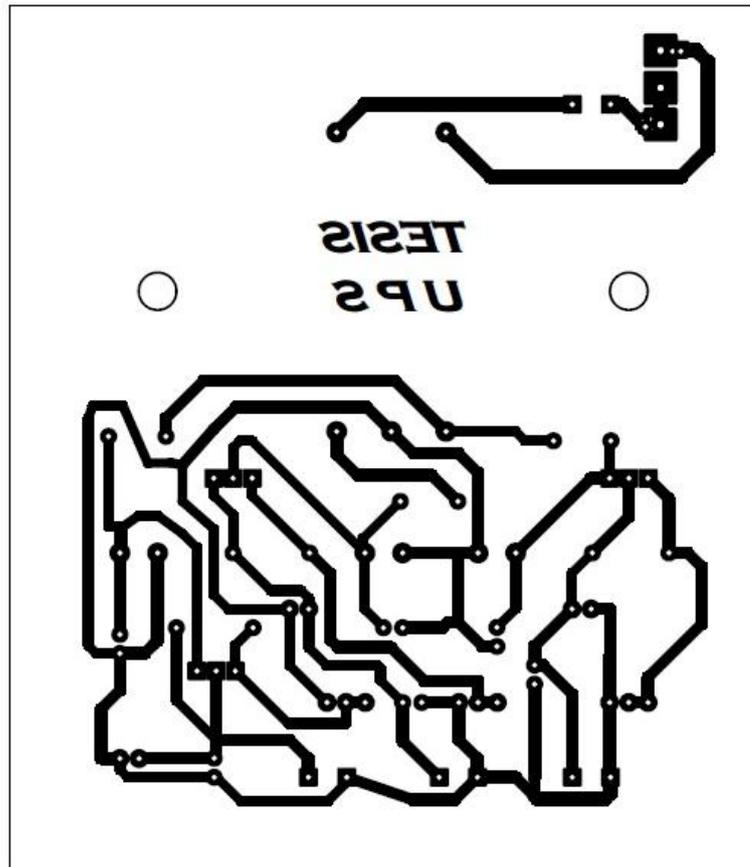
Fuente: (National Instruments, 2017)

## Anexo F. Valores estándar de temperatura del sensor PT-100

Pt 100 ohms	°C									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
-190	22.78	22.35	21.93	21.50	21.08	20.66	20.23	19.81	19.38	18.96
-180	27.01	26.59	26.17	25.74	25.32	24.90	24.47	24.05	23.63	23.20
-170	31.24	30.81	30.39	29.97	29.55	29.13	28.70	28.28	27.86	27.44
-160	35.45	35.03	34.61	34.19	33.77	33.34	32.92	32.50	32.08	31.66
-150	39.65	39.23	38.81	38.39	37.97	37.55	37.13	36.71	36.29	35.87
-140	43.78	43.37	42.96	42.54	42.13	41.72	41.30	40.89	40.48	40.06
-130	47.90	47.49	47.08	46.67	46.26	45.85	45.43	45.02	44.61	44.20
-120	52.01	51.60	51.19	50.78	50.37	49.96	49.55	49.14	48.73	48.32
-110	56.11	55.70	55.29	54.88	54.48	54.07	53.66	53.25	52.84	52.43
-100	60.20	59.79	59.38	58.98	58.57	58.16	57.75	57.34	56.93	56.52
-90	64.23	63.83	63.43	63.02	62.62	62.22	61.81	61.41	61.01	60.60
-80	68.25	67.85	67.45	67.05	66.65	66.25	65.84	65.44	65.04	64.64
-70	72.26	71.86	71.46	71.06	70.66	70.26	69.86	69.46	69.06	68.66
-60	76.26	75.86	75.46	75.06	74.67	74.27	73.87	73.47	73.07	72.67
-50	80.25	79.85	79.45	79.06	78.66	78.26	77.86	77.46	77.06	76.66
-40	84.22	83.83	83.43	83.03	82.64	82.24	81.84	81.44	81.05	80.65
-30	88.18	87.79	87.39	87.00	86.60	86.21	85.81	85.41	85.02	84.62
-20	92.13	91.74	91.35	90.95	90.56	90.16	89.77	89.37	88.98	88.58
-10	96.07	95.68	95.29	94.89	94.50	94.11	93.71	93.32	92.92	92.53
0	100.00	99.61	99.22	98.82	98.43	98.04	97.65	97.25	96.86	96.47
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16
40	115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.07	127.46	127.84	128.22	128.60	128.99	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.50	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.77	141.15	141.53	141.91
110	142.29	142.67	143.04	143.42	143.80	144.18	144.55	144.93	145.31	145.69
120	146.06	146.44	146.82	147.19	147.57	147.95	148.32	148.70	149.07	149.45
130	149.83	150.20	150.58	150.95	151.33	151.70	152.08	152.45	152.83	153.20
140	153.58	153.95	154.33	154.70	155.08	155.45	155.83	156.20	156.57	156.95
150	157.32	157.69	158.07	158.44	158.81	159.19	159.56	159.93	160.30	160.68
160	161.05	161.42	161.79	162.16	162.53	162.91	163.28	163.65	164.02	164.39
170	164.76	165.13	165.50	165.88	166.25	166.62	166.99	167.36	167.73	168.10
180	168.47	168.84	169.21	169.58	169.95	170.31	170.68	171.05	171.42	171.79
190	172.16	172.53	172.90	173.26	173.63	174.00	174.37	174.74	175.10	175.47
200	175.84	176.21	176.58	176.94	177.31	177.68	178.04	178.41	178.78	179.14
210	179.51	179.88	180.24	180.61	180.98	181.34	181.71	182.07	182.44	182.81
220	183.17	183.54	183.90	184.27	184.63	185.00	185.36	185.73	186.09	186.45
230	186.82	187.18	187.55	187.91	188.27	188.64	189.00	189.37	189.73	190.09
240	190.46	190.82	191.18	191.54	191.91	192.27	192.63	192.99	193.36	193.72
250	194.08	194.44	194.80	195.17	195.53	195.89	196.25	196.61	196.97	197.33
260	197.69	198.05	198.41	198.77	199.14	199.50	199.86	200.22	200.58	200.94
270	201.29	201.65	202.01	202.37	202.73	203.09	203.45	203.81	204.17	204.53
280	204.88	205.24	205.60	205.96	206.32	206.68	207.03	207.39	207.75	208.11
290	208.46	208.82	209.18	209.53	209.89	210.25	210.60	210.96	211.32	211.67
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

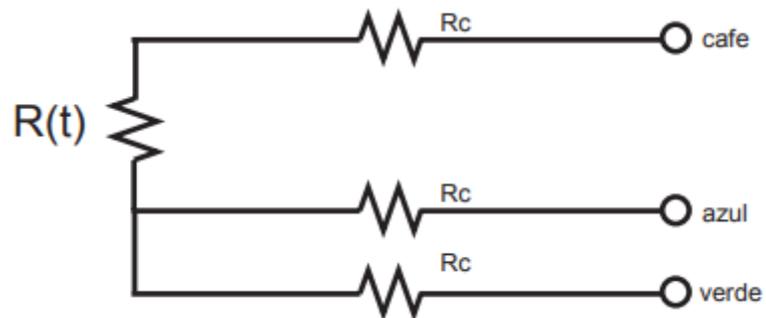
Fuente:(Arian Control & Instrumentacion, n.d.)

**Anexo G.** Placa PCB de una fuente voltaje ( $\pm 16$  V)



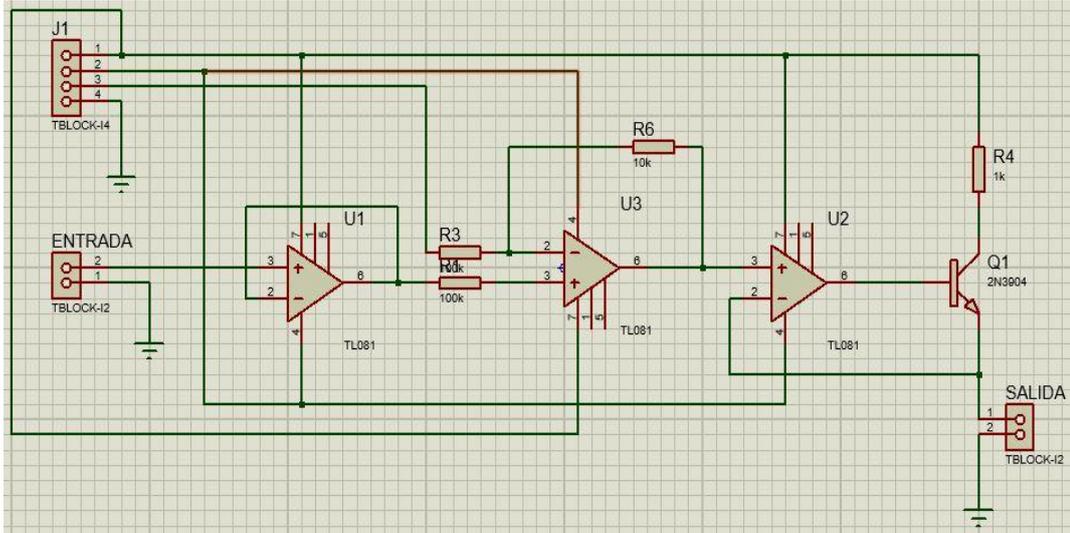
**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

**Anexo H.** Conexión de 3 hilos para el sensor PT-100



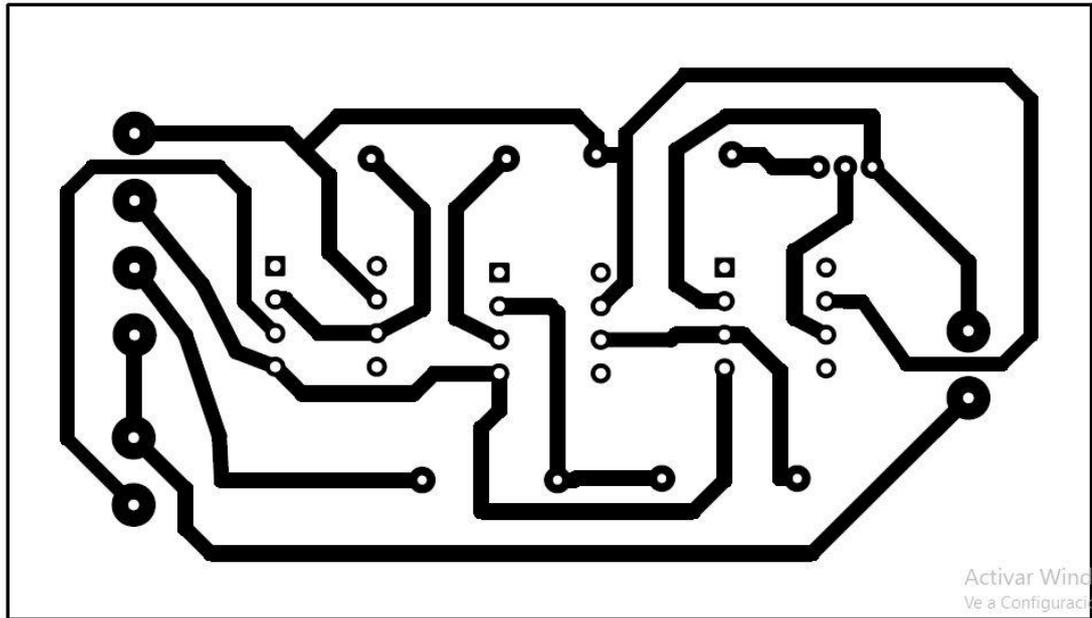
**Fuente:**(Arian Control & Instrumentacion, n.d.)

### Anexo I. Diseño y esquema del convertor voltaje-corriente



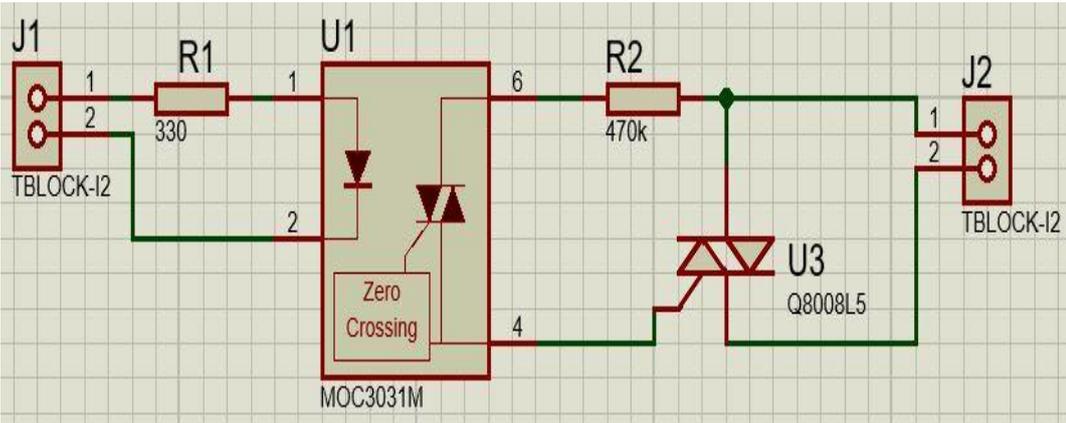
Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

### Anexo J. Placa PCB de una fuente convertidor corriente-voltaje



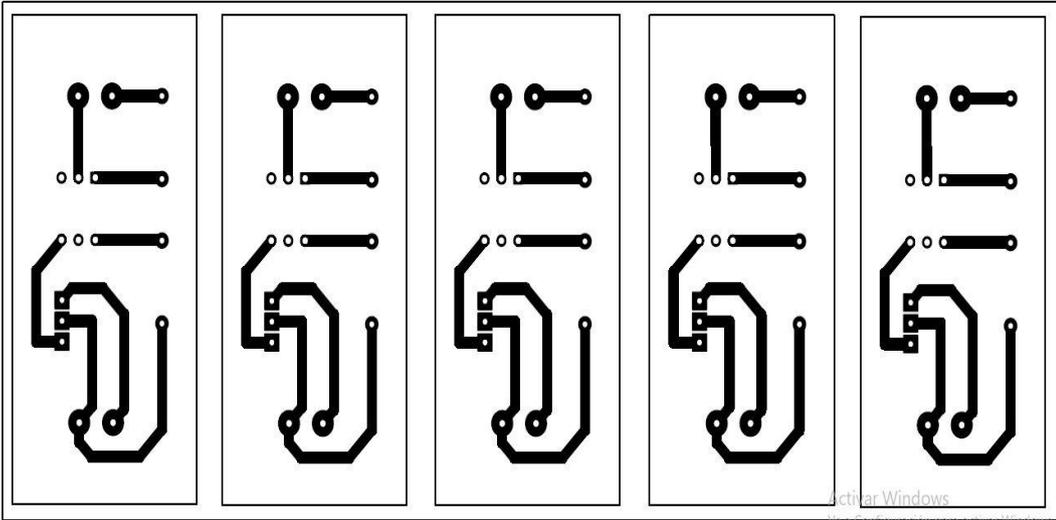
Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

**Anexo K.** Esquema Proteus del circuito para la activación de actuadores del proceso



**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

**Anexo L.** Placa PCB del circuito para la activación de actuadores del proceso



**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

## Anexo M. Programa para cálculo del índice de desempeño IAE

```
Editor - C:\Users\WILSON\Desktop\DOCUMENTOS TESIS\IAE\Untitled.m
Untitled.m x +
1 - hold on;
2 - clear
3 - nit=30;%número de periodos de muestreo
4 - r=23;
5 - a=1;
6 - b=15;|
7 - R=r*ones(nit,1);%vector de trayectoria de referencia
8 %ym salida
9 - ym= [ 19.5093 19.5093 19.5093 19.5093 19.6093
10 - time=a:1:b;
11 - salidaYm=ym(a:b);
12 - ref=transpose(R(a:b));
13 - ea=abs(ref-salidaYm);
14 - IAE=trapz(time,ea)
15 - plot(ym);
16 - plot(ea);
17 - plot(salidaYm);
<
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
>> Untitled
IAE =
196.5784
```

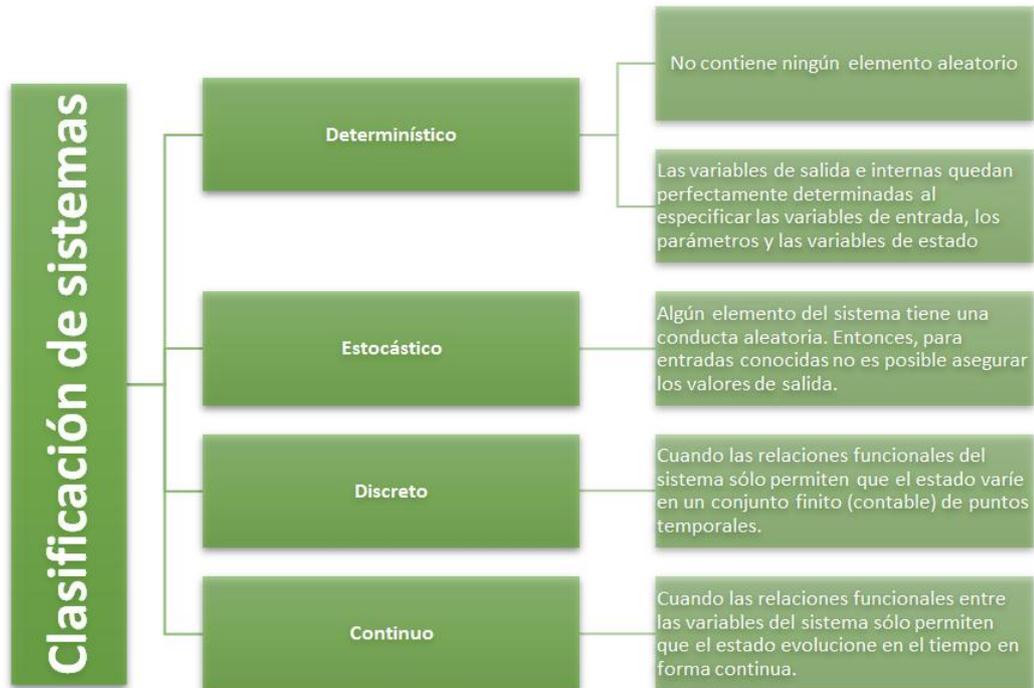
Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

## Anexo N. Descripción de la estrategia del control predictivo



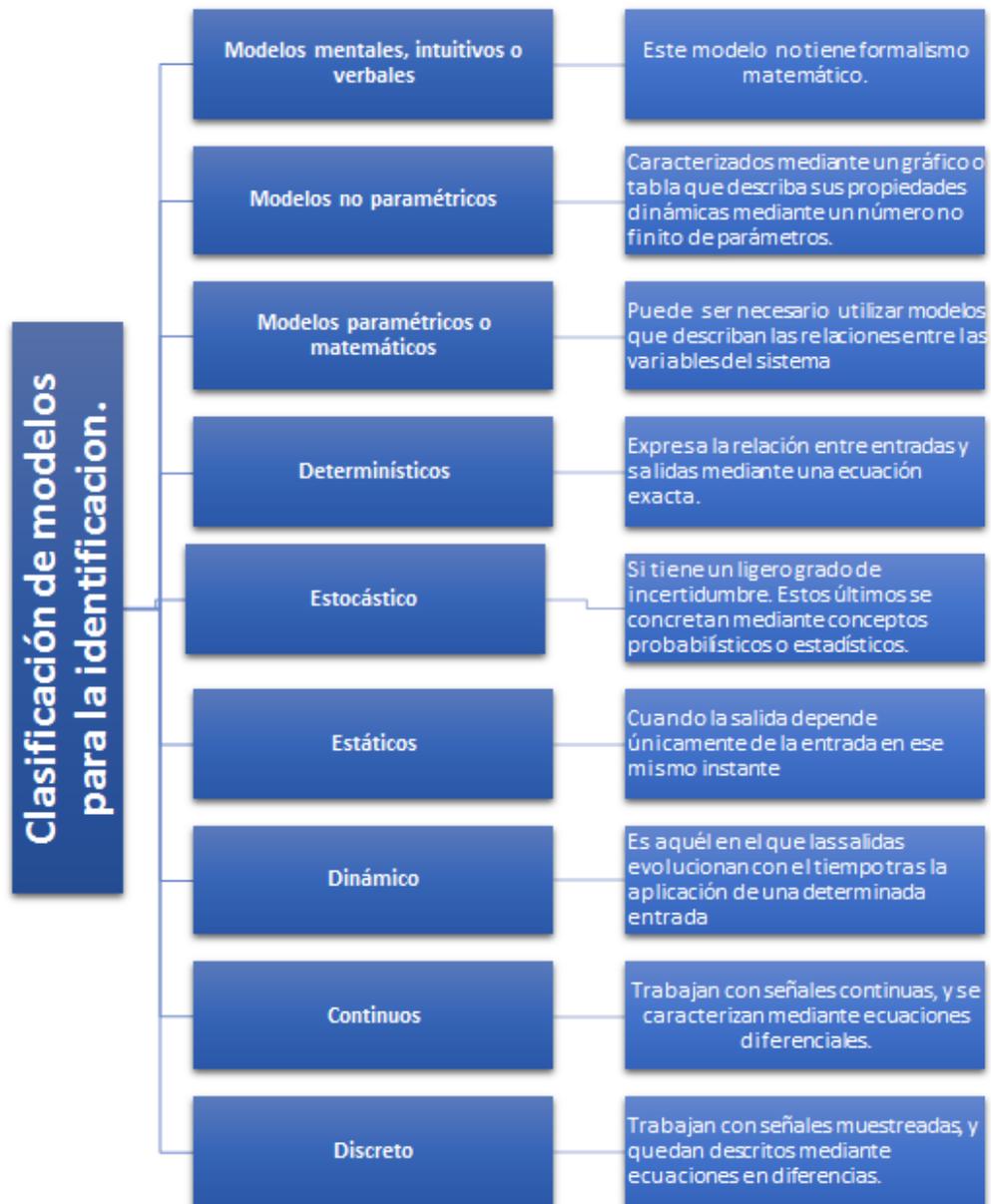
Fuente: (Moreno, 2015)

## Anexo O. Clasificación de los sistemas de acuerdo a su naturaleza



Fuente: (Law & Kelton, 1991)

**Anexo P.** Clasificación de los modelos por la particularidad del formalismo matemático



**Fuente:** (Stoica & Söderström, 1988)

## Anexo Q. Pasos para la identificación del modelo

<b>Pasos para la identificación del modelo</b>		
<b>1</b>	<b>Obtención de datos de entrada-salida</b>	Se estimula el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada luego se reconoce el progreso de las entradas y las salidas.
<b>2</b>	<b>Tratamiento previo de los datos registrados</b>	Aparece un ruido este se genera por el ruido entonces se filtra los datos para regenerar el proceso de identificación.
<b>3</b>	<b>Elección de la estructura del modelo</b>	Se debe tener conocimiento de las leyes físicas del proceso, generalmente se emplea los modelos paramétricos.
<b>4</b>	<b>Obtención de los parámetros del modelo</b>	Definida como la evaluación de los parámetros de la mejor estructura que se adapte a la respuesta del modelo basándose a los datos reconocidos de entrada-salida.
<b>5</b>	<b>Validación del modelo</b>	Se define como la decisión del modelo obtenido de acuerdo al grado de exactitud requerido para la aplicación a implementarse.

**Fuente:** (Stoica & Söderström, 1988)

## Anexo R. Datos obtenidos con el set point de 22°C con el control PID del proceso

Time	Time*	Untitle	Collected
28/07/2018 12:38:48,805 PM	0	20	20
28/07/2018 12:38:48,927 PM			20
28/07/2018 12:38:49,005 PM			20
28/07/2018 12:38:49,536 PM			20
28/07/2018 12:38:50,013 PM			20
28/07/2018 12:38:50,512 PM			20
28/07/2018 12:38:51,020 PM			20
28/07/2018 12:38:51,523 PM			20
28/07/2018 12:38:52,008 PM			20
28/07/2018 12:38:52,526 PM			20
28/07/2018 12:38:53,028 PM			20
28/07/2018 12:38:53,525 PM			20
28/07/2018 12:38:54,018 PM			21
28/07/2018 12:38:54,536 PM			21
28/07/2018 12:38:55,013 PM			20
28/07/2018 12:38:55,535 PM			20
28/07/2018 12:38:56,009 PM			20
28/07/2018 12:38:56,559 PM			21
28/07/2018 12:38:57,014 PM			20
28/07/2018 12:38:57,519 PM			20
28/07/2018 12:38:58,007 PM			20
28/07/2018 12:38:58,533 PM			20
28/07/2018 12:38:59,017 PM			21
28/07/2018 12:38:59,537 PM			20
28/07/2018 12:39:00,012 PM			21
28/07/2018 12:39:00,554 PM			20
28/07/2018 12:39:01,009 PM			20
28/07/2018 12:39:01,536 PM			20
28/07/2018 12:39:02,007 PM			20
28/07/2018 12:39:02,534 PM			20
28/07/2018 12:39:03,004 PM			20
28/07/2018 12:39:03,529 PM			21
28/07/2018 12:39:04,005 PM			20
28/07/2018 12:39:04,541 PM			20
28/07/2018 12:39:05,006 PM			20
28/07/2018 12:39:05,587 PM			20
28/07/2018 12:39:06,003 PM			20
28/07/2018 12:39:06,537 PM			20
28/07/2018 12:45:50,034 PM			22
28/07/2018 12:45:50,570 PM			22
28/07/2018 12:45:51,033 PM			22
28/07/2018 12:45:51,633 PM			21
28/07/2018 12:45:52,031 PM			22
28/07/2018 12:45:52,569 PM			22
28/07/2018 12:45:53,029 PM			22
28/07/2018 12:45:53,587 PM			22
28/07/2018 12:45:54,032 PM			22
28/07/2018 12:45:54,668 PM			22
28/07/2018 12:45:55,029 PM			22
28/07/2018 12:45:55,563 PM			22
28/07/2018 12:45:56,029 PM			22
28/07/2018 12:45:56,578 PM			22
28/07/2018 12:45:57,005 PM			22
28/07/2018 12:45:57,578 PM			22
28/07/2018 12:45:58,043 PM			22
28/07/2018 12:45:58,578 PM			22
28/07/2018 12:45:59,035 PM			22
28/07/2018 12:45:59,569 PM			21
28/07/2018 12:46:00,025 PM			22
28/07/2018 12:46:00,589 PM			22
28/07/2018 12:46:01,018 PM			22
28/07/2018 12:46:01,575 PM			22
28/07/2018 12:46:02,018 PM			22
28/07/2018 12:46:02,594 PM			22
28/07/2018 12:46:03,037 PM			22
28/07/2018 12:46:03,594 PM			22
28/07/2018 12:46:04,031 PM			22
28/07/2018 12:46:04,563 PM			22
28/07/2018 12:46:05,035 PM			22
28/07/2018 12:46:05,574 PM			22
28/07/2018 12:46:06,036 PM			22
28/07/2018 12:46:06,585 PM			22
28/07/2018 12:46:07,041 PM			22
28/07/2018 12:46:07,586 PM			22
28/07/2018 12:46:08,007 PM			22
28/07/2018 12:39:00,012 PM			21
28/07/2018 12:39:00,554 PM			20
28/07/2018 12:39:01,009 PM			20
28/07/2018 12:39:01,536 PM			20
28/07/2018 12:39:02,007 PM			20
28/07/2018 12:39:02,534 PM			20
28/07/2018 12:39:03,004 PM			20
28/07/2018 12:39:03,529 PM			21
28/07/2018 12:39:04,005 PM			20
28/07/2018 12:39:04,541 PM			20
28/07/2018 12:39:05,006 PM			20
28/07/2018 12:39:05,587 PM			20
28/07/2018 12:39:06,003 PM			20
28/07/2018 12:39:06,537 PM			20
28/07/2018 12:39:07,003 PM			21
28/07/2018 12:39:07,543 PM			21
28/07/2018 12:39:08,007 PM			20
28/07/2018 12:39:08,516 PM			20
28/07/2018 12:39:09,015 PM			20
28/07/2018 12:39:09,535 PM			21
28/07/2018 12:39:10,003 PM			20
28/07/2018 12:39:10,533 PM			20
28/07/2018 12:39:11,002 PM			20
28/07/2018 12:39:11,539 PM			20
28/07/2018 12:39:12,002 PM			20
28/07/2018 12:39:12,585 PM			20
28/07/2018 12:39:13,003 PM			20
28/07/2018 12:39:13,531 PM			21
28/07/2018 12:39:14,007 PM			20
28/07/2018 12:39:14,534 PM			20
28/07/2018 12:39:15,006 PM			20
28/07/2018 12:39:15,526 PM			20
28/07/2018 12:39:16,004 PM			20
28/07/2018 12:39:16,545 PM			20
28/07/2018 12:39:17,005 PM			20
28/07/2018 12:39:17,534 PM			20
28/07/2018 12:39:18,009 PM			20
28/07/2018 12:39:18,535 PM			20
28/07/2018 12:41:11,558 PM			23
28/07/2018 12:41:12,005 PM			23
28/07/2018 12:41:12,581 PM			23
28/07/2018 12:41:13,007 PM			22
28/07/2018 12:41:13,576 PM			23
28/07/2018 12:41:14,006 PM			23
28/07/2018 12:41:14,590 PM			23
28/07/2018 12:41:14,591 PM			23
28/07/2018 12:41:15,009 PM			23
28/07/2018 12:41:15,585 PM			23
28/07/2018 12:41:16,011 PM			23
28/07/2018 12:41:16,594 PM			23
28/07/2018 12:41:17,005 PM			23
28/07/2018 12:41:17,570 PM			23
28/07/2018 12:41:18,008 PM			23
28/07/2018 12:41:18,554 PM			23
28/07/2018 12:41:19,011 PM			23
28/07/2018 12:41:19,569 PM			23
28/07/2018 12:41:20,012 PM			23
28/07/2018 12:41:20,575 PM			23
28/07/2018 12:41:21,009 PM			23
28/07/2018 12:41:21,570 PM			23
28/07/2018 12:41:22,007 PM			23
28/07/2018 12:41:22,568 PM			23
28/07/2018 12:41:23,009 PM			23
28/07/2018 12:41:23,568 PM			23
28/07/2018 12:41:24,003 PM			23
28/07/2018 12:41:24,552 PM			24
28/07/2018 12:41:25,007 PM			23
28/07/2018 12:41:25,556 PM			23
28/07/2018 12:41:26,006 PM			24
28/07/2018 12:41:26,561 PM			23
28/07/2018 12:41:27,005 PM			23
28/07/2018 12:41:27,566 PM			23

Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

## Anexo S. Respuesta del sistema set point de 22°C con el control PID del proceso

Time	Time*	Utiliz. Collectad			
28/07/2018 12:38:49,087 PM		1,919667			71,502503
28/07/2018 12:38:49,505 PM		4,179167			72,705003
28/07/2018 12:38:50,031 PM		6,089167			74,52167
28/07/2018 12:38:50,518 PM		7,541667			75,88667
28/07/2018 12:38:51,014 PM		9,1950003			76,13667
28/07/2018 12:38:51,507 PM		10,630834			78,677504
28/07/2018 12:38:52,010 PM		12,3575			80,34417
28/07/2018 12:38:52,551 PM		13,995001			81,85167
28/07/2018 12:38:53,014 PM		15,380834			83,365004
28/07/2018 12:38:53,533 PM		16,941667			85,015004
28/07/2018 12:38:54,011 PM		17,479167			86,638337
28/07/2018 12:38:54,522 PM		18,837501			88,158337
28/07/2018 12:38:55,006 PM		21,364168			89,885004
28/07/2018 12:38:55,517 PM		23,070834			91,498338
28/07/2018 12:38:56,012 PM		24,551668			93,178338
28/07/2018 12:38:56,523 PM		25,187501			94,838338
28/07/2018 12:38:57,007 PM		27,555001			95,446671
28/07/2018 12:38:57,546 PM		29,176668			98,008338
28/07/2018 12:38:58,011 PM		30,568335			99,487505
28/07/2018 12:38:58,520 PM		32,108335			100
28/07/2018 12:38:59,014 PM		32,669168			100
28/07/2018 12:38:59,513 PM		34,894168			100
28/07/2018 12:39:00,014 PM		35,491668			100
28/07/2018 12:39:00,540 PM		37,795835			99,288333
28/07/2018 12:39:01,008 PM		39,355835			100
28/07/2018 12:39:01,536 PM		40,760835			100
28/07/2018 12:39:02,008 PM		42,174169			100
28/07/2018 12:39:02,511 PM		43,847502			99,080833
28/07/2018 12:39:03,004 PM		45,336669			100
28/07/2018 12:39:03,522 PM		45,971669			99,078333
28/07/2018 12:39:04,006 PM		48,506669			100
28/07/2018 12:39:04,533 PM		50,144169			100
28/07/2018 12:39:05,010 PM		51,584169			100
28/07/2018 12:39:05,529 PM		53,140002			100
28/07/2018 12:39:06,012 PM		54,590836			100
28/07/2018 12:39:06,508 PM		56,047503			100
28/07/2018 12:39:07,010 PM		56,150003			100
28/07/2018 12:39:07,526 PM		57,499169			100
28/07/2018 12:39:08,010 PM		60,048336			100
28/07/2018 12:39:08,553 PM		61,85167			100
28/07/2018 12:39:09,004 PM		63,19167			100
28/07/2018 12:39:09,518 PM		63,830836			100
28/07/2018 12:39:10,006 PM		66,265003			100
28/07/2018 12:39:10,527 PM		68,10167			100
28/07/2018 12:39:11,008 PM		69,715003			100
28/07/2018 12:39:11,595 PM		71,502503			99,2575
28/07/2018 12:40:18,008 PM		99,128333			1,314162
28/07/2018 12:40:18,539 PM		100			1,314162
28/07/2018 12:40:19,021 PM		99,104167			1,1458287
28/07/2018 12:40:19,521 PM		99,4375			2,391662
28/07/2018 12:40:20,014 PM		99,605			1,479162
28/07/2018 12:40:20,524 PM		100			1,479162
28/07/2018 12:40:21,002 PM		100			1,479162
28/07/2018 12:40:21,527 PM		99,285833			1,479162
28/07/2018 12:40:22,006 PM		100			1,479162
28/07/2018 12:40:22,532 PM		100			1,479162
28/07/2018 12:40:23,007 PM		100			1,479162
28/07/2018 12:40:23,563 PM		99,846667			1,479162
28/07/2018 12:40:24,007 PM		99,083333			1,479162
28/07/2018 12:40:24,535 PM		99,133333			1,479162
28/07/2018 12:40:25,009 PM		100			2,6533287
28/07/2018 12:40:25,506 PM		100			1,649162
28/07/2018 12:40:26,014 PM		99,760833			1,8149954
28/07/2018 12:40:26,532 PM		100			1,8149954
28/07/2018 12:40:27,012 PM		99,095			1,8149954
28/07/2018 12:40:27,540 PM		99,975			1,646662
28/07/2018 12:40:28,007 PM		100			1,646662
28/07/2018 12:40:28,533 PM		100			1,646662
28/07/2018 12:40:29,004 PM		99,5825			1,646662
28/07/2018 12:40:29,530 PM		100			1,646662
28/07/2018 12:40:30,007 PM		100			1,646662
28/07/2018 12:40:30,579 PM		100			1,8166621
28/07/2018 12:40:31,009 PM		100			1,8166621
28/07/2018 12:40:31,509 PM		100			1,8166621
28/07/2018 12:40:32,006 PM		100			1,8166621
28/07/2018 12:40:32,516 PM		99,599167			1,8166621
28/07/2018 12:40:33,002 PM		100			2,9866621
28/07/2018 12:40:33,520 PM		100			2,1491621
28/07/2018 12:40:34,012 PM		100			2,1491621
28/07/2018 12:40:34,585 PM		99,069167			2,1491621
28/07/2018 12:40:35,002 PM		100			2,3174954
28/07/2018 12:40:35,509 PM		100			2,3174954
28/07/2018 12:40:36,008 PM		100			2,3174954
28/07/2018 12:40:36,573 PM		100			2,3174954
28/07/2018 12:40:37,006 PM		100			2,3174954
28/07/2018 12:40:37,517 PM		99,001667			2,3174954
28/07/2018 12:40:38,007 PM		99,001667			2,3174954
28/07/2018 12:40:38,538 PM		100			2,3174954
28/07/2018 12:40:39,007 PM		99,001667			2,4858287
28/07/2018 12:40:39,575 PM		100			2,4858287
28/07/2018 12:40:40,005 PM		99,001667			2,4858287
28/07/2018 12:45:44,558 PM					1,314162
28/07/2018 12:45:45,002 PM					1,314162
28/07/2018 12:45:45,558 PM					1,1458287
28/07/2018 12:45:46,001 PM					2,391662
28/07/2018 12:45:46,560 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:47,002 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:47,559 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:48,003 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:48,564 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:49,004 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:49,557 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:50,007 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:50,561 PM					1,479162
28/07/2018 12:45:51,005 PM					1,649162
28/07/2018 12:45:51,557 PM					2,6533287
28/07/2018 12:45:52,004 PM					1,8149954
28/07/2018 12:45:52,559 PM					1,8149954
28/07/2018 12:45:53,002 PM					1,8149954
28/07/2018 12:45:53,562 PM					1,8149954
28/07/2018 12:45:54,002 PM					1,646662
28/07/2018 12:45:54,551 PM					1,646662
28/07/2018 12:45:55,003 PM					1,646662
28/07/2018 12:45:55,558 PM					1,646662
28/07/2018 12:45:56,002 PM					1,646662
28/07/2018 12:45:56,557 PM					1,646662
28/07/2018 12:45:57,004 PM					1,8166621
28/07/2018 12:45:57,554 PM					1,8166621
28/07/2018 12:45:58,002 PM					1,8166621
28/07/2018 12:45:58,572 PM					1,8166621
28/07/2018 12:45:59,003 PM					1,8166621
28/07/2018 12:45:59,557 PM					2,9866621
28/07/2018 12:46:00,006 PM					2,1491621
28/07/2018 12:46:00,560 PM					2,1491621
28/07/2018 12:46:01,002 PM					2,1491621
28/07/2018 12:46:01,555 PM					2,3174954
28/07/2018 12:46:02,002 PM					2,3174954
28/07/2018 12:46:02,558 PM					2,3174954
28/07/2018 12:46:03,002 PM					2,3174954
28/07/2018 12:46:03,558 PM					2,3174954
28/07/2018 12:46:04,004 PM					2,3174954
28/07/2018 12:46:04,560 PM					2,3174954
28/07/2018 12:46:05,003 PM					2,3174954
28/07/2018 12:46:05,558 PM					2,4858287
28/07/2018 12:46:06,007 PM					2,4858287
28/07/2018 12:46:06,562 PM					2,4858287

Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos

**Anexo T.** Datos obtenidos con el set point de 22°C con el control PFC del proceso

Time	Collected	Collected		
30/07/2018 09:33:46,580 AM		20	30/07/2018 09:34:14,508 AM	19
30/07/2018 09:33:47,051 AM		20	30/07/2018 09:34:15,016 AM	19
30/07/2018 09:33:47,521 AM		19	30/07/2018 09:34:15,527 AM	19
30/07/2018 09:33:48,008 AM		20	30/07/2018 09:34:16,016 AM	19
30/07/2018 09:33:48,512 AM		19	30/07/2018 09:34:16,517 AM	19
30/07/2018 09:33:49,014 AM		19	30/07/2018 09:34:17,009 AM	19
30/07/2018 09:33:49,512 AM		20	30/07/2018 09:34:17,531 AM	19
30/07/2018 09:33:50,004 AM		19	30/07/2018 09:34:18,018 AM	20
30/07/2018 09:33:50,512 AM		19	30/07/2018 09:34:18,533 AM	19
30/07/2018 09:33:51,013 AM		20	30/07/2018 09:34:19,011 AM	19
30/07/2018 09:33:51,509 AM		19	30/07/2018 09:34:19,569 AM	19
30/07/2018 09:33:52,004 AM		19	30/07/2018 09:34:20,011 AM	20
30/07/2018 09:33:52,501 AM		19	30/07/2018 09:34:20,504 AM	19
30/07/2018 09:33:53,009 AM		19	30/07/2018 09:34:21,006 AM	19
30/07/2018 09:33:53,535 AM		19	30/07/2018 09:34:21,517 AM	20
30/07/2018 09:33:54,006 AM		19	30/07/2018 09:34:22,011 AM	19
30/07/2018 09:33:54,509 AM		20	30/07/2018 09:34:22,516 AM	19
30/07/2018 09:33:55,010 AM		20	30/07/2018 09:34:23,012 AM	20
30/07/2018 09:33:55,506 AM		19	30/07/2018 09:34:23,508 AM	20
30/07/2018 09:33:56,005 AM		19	30/07/2018 09:34:24,008 AM	20
30/07/2018 09:33:56,514 AM		20	30/07/2018 09:34:24,505 AM	20
30/07/2018 09:33:57,006 AM		19	30/07/2018 09:34:25,012 AM	19
30/07/2018 09:33:57,632 AM		20	30/07/2018 09:34:25,520 AM	20
30/07/2018 09:33:58,012 AM		20	30/07/2018 09:34:26,004 AM	19
30/07/2018 09:33:58,508 AM		19	30/07/2018 09:34:26,522 AM	19
30/07/2018 09:33:59,012 AM		19	30/07/2018 09:34:27,014 AM	20
30/07/2018 09:33:59,507 AM		19	30/07/2018 09:34:27,516 AM	20
30/07/2018 09:34:00,008 AM		20	30/07/2018 09:34:28,009 AM	20
30/07/2018 09:35:31,003 AM		21	30/07/2018 09:38:27,000 AM	21
30/07/2018 09:35:31,558 AM		20	30/07/2018 09:38:27,514 AM	22
30/07/2018 09:35:32,006 AM		21	30/07/2018 09:38:28,000 AM	22
30/07/2018 09:35:32,552 AM		21	30/07/2018 09:38:28,507 AM	22
30/07/2018 09:35:33,010 AM		21	30/07/2018 09:38:29,000 AM	22
30/07/2018 09:35:33,558 AM		21	30/07/2018 09:38:29,505 AM	21
30/07/2018 09:35:34,003 AM		21	30/07/2018 09:38:30,000 AM	21
30/07/2018 09:35:34,557 AM		21	30/07/2018 09:38:30,509 AM	21
30/07/2018 09:35:35,006 AM		21	30/07/2018 09:38:31,000 AM	21
30/07/2018 09:35:35,575 AM		20	30/07/2018 09:38:31,509 AM	21
30/07/2018 09:35:36,003 AM		21	30/07/2018 09:38:32,000 AM	21
30/07/2018 09:35:36,562 AM		21	30/07/2018 09:38:32,511 AM	21
30/07/2018 09:35:37,002 AM		21	30/07/2018 09:38:33,000 AM	21
30/07/2018 09:35:37,561 AM		21	30/07/2018 09:38:33,508 AM	21
30/07/2018 09:35:38,003 AM		21	30/07/2018 09:38:34,000 AM	21
30/07/2018 09:35:39,003 AM		21	30/07/2018 09:38:34,513 AM	21
30/07/2018 09:35:39,555 AM		21	30/07/2018 09:38:35,000 AM	21
30/07/2018 09:35:40,002 AM		21	30/07/2018 09:38:35,512 AM	21
30/07/2018 09:35:40,558 AM		21	30/07/2018 09:38:36,000 AM	21
30/07/2018 09:35:41,003 AM		21	30/07/2018 09:38:36,509 AM	22
30/07/2018 09:35:41,556 AM		21	30/07/2018 09:38:37,000 AM	22
30/07/2018 09:35:42,002 AM		21	30/07/2018 09:38:37,504 AM	21
30/07/2018 09:35:42,557 AM		22	30/07/2018 09:38:38,000 AM	21
30/07/2018 09:35:43,003 AM		21	30/07/2018 09:38:38,510 AM	21
30/07/2018 09:35:43,552 AM		22	30/07/2018 09:38:39,000 AM	21
30/07/2018 09:35:44,004 AM		21	30/07/2018 09:38:39,504 AM	21
30/07/2018 09:35:44,558 AM		21	30/07/2018 09:38:40,000 AM	21
30/07/2018 09:35:45,004 AM		22	30/07/2018 09:38:40,507 AM	21
30/07/2018 09:35:45,557 AM		22	30/07/2018 09:38:40,892 AM	21

**Elaborado por:** Juan Carlos Mera, Wilson Santos

## Anexo U. Respuesta del sistema set point de 22°C con el control PFC del proceso

04/09/2018 11:50:19,000 AM	1	100	04/09/2018 11:50:59,668 AM	42	98,538462
04/09/2018 11:50:20,003 AM	2	100	04/09/2018 11:51:00,784 AM	43	97,384615
04/09/2018 11:50:20,994 AM	3	100	04/09/2018 11:51:01,739 AM	44	96,307692
04/09/2018 11:50:21,987 AM	4	100	04/09/2018 11:51:02,682 AM	45	95,384615
04/09/2018 11:50:23,919 AM	5	100	04/09/2018 11:51:03,665 AM	46	94,307692
04/09/2018 11:50:24,893 AM	6	100	04/09/2018 11:51:04,624 AM	47	93,307692
04/09/2018 11:50:25,816 AM	7	100	04/09/2018 11:51:05,583 AM	48	92,307692
04/09/2018 11:50:26,776 AM	8	100	04/09/2018 11:51:06,535 AM	49	90,461538
04/09/2018 11:50:27,711 AM	9	100	04/09/2018 11:51:07,485 AM	50	89,323077
04/09/2018 11:50:28,641 AM	10	100	04/09/2018 11:51:08,432 AM	51	88,461538
04/09/2018 11:50:29,575 AM	11	100	04/09/2018 11:51:09,421 AM	52	87,769231
04/09/2018 11:50:30,547 AM	12	100	04/09/2018 11:51:10,379 AM	53	86,323077
04/09/2018 11:50:31,508 AM	13	100	04/09/2018 11:51:11,361 AM	54	85,307692
04/09/2018 11:50:32,462 AM	14	100	04/09/2018 11:51:12,303 AM	55	84
04/09/2018 11:50:33,398 AM	15	100	04/09/2018 11:51:13,267 AM	56	83,076923
04/09/2018 11:50:34,343 AM	16	100	04/09/2018 11:51:14,218 AM	57	82,769231
04/09/2018 11:50:35,421 AM	17	100	04/09/2018 11:51:15,187 AM	58	81,769231
04/09/2018 11:50:36,392 AM	18	100	04/09/2018 11:51:16,136 AM	59	80,769231
04/09/2018 11:50:37,340 AM	19	100	04/09/2018 11:51:17,115 AM	60	79,323077
04/09/2018 11:50:38,286 AM	20	100	04/09/2018 11:51:18,076 AM	61	78,076923
04/09/2018 11:50:39,272 AM	21	100	04/09/2018 11:51:19,015 AM	62	77,076923
04/09/2018 11:50:40,206 AM	22	100	04/09/2018 11:51:19,968 AM	63	76,076923
04/09/2018 11:50:41,180 AM	23	100	04/09/2018 11:51:20,923 AM	64	75,461538
04/09/2018 11:50:42,134 AM	24	100	04/09/2018 11:51:21,886 AM	65	74,230769
04/09/2018 11:50:43,106 AM	25	100	04/09/2018 11:51:22,837 AM	66	73,538462
04/09/2018 11:50:44,061 AM	26	100	04/09/2018 11:51:23,796 AM	67	72,230769
04/09/2018 11:50:45,015 AM	27	100	04/09/2018 11:51:24,756 AM	68	71,076923
04/09/2018 11:50:45,954 AM	28	100	04/09/2018 11:51:25,714 AM	69	70,692308
04/09/2018 11:50:46,906 AM	29	100	04/09/2018 11:51:26,672 AM	70	69,230769
04/09/2018 11:50:47,841 AM	30	100	04/09/2018 11:51:27,622 AM	71	68,230769
04/09/2018 11:50:48,798 AM	31	100	04/09/2018 11:51:28,604 AM	72	67,230769
04/09/2018 11:50:49,739 AM	32	100	04/09/2018 11:51:29,559 AM	73	66,692308
04/09/2018 11:50:50,805 AM	33	100	04/09/2018 11:51:30,507 AM	74	66,538462
04/09/2018 11:50:51,840 AM	34	100	04/09/2018 11:51:31,468 AM	75	64,076923
04/09/2018 11:50:52,808 AM	35	100	04/09/2018 11:51:32,401 AM	76	62,846154
04/09/2018 11:50:53,751 AM	36	100	04/09/2018 11:51:33,369 AM	77	62,692308
04/09/2018 11:50:54,715 AM	37	99,846154	04/09/2018 11:51:34,316 AM	78	60,846154
04/09/2018 11:50:55,662 AM	38	99,538462	04/09/2018 11:51:35,247 AM	79	58,538462
04/09/2018 11:50:56,706 AM	39	99,461538	04/09/2018 11:51:36,221 AM	80	56,692308
04/09/2018 11:50:57,652 AM	40	99,384615	04/09/2018 11:51:37,184 AM	81	54,846154
04/09/2018 11:50:58,603 AM	41	99,384615	04/09/2018 11:51:38,159 AM	82	52,153846
04/09/2018 11:50:59,668 AM	42	98,538462	04/09/2018 11:51:39,118 AM	83	50
04/09/2018 11:51:25,714 AM	69	70,692308	04/09/2018 11:53:09,897 AM	172	0,8461538
04/09/2018 11:51:26,672 AM	70	69,230769	04/09/2018 11:53:10,923 AM	173	0
04/09/2018 11:51:27,672 AM	71	68,230769	04/09/2018 11:53:12,000 AM	174	0
04/09/2018 11:51:28,604 AM	72	67,230769	04/09/2018 11:53:13,056 AM	175	0
04/09/2018 11:51:29,559 AM	73	66,692308	04/09/2018 11:53:14,091 AM	176	0
04/09/2018 11:51:30,507 AM	74	66,538462	04/09/2018 11:53:15,158 AM	177	0
04/09/2018 11:51:31,468 AM	75	64,076923	04/09/2018 11:53:16,159 AM	178	0
04/09/2018 11:51:32,401 AM	76	62,846154	04/09/2018 11:53:17,239 AM	179	0
04/09/2018 11:51:33,369 AM	77	62,692308	04/09/2018 11:53:18,292 AM	180	0
04/09/2018 11:51:34,316 AM	78	60,846154	04/09/2018 11:53:19,344 AM	181	0
04/09/2018 11:51:35,247 AM	79	58,538462	04/09/2018 11:53:20,334 AM	182	0
04/09/2018 11:51:36,221 AM	80	56,692308	04/09/2018 11:53:21,391 AM	183	0
04/09/2018 11:51:37,184 AM	81	54,846154	04/09/2018 11:53:22,429 AM	184	0
04/09/2018 11:51:38,159 AM	82	52,153846	04/09/2018 11:53:23,525 AM	185	0
04/09/2018 11:51:39,118 AM	83	50	04/09/2018 11:53:24,533 AM	186	0
04/09/2018 11:51:40,084 AM	84	49,153846	04/09/2018 11:53:25,571 AM	187	0
04/09/2018 11:51:41,027 AM	85	48,615385	04/09/2018 11:53:26,646 AM	188	0
04/09/2018 11:51:42,002 AM	86	47,307692	04/09/2018 11:53:27,674 AM	189	0
04/09/2018 11:51:43,981 AM	87	46,307692	04/09/2018 11:53:28,676 AM	190	0
04/09/2018 11:51:44,927 AM	88	45,307692	04/09/2018 11:53:29,712 AM	191	0
04/09/2018 11:51:45,881 AM	89	44,153846	04/09/2018 11:53:30,722 AM	192	0
04/09/2018 11:51:46,805 AM	90	43,615385	04/09/2018 11:53:31,757 AM	193	0
04/09/2018 11:51:47,756 AM	91	42,615385	04/09/2018 11:53:32,772 AM	194	0
04/09/2018 11:51:48,684 AM	92	41,153846	04/09/2018 11:53:33,872 AM	195	0
04/09/2018 11:51:49,624 AM	93	40,153846	04/09/2018 11:53:34,935 AM	196	0
04/09/2018 11:51:50,563 AM	94	39,307692	04/09/2018 11:53:35,967 AM	197	0
04/09/2018 11:51:51,519 AM	95	38,461538	04/09/2018 11:53:37,025 AM	198	0
04/09/2018 11:51:52,472 AM	96	37,461538	04/09/2018 11:53:38,045 AM	199	0
04/09/2018 11:51:53,405 AM	97	36,769231	04/09/2018 11:53:39,078 AM	200	0
04/09/2018 11:51:54,364 AM	98	35,461538	04/09/2018 11:53:40,164 AM	201	0
04/09/2018 11:51:55,295 AM	99	34,461538	04/09/2018 11:53:41,233 AM	202	0
04/09/2018 11:51:56,255 AM	100	33,769231	04/09/2018 11:53:42,395 AM	203	0
04/09/2018 11:51:57,274 AM	101	32,923077	04/09/2018 11:53:43,451 AM	204	0
04/09/2018 11:51:58,287 AM	102	32,076923	04/09/2018 11:53:44,535 AM	205	0
04/09/2018 11:51:59,246 AM	103	31,076923	04/09/2018 11:53:45,663 AM	206	0
04/09/2018 11:52:00,268 AM	104	31,461538	04/09/2018 11:53:46,725 AM	207	0
04/09/2018 11:52:01,227 AM	105	30,923077	04/09/2018 11:53:47,855 AM	208	0
04/09/2018 11:52:02,201 AM	106	30,769231	04/09/2018 11:53:48,890 AM	209	0
04/09/2018 11:52:03,177 AM	107	29,230769	04/09/2018 11:53:49,990 AM	210	0
04/09/2018 11:52:04,131 AM	108	28,230769	04/09/2018 11:53:51,007 AM	211	0
04/09/2018 11:52:05,089 AM	109	27,923077	04/09/2018 11:53:52,086 AM	212	0
04/09/2018 11:52:06,050 AM	110	27,923077	04/09/2018 11:53:53,098 AM	213	0
04/09/2018 11:52:07,945 AM	111	25,769231			

Elaborado por: Juan Carlos Mera, Wilson Santos