



**Lazo de Control y Monitoreo para la Temperatura del  
Aire de Carga en las Unidades Allen PS1 de la  
Empresa Sierracol Energy Arauca LLC**

**Oscar Mauricio Díaz Romero**

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica Y Biomédica

Programa De Ingeniería Electromecánica

San José de Cúcuta

2021

# **Lazo de Control y Monitoreo para la Temperatura del Aire de Carga en las Unidades Allen PS1 de la Empresa Sierracol Energy Arauca LLC**

**Oscar Mauricio Díaz Romero**

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

Director:

Ing. **Ciro Antonio Carvajal Labastida**

Línea de Investigación:

Automatización Industrial

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica Y Biomédica

Programa De Ingeniería Electromecánica

San José de Cúcuta

2021

# **Página de aceptación**

## **Página de autorización**

## **Dedicatoria**

*Primeramente, a Dios por ser quien guía mi vida, a mi familia por su apoyo en el alcance de mis metas propuestas en el área profesional y fortaleza en aquellos momentos de dificultad; a mis docentes de la Universidad Antonio Nariño por guiar mi formación y enriquecerme en conocimiento; a mis compañeros de trabajo de la empresa Sierracol Energy Arauca LLC por permitir la realización de todo el proceso investigativo*

## **Agradecimientos**

El autor expresa sus agradecimientos a:

Ing. Msc. CIRO ANTONIO CARVAJAL LABASTIDA, Ingeniero, Coordinador de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Antonio Nariño.

Ing. Ph D. ANTONIO GAN ACOSTA, Ingeniero de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Antonio Nariño, por su ayuda incondicional como asesor.

## Resumen

El trabajo de grado está orientado hacia el diseño de un lazo de control para garantizar el control estable y confiable de la variable de temperatura del aire de carga, en las unidades Allen en la Estación de bombeo PS1 Caño Limón Arauca, de la empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC y así mantener la temperatura ideal de entrada al motor para cumplir con las recomendaciones del fabricante con respecto a la temperatura, la cual se debe mantener en 120°F.

En la actualidad, se encuentra instalado el controlador Micronik 200; éste fue instalado hace 20 años y actualmente no ofrece confiabilidad en el control de temperatura debido a fallas inesperadas que hacen que la válvula de bypass se abra al 100% generando incremento en la temperatura del aire de carga y se generen disparos súbitos de la unidad cuando se alcanzan los 140°F.

**PALABRAS CLAVE:** temperatura, control, monitoreo, scada, carga, lazo, sistema

## **Abstract**

The present degree work is oriented towards the design of a control loop to guarantee the stable and reliable control of the charge air temperature variable, in the Allen units in the PS1 Caño Limón Arauca pumping station, of the SIERRACOL Company. ENERGY ARAUCA LLC to maintain the ideal engine inlet temperature to meet the manufacturer's recommendations for temperature, which should be maintained at 120 ° F.

Currently, the Micronik 200 controller is installed; This was installed 20 years ago and currently does not offer reliability in temperature control due to unexpected failures that cause the bypass valve to open 100% generating an increase in the charge air temperature and sudden trips of the unit are generated when 140 ° F is reached.

**KEY WORDS:** temperatura, control, monitoreo, scada, carga, lazo, sistema.

# Contenido

<b>Página de aceptación.....</b>	<b>3</b>
<b>Página de autorización .....</b>	<b>4</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>5</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>6</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>7</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>8</b>
<b>Contenido.....</b>	<b>9</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>12</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>13</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>14</b>
<b>Introducción y Antecedentes.....</b>	<b>14</b>
<b>1. Fundamentación .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1. El Problema .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. Justificación .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. Objeto.....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.1. Objetivo general .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>1.5. Acotaciones .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5.1. Alcance .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5.2. Limitaciones.....</b>	<b>19</b>
<b>1.6. Legislación .....</b>	<b>19</b>
<b>1.6.1. Impacto ambiental .....</b>	<b>20</b>

1.6.2.	Marco internacional.....	21
1.6.3.	Marco Nacional .....	22
1.6.4.	Marco institucional .....	22
1.6.5.	Licenciamiento de Software .....	23
<b>2.</b>	<b>Argumentación.....</b>	<b>24</b>
2.1.	Antecedentes .....	24
2.1.1.	Nivel Internacional.....	24
2.1.2.	Nivel nacional .....	25
2.2.	Marco Teórico .....	26
2.2.1.	Estación de bombeo PS1.....	26
2.2.2.	Sistemas de control.....	30
2.2.2.2.	Lazo de control por retroalimentación (Feedback) .....	32
<b>3.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>34</b>
3.1.	Tipo de Investigación .....	34
3.2.	Marco Estratégico Táctico .....	35
3.3.	Plan de Trabajo.....	35
3.3.1.	Etapa 1 .....	35
3.3.2.	Etapa 2 .....	36
3.3.3.	Etapa 3 .....	36
<b>4.</b>	<b>Desarrollo del Proyecto .....</b>	<b>38</b>
4.1.	Etapa 1 .....	38
4.1.1.	Estudio de los sensores que usaran para adquisición de datos de las variables de temperatura .....	38
4.1.2.	Modulo interfaz de potencia relé de 4 canales.....	43
4.2.	Etapa 2 .....	44
4.2.1.	Sistema de Control de Temperatura .....	45
4.2.2.	Diseño del lazo de control.....	51
4.2.4.	Acción de dos posiciones o de encendido y apagado (On/Off) .....	52
4.2.5.	Acción de control integral, I.....	56
4.2.6.	Acción de control Proporcional – Integral, PI.....	59
4.2.7.	Significado del tiempo integral. ....	59

4.2.8.	Error y Respuesta en una acción proporcional – integral.....	62
4.2.9.	Acción de control proporcional – derivativa, PD .....	63
4.2.10.	Significado del tiempo derivativo .....	64
4.2.11.	Acción de control proporcional – integral – derivativa, PID .....	68
4.2.12.	Diseño del control PID con el sistema Arduino .....	70
4.3.	Etapa 3 .....	98
4.3.1.	Planos de instrumentación .....	98
4.4.	Análisis Económico .....	100
4.5.	Análisis de Impacto Ambiental.....	101
4.6.	Glosario.....	103
5.	Conclusiones.....	105
6.	Recomendaciones.....	106
	Referencias Bibliográficas.....	107
	Anexos .....	108
A.	Acuerdo de Confidencialidad.....	109

## Lista de figuras

Figura 1. Sala de control empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC	14
Figura 2. Principio de operación del lazo de control	15
Figura 3. Unidad de bombeo PS1	27
Figura 4. Motor de combustión interna marca Allen	29
Figura 5. Descripción del Motor marca Allen	30
Figura 6. Lazo de control de un proceso por retroalimentación	33
Figura 7. Sensor PT-100	40
Figura 8. Arduino Uno R3	41
Figura 9. Distribución interna del Arduino	43
Figura 10. Interfaz de relé	44
Figura 11. Sistema aire de carga unidades Allen	46
Figura 12. Instrumentación del lazo de control	52
Figura 13. Controlador de dos Posiciones	53
Figura 14. Acción Proporcional en un Controlador	55
Figura 15. Acción Integral en un Controlador	58
Figura 16. Acciones Proporcional y Proporcional – Integral	60
Figura 17. Error y Respuesta de un controlador proporcional e integral	62
Figura 18. Respuesta de un controlador proporcional e integral	63
Figura 19. Acción Proporcional y Proporcional – Derivativa	65
Figura 20. Acciones de Control P, PI y PD	67
Figura 21. Acción Proporcional-Integral-Derivativa	69
Figura 22. Acción de control proporcional – integral	70
Figura 23. Sistema a bloques del control PID	71
Figura 24. Culata de un cilindro del motor Allen	76
Figura 25. Culata de un cilindro del motor Allen (Uno de los 8 cilindros en línea)	77
Figura 26. Parte superior de la culata, válvulas de admisión y escape	78
Figura 27. Enfriadores unidad Allen PS1	78
Figura 28. Modelo no lineal	86
Figura 29. Respuesta sintonía por Ziegler y Nichols	88
Figura 30. Respuesta cancelación de polos	89
Figura 31. Respuesta asignación de polos	91
Figura 32. Simulación en proteus del control proporcional – integral – derivativo	95
Figura 33. Sistema eléctrico para el control manual y automático del sistema de refrigeración	99
Figura 34. Planos de instrumentación de interface módulo Arduino	99
Figura 35. Planos de instrumentación electroválvula mariposa	100

## Lista de tablas

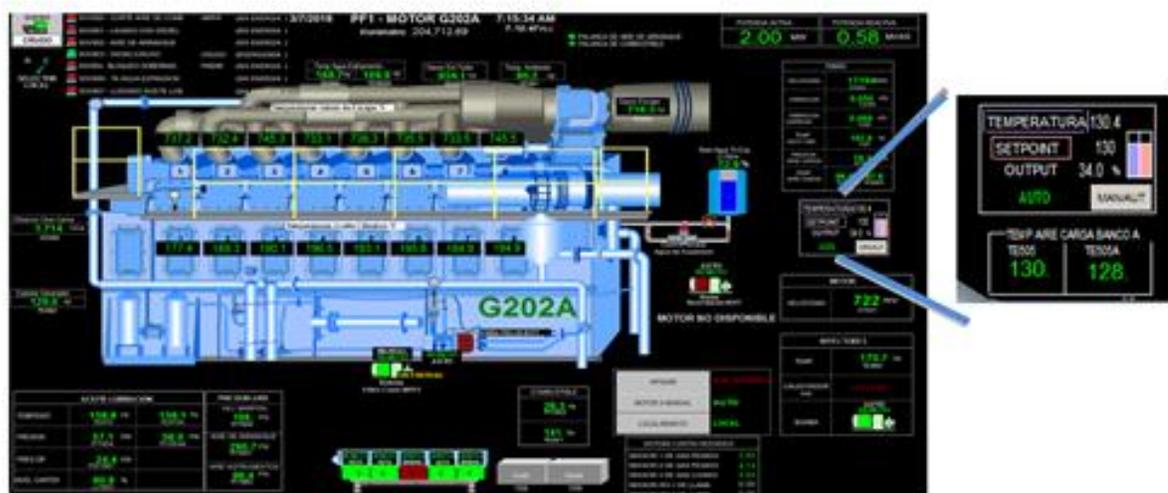
Tabla 1. Elemento de intercambiabilidad PT-100 en °C .....	39
Tabla 2. Características Arduino Uno R3 .....	42
Tabla 3. Especificaciones técnicas.....	44
Tabla 4. Sistema de control de temperatura.....	45
Tabla 5. Parámetros del modelo	39
Tabla 6. Valores constantes de sintonía del controlador PID de temperatura con Arduino	87
Tabla 7. Presupuesto global del proyecto .....	102

## Introducción

### Introducción y Antecedentes

El monitoreo, supervisión y control de cualquier proceso industrial representa para las empresas una serie de beneficios, donde se logra determinar situaciones no favorables en el desarrollo de una tarea de un proceso determinado, evitando que se altere la efectividad y normalidad de un sistema, permitiendo tomar decisiones inmediatas para solucionar el problema.

Figura 1. Sala de control empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC



Fuente: Autor del proyecto.

En el sector petrolero el monitoreo y supervisión resulta fundamental, ya que las empresas buscan realizar todo su proceso garantizando que esté libre de pérdidas y obtener una información confiable de cada pozo de extracción y su sistema de bombeo.

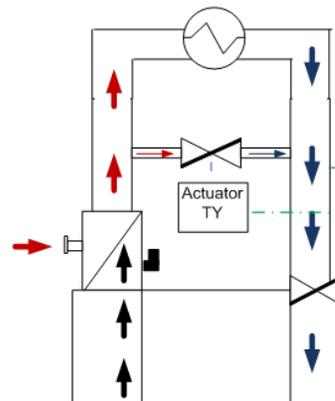
# 1. Fundamentación

## 1.1. El Problema

El principio de Operación del Lazo de control está basado en la variable de temperatura del aire que ingresa al motor de la unidad Allen; los valores de esta variable se usan para realizar el control de la válvula de by-pass que opera de la siguiente forma. Si la temperatura es muy alta se cierra la válvula permitiendo un paso total del aire caliente (comprimido por el turbo) hacia el fancooler, donde es enfriado antes de ingresar al motor.

Si la temperatura es baja respecto al setting o punto de referencia, parte del aire caliente entra en recirculación (sin necesidad de pasar por el fancooler), a través de la válvula de bypass y se mezcla con el aire “fresco” que sale del fancooler, como se puede apreciar en la figura 2.

Figura 2. Principio de operación del lazo de control



Fuente: Autor del proyecto

El lazo de control existente fue instalado hace 20 años, de la marca Micronik 200, trabaja con instrumentación electrónica de 4 a 20 mA; últimamente está presentando fallas y no ofrece confiabilidad en el control de temperatura, debido a fallas inesperadas que hacen que la válvula de by-pass se abra al 100% generando incremento de la temperatura del aire de carga, sacando de servicio en forma súbita la unidad cuando se alcanzan los 140°F que es la temperatura máxima permitida por el fabricante; por tal motivo, se tiene que pasar el control a manual.

## **1.2 Justificación**

En la actualidad el lazo de control se encuentra fuera de sintonía por fallas continuas convirtiéndose en un problema crítico cuando se tiene que pasar de manual a automático debido a que esta maniobra de operación se tiene que realizar desde el campo; ninguno de los elementos del lazo de control cuenta con monitoreo en el sistema de supervisión de sala de control, por lo que se dificulta su seguimiento y sintonización.

Otro inconveniente que no permite el mantenimiento correctivo del lazo de temperatura es que el controlador se encuentra discontinuado por el fabricante y por tal motivo ya no dispone de elementos de repuesto.

Por lo expresado anteriormente, existe una alta aceptación para la realización del trabajo integral de grado por parte de la empresa dando su visto bueno y por lo tanto se firmó un acuerdo de confidencialidad para su ejecución. (Ver Anexo A).

Una vez desarrollado este trabajo de grado, se estará dando cumplimiento al requisito para la obtención del título de Ingeniero Electromecánico por parte del estudiante de la Facultad de Ingeniería Electromecánica proponente del proyecto.

## **1.3 Objeto**

Lazo de control y monitoreo para la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1 de la empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar el lazo de control y monitoreo para la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1 de la empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Seleccionar la instrumentación, hardware y software de control para la adquisición de datos de las variables a controlar en el lazo de control.

Proyectar el diseño del lazo de control y monitoreo para la temperatura del aire de carga

en las unidades Allen PS1.

Esquematar los planos del control e instrumentación para el lazo de control de monitoreo de la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1 según el diseño establecido.

## **1.5 Acotaciones**

Para el desarrollo de este trabajo integral de grado la información de campo obtenida y las bases de datos consultadas, se tomaron de los archivos técnicos de la empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC con el consentimiento de la empresa y la asesoría del personal encargado, limitándose a información específica para el buen desarrollo del proyecto sin vulnerar en ningún momento la seguridad de la empresa, lo anterior quedo consignado en el acuerdo de confidencialidad firmado por la empresa y el estudiante proponente del proyecto.

### **1.5.1 Alcance**

El alcance del proyecto es el diseño del lazo de control y monitoreo para la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1 de la empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC.

Propuesta para mejorar el desarrollo de la investigación en el campo de la automatización

industrial aplicada a la industria petrolera en la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Antonio Nariño UAN sede Cúcuta.

### **1.5.2 Limitaciones**

El trabajo integral de grado se desarrolla en la Universidad Antonio Nariño sede Cúcuta y la empresa Sierracol Energy Arauca Llc de la ciudad de Arauca en un término de cinco meses. Es aplicado a la empresa y al requisito para grado como Ingeniero Electromecánico en el programa de ingeniería Electromecánica.

El desarrollo del trabajo de grado se limita a la proyección del sistema de monitoreo y control del lazo de temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1 de la empresa Sierracol Energy Arauca Llc estación de bombeo de crudo.

## **1.6 Legislación**

En la construcción de cualquier tipo de instalación eléctrica, incluyendo las instalaciones industriales aplicada en la industria del petróleo, existe el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, donde se especifican todas las condiciones mínimas de seguridad, calidad que deben tener las instalaciones eléctricas, como distancias de seguridad, materiales a utilizar y la protección del medio ambiente.

### **1.6.1 Impacto ambiental**

La normativa ambiental se define como el conjunto de objetivos, principios, criterios y orientaciones generales para la protección del medio ambiente de una sociedad particular (Red de Desarrollo Sostenible, Colombia).

La legislación ambiental en Colombia comienza su verdadero desarrollo a partir de la Convención de Estocolmo en 1972, cuyos principios se acogieron en el Código de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente (Decreto Ley 2811 de 1974). Desde el punto de vista de las normas tendientes a la protección del derecho colectivo y el medio ambiente, se puede afirmar que la legislación ambiental en Colombia surge con la Constitución Política de 1991 (Capítulo III “De los derechos colectivos y del Ambiente”, los cuales establecen el marco general a partir del cual toda la política ambiental colombiana debe desarrollarse).

El gobierno de Colombia y el Programa de Naciones Unidas para el desarrollo (PNUD), han suscrito el acuerdo básico de cooperación el 29 de mayo de 1974, y bajo los términos de dicho Acuerdo han convenido la realización de un Proyecto financiado con recursos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) denominado “Mejoramiento de la Eficiencia Energética en Edificaciones Colombianas a través de sinergias entre Convenciones Ambientales”, cuyo organismo de ejecución es la Unidad de Planeación Minero –Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energías de Colombia”.

Decreto Nacional 2857 de 1981: en el cual se dictan las siguientes disposiciones:

Los recursos naturales y demás elementos ambientales deben ser utilizados en forma eficiente, para lograr su máximo aprovechamiento con arreglo al interés general de la comunidad y de acuerdo con los principios y objetos que orientan este Código.

ISO 14001 VERSIÓN 2015: Norma aplicada en el manejo del plan de gestión integral de residuos sólidos.

### **1.6.2 Marco internacional**

A nivel internacional no existen normas específicas para el sistema de control, solo existen normas para la operación de los equipos que se utilizan en el control del proceso de bombeo.

IEEE C57.13.3-2006: Guía para la puesta a tierra de circuitos y cajas secundarias de transformadores de instrumentos.

NETA: Especificaciones de prueba de aceptación para equipos y sistemas de distribución de energía eléctrica.

NFPA70E: Norma de seguridad eléctrica en lugares de trabajo, impuesta por la organización norteamericana National Fire Protección Association.

### **1.6.3 Marco Nacional**

Norma Técnica Colombiana NTC 2050 código eléctrico colombiano.

RETIE: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas.

Norma Técnica Colombiana NTC 4116: Seguridad industrial metodología para el análisis de tareas.

RETIE Capítulo 5 Artículo 36.2. Instalaciones eléctricas especiales clasificadas como peligrosas por el alto riesgo de explosión. Aplicada en exploración, producción, transporte, bombeo, almacenamiento de crudo.

### **1.6.4 Marco institucional**

Acuerdo N° 48 de la Universidad Antonio Nariño para los proyectos de grado, “reglamento de trabajo de grado”. El Consejo Directivo de la Universidad Antonio Nariño en uso de sus Facultades legales y estatutarias y en particular las que son mencionadas en el Reglamento Estudiantil en sus Artículos 9,10, 11, 12 y 43.

### **1.6.5 Licenciamiento de Software.**

PROTEUS Licencia SENA (Convenio UAN-SENA).

ARDUINO Software y Hardware libre.

Software para la simulación de monitoreo por puerto serial del Arduino: SERIAL  
SENSOR PLOT uso libre.

## **2. Argumentación**

### **2.1. Antecedentes**

Se realizó una búsqueda bibliográfica en la red de internet sobre el proyecto de investigación que se adelanta, se puede decir, que no se encontraron trabajos de grado, artículos de revista e informes de investigación, que hagan una referencia específica a la actividad del proyecto. A continuación, se relacionan algunos, trabajos similares al tema en estudio.

#### **2.1.1. Nivel Internacional**

Título: SISTEMA PARA EL CONTROL EN LAZO CERRADO DE LA TEMPERATURA DE TRABAJO DE UNA AGRUPACIÓN INTEGRADA DE MICROSENSORES DE GASES.

Universidad: Universidad Rovira i Virgili, Cataluña, España.

Autor: Jordi Colomer Campos.

Palabras claves: generador de vapor, instrumentación, caracterización, controlador, combustión, eficiencia, alimentación.

Resumen: Realización de un lazo de control que regule la temperatura de los sensores de gases de tecnología micro-hotplate. El sistema será inicializado por ordenador, y utilizará los sensores del grupo de investigación de sensores de gases y nariz electrónica del departamento de ingeniería electrónica de la Universidad Rovira i Virgili. Se realiza el proyecto con el fin de conseguir una mejora en las mediciones de gases, y evitar perturbaciones debidas a las variaciones de la temperatura de trabajo en la capa activa de los sensores.

### **2.1.2. Nivel nacional**

DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL DE COMBUSTIÓN PARA LA REGULACIÓN DEL VAPOR VIVO EN UNA CALDERA INDUSTRIAL.

Universidad: Universidad Autónoma De Occidente, Santiago De Cali.

Autor: Jhonatan Mezu Villegas

Palabras claves: generador de vapor, instrumentación, caracterización, controlador, combustión, eficiencia, alimentación.

Resumen: En el presente documento, se desarrolla la temática necesaria para llevar acabo el diseño integral del lazo de control de combustión, para la regulación eficiente de vapor vivo en la caldera industrial del ingenio azucarero María Luisa S.A. En primera instancia, una vez obtenidos y discutidos los planteamientos realizados por los operarios e ingenieros de caldera, se procedió con el análisis y conceptualización funcional de los componentes actuales del sistema,

relacionados directamente con la operación rutinaria de la caldera en cuanto a la generación de vapor, detallando enfáticamente las características y configuraciones de la instrumentación implicada. Posteriormente se da paso a la explicación de las estrategias de control presentes, para continuar con la formulación de propuestas y conceptos de diseño, que para su selección, se evalúan principalmente de acuerdo a parámetros de eficiencia, costo y compatibilidad. Culminando finalmente con el establecimiento de un estudio costo beneficio, en el que se calcula el valor total de la inversión para la implementación del diseño seleccionado, y se listan los diversos beneficios implicados dentro de la solución escogida.

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1. Estación de bombeo PS1**

La estación de bombeo PS1 cuenta en la actualidad con cuatro unidades de bombeo, compuestas básicamente por un motor diésel marca Allen, una bomba Ingersol Rand, y un incrementador de velocidad.

Para mantener el promedio de bombeo del oleoducto de 200.000 BPD, es necesario que el funcionamiento del motor sea en condiciones confiables, de manera que mantener la temperatura de los componentes en niveles adecuados es de vital importancia; para tal fin, las unidades de bombeo cuentan con sistemas de refrigeración de agua, aceite y aire.

Figura 3. Unidad de bombeo PS1



Fuente: Autor del proyecto.

### 2.2.1.1. Aire de carga

Durante el día es necesario limitar la velocidad de operación de las maquinas debido a:

- Altas temperaturas de gases de escape.
- Alta temperatura en el circuito de aceite.
- Alta temperatura en el agua de camisas

Para mantener en condiciones confiables el motor se hace necesario obtener una reducción en la magnitud de los parámetros térmicos de operación en las unidades Allen de PS1 mediante el aumento de eficiencia de los sistemas de refrigeración con el fin de estabilizar y mantener al máximo posible los niveles de bombeo y reducir los esfuerzos originados por fatiga térmica y mecánica debido a las disminuciones en las velocidades de operación.

### **2.2.1.2. Impacto en la unidad y la compañía**

Con la reducción de la magnitud de los parámetros térmicos de operación de las unidades de PS1 se logra:

Aumentar la capacidad de bombeo neta.

Aumento en la confiabilidad de los equipos.

Reducción en los esfuerzos por fatiga mecánica y térmica en las máquinas.

### **2.2.1.3. Análisis en la estación de bombeo**

La Estación de bombeo PS1 funciona en paralelo con la Estación de Bombeo Samoré, se construyó con la función de impulsar el crudo proveniente del campo Caño Limón hacia la Estación Samoré o Banadia según el flujo con el que se esté operando.

### **2.2.1.4. Motor de combustión interna marca Allen**

Es un motor de combustión interna con ciclo de 4 tiempos, encendido por compresión con turbo cargador y enfriador de aire de sobrealimentación, diseñado para funcionar con combustibles ligeros (Diésel) y pesados (fuel oil). Los motores constan de 8 cilindros en línea.

Figura 4. Motor de combustión interna marca Allen



Fuente: Autor del proyecto.

Descripción del motor Allen.

Características Generales:

RPM: 720      SERIE: 8S37G-HBA.

Rotación: Standard. (CCW).

HP 3520. KW 2400.

STROKE: 370 mm.

Cilindros: 8 en línea.

El aire de la atmósfera se presuriza por el turbo cargador, se enfría en los fan cooler y se envía a las válvulas de admisión. Las válvulas de admisión y de escape se abren simultáneamente durante cierto tiempo a cada lado del punto muerto superior del pistón. Esto permite que el aire

sobrealimentado entrante asista a barrer los gases de escape y a enfriar las cámaras de combustión.

El turbo cargador está comprendido por una turbina de gases la cual se encuentra mecánicamente acoplada a un compresor centrífugo que suministra el aire desde el ambiente a los cilindros. El compresor es autorregulado con la carga de la máquina.

El turbo cargador se lubrica por un sistema independiente al sistema de lubricación del motor, las envueltas de entrada y salida de gases están enfriadas por agua que se toma del sistema de agua del motor.

Figura 5. Descripción del Motor marca Allen



Fuente: Autor del proyecto.

### **2.2.2. Sistemas de control**

En un proceso industrial algunas variables como la temperatura, presión, flujo o nivel de líquido en un tanque son determinantes para su operación, de tal manera que se hace necesario

mantener regulados sus valores deseados para garantizar la estabilidad y seguridad de este. Esto se realiza mediante dispositivos (controladores) diseñados para desarrollar una acción sobre las desviaciones que se observen en los valores de dichas condiciones. Lo anterior requiere del acoplamiento con un mecanismo de medición y transmisión (Sensor/Transmisor) de la variable de proceso como fuente de información para la acción correctiva junto con otro mecanismo de ejecución de la acción reguladora decidida por el controlador.

Por acción básica de regulación se entiende que el controlador amplifique, integre o derive la información de entrada o desarrolle una suma entre algunas de estas acciones. De acuerdo a esto, los controladores que usualmente se incluyen dentro de un proceso son los de acciones proporcional (P), proporcional – integral (PI), proporcional – derivativo (PD) y proporcional – integral – derivativo (PID). Para algunas situaciones se justifica un control denominado de dos posiciones o de encendido y apagado (On/Off).

Casi todos los controladores industriales emplean como fuente de energía la electricidad o la presión de un fluido como el aire. Los controladores también pueden clasificarse, de acuerdo con el tipo de energía que utilizan en su operación, como neumáticos, hidráulicos o electrónicos. El tipo de controlador que se use debe decidirse con base en la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

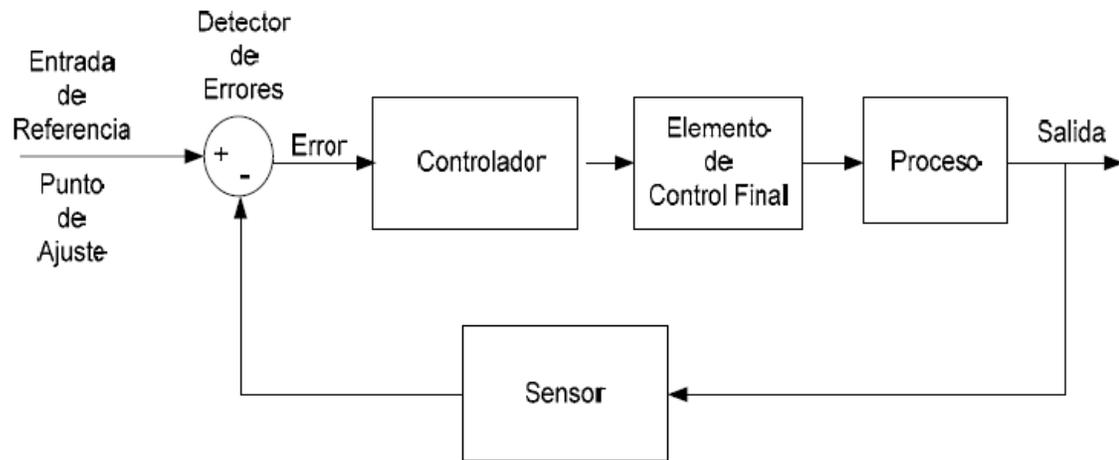
### **2.2.2.1. Estructura de un sistema de control**

El control de una variable de proceso requiere de una estructura que incluye cuatro elementos (Proceso, Sensor, Controlador, Elemento de Control Final) conectados de tal manera que se establece un flujo de información que si es recirculada se describe como un lazo de control retroalimentado (Feedback). Si el controlador desarrolla su acción sin alimentarse de la información que se observa en la variable de proceso, se dice que es un control anticipatorio (Feedforward).

### **2.2.2.2. Lazo de control por retroalimentación (Feedback)**

La Figura 6 es un diagrama de bloques de un sistema de control industrial que consiste en un controlador automático, un elemento de control final, un proceso y un sensor (elemento de medición). Es un lazo cerrado donde la variable de salida del proceso se mide y retroalimenta al controlador quien determina el error de dicha medida con su valor de referencia y genera una acción que ejecuta el elemento de control final para ajustar la variable de control al valor deseado. El controlador detecta la señal de error, que por lo general está en un nivel muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficientemente alto. La salida del controlador automático se alimenta a un elemento de control final como un motor hidráulico o eléctrico o una válvula neumática. Este elemento de control final es un dispositivo de potencia que produce la entrada al proceso de acuerdo con la señal de control, con el fin de que la señal de salida se aproxime a la señal de entrada o de referencia.

Figura 6. Lazo de control de un proceso por retroalimentación



Fuente: Autor del proyecto.

El sensor o elemento de medición es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, tal como un desplazamiento, una presión o un voltaje que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. Este elemento está en la trayectoria de retroalimentación del sistema en lazo cerrado. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de retroalimentación del sensor o del elemento de medición.

## **3. Metodología**

### **3.1. Tipo de Investigación**

La realización de este trabajo integral de grado se fundamenta en la investigación aplicada con el análisis de la información consultada y recopilada con referencia a las especificaciones técnicas de los equipos e instrumentación necesaria en la proyección del lazo de control y monitoreo del sistema de temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1 de la empresa Sierracol Energy Arauca Llc.

Al realizar el análisis técnico de las características de cada uno de los componentes eléctricos, control electrónico, instrumentación y comunicaciones industriales que se aplicaron en el diseño, se puede aseverar que se aplicaron los conceptos de investigación aplicada y técnicas de la ingeniería electromecánica en la solución de la problemática planteada.

Con la investigación realizada se logró desde el análisis técnico y el trabajo de campo a través de la proyección y la información obtenida en el rastreo bibliográfico efectuado en manuales técnicos de equipos y procesos de producción de la empresa Sierracol Energy Arauca Llc, aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera en las áreas de circuitos eléctricos, electrónica analógica, electrónica digital, sistemas automáticos de control, instrumentación industrial, teoría de control, incursionado en el desarrollo de tecnologías de sistemas embebidos aplicados en la industria 4.0 para sistemas de control y monitoreo.

## **3.2. Marco Estratégico Táctico**

El desarrollo del proyecto se centra en el análisis y aplicación de los datos técnicos recopilados en la investigación de campo específicamente en el lazo de control de la temperatura instalado en las unidades Allen PS1. Esta forma de investigación técnica nos permite aprender sobre los diferentes parámetros, procesos y tecnologías que se utilizan en los protocolos de adquisición y transmisión de datos centrándose en las técnicas de monitoreo y control de los equipos que intervienen en la operación de bombeo del crudo logrando una producción eficiente, eficaz y amigable con el medio ambiente.

## **3.3. Plan de Trabajo**

Para la ejecución del trabajo integral de grado, fue conveniente utilizar una metodología de desarrollo donde se integran los objetivos anteriormente expuestos y fundamentados en el marco conceptual para recolectar y analizar la información en forma precisa por medio de las actividades propuestas en cada una de las siguientes etapas que fueron asignadas a cada objetivo.

### **3.3.1. Etapa 1**

Seleccionar la instrumentación, hardware y software de control para la adquisición de datos de las variables a controlar en el lazo de control.

Para alcanzar este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

Estudiar y definir los sensores que se van a usar para adquisición de datos de las

variables.

Estudiar y definir el hardware y el software que se va a utilizar en el proceso de toma de datos.

### **3.3.2. Etapa 2**

Proyectar el diseño del lazo de control y monitoreo para la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1.

Para alcanzar este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

Estudio de campo de los elementos instalados en el antiguo lazo de control.

Realizar el diseño del sistema del lazo de control y monitoreo para la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1.

Ejecutar la simulación del diseño en el simulador de Proteus y validar el funcionamiento de este.

### **3.3.3. Etapa 3**

Esquematizar los planos del control e instrumentación para el lazo de control de monitoreo de la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1 según el diseño establecido.

Para alcanzar este objetivo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

Dibujar los planos de instrumentación del de lazo de control y monitoreo de acuerdo con el diseño establecido.

Dibujar los planos de la parte eléctrica y de control electrónico del sistema de monitoreo y control de acuerdo con el diseño establecido.

## 4. Desarrollo del Proyecto

### 4.1. Etapa 1

Seleccionar la instrumentación, hardware y software de control para la adquisición de datos de las variables a controlar en el lazo de control.

Para alcanzar este objetivo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

Estudiar y definir los sensores que se van a usar para adquisición de datos de las variables.

Estudiar y definir el hardware y el software que se va a utilizar en el proceso de toma de datos.

#### **4.1.1. Estudio de los sensores que usaran para adquisición de datos de las variables de temperatura**

Los sensores Pt100 son un tipo específico de detector de temperatura RTD (detector de temperatura por resistencia). La característica más importante de los elementos Pt100 es que están fabricados con platino con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0 °C y es con diferencia el tipo más común de sensor RTD.

- Sensor RTD PT-100

Los sensores Pt100 se fabrican utilizando materiales y procesos similares a los que son empleados en la fabricación de circuitos integrados. Una película de platino se deposita sobre un sustrato de cerámica que se encapsula. Este método permite la producción de sensores precisos, pequeños, y de respuesta rápida.

Precisión de los sensores Pt100. La norma internacional IEC 751 especifica las tolerancias de los sensores RTD industriales. Hay dos tolerancias principales definidas para sondas Pt100: clase A, con una tolerancia de  $\pm 0,15$  ° C a 0 ° C y clase B, con una tolerancia de  $\pm 0,3$  ° C a 0 ° C. Hay 2 clases de precisión adicionales para el trabajo de precisión y estos se conocen comúnmente como "1/10 DIN" y "1/3 DIN"; esto significa una tolerancia de 1/10 o 1/3 de la especificación de clase B a 0 ° C respectivamente. La lista completa de las tolerancias de la clase A, B, 1/10 y 1/3 se enumera en el siguiente cuadro.

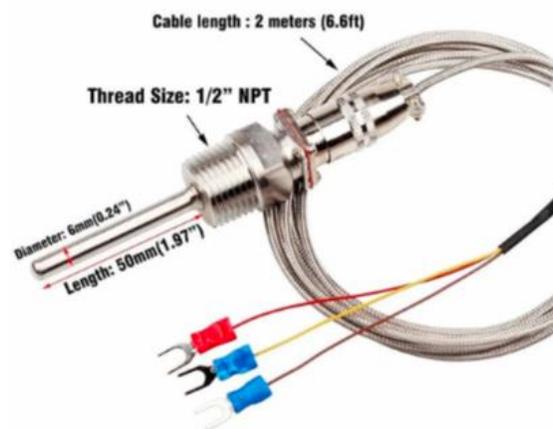
Tabla 1. Elemento de intercambiabilidad PT-100 en °C

Temp C	Clase B	Clase A	1/3 DIN	1/10 DIN
-200	1.30	-	-	-
-100	0.80	-	-	-
-50	0.55	0.25	0.18	-
0	0.30	0.15	0.10	0.03
100	0.80	0.35	0.27	0.08
200	1.30	0.55	0.43	-
250	1.55	0.65	0.52	-
300	1.80	0.75	-	-

Continuación Tabla 1.

350	2.05	0.85	-	-
400	2.30	0.95	-	-
450	2.55	1.05	-	-
500	2.80	-	-	-
600	3.30	-	-	-

Figura 7. Sensor PT-100



- Hardware y software que se utilizó en el proceso de toma de datos

Para la adquisición de datos se utilizó sistemas embebidos de la familia arduino UNO.

Figura 8. Arduino Uno R3



Fuente: <https://i2.wp.com/descubrearduino.com/wp-content/uploads/2016/09/arduino-uno1.jpg?resize=632%2C450&ssl=1>

El Arduino Uno es un sistema embebido que está formado por una placa de hardware que se basa en el microcontrolador ATmega328. Su estructura de comunicación con el mundo exterior se soporta en un bloque de entradas y salidas analógicas y digitales distribuidas de la siguiente forma:

- 14 puertos digitales de entrada / salida de los cuales 6 los puede utilizar como salidas PWM.
- 6 entradas analógica.
- Un oscilador de cristal de 16 MHz.
- Puerto con conexión USB.
- Conector de alimentación externa y un pulsador de reset.

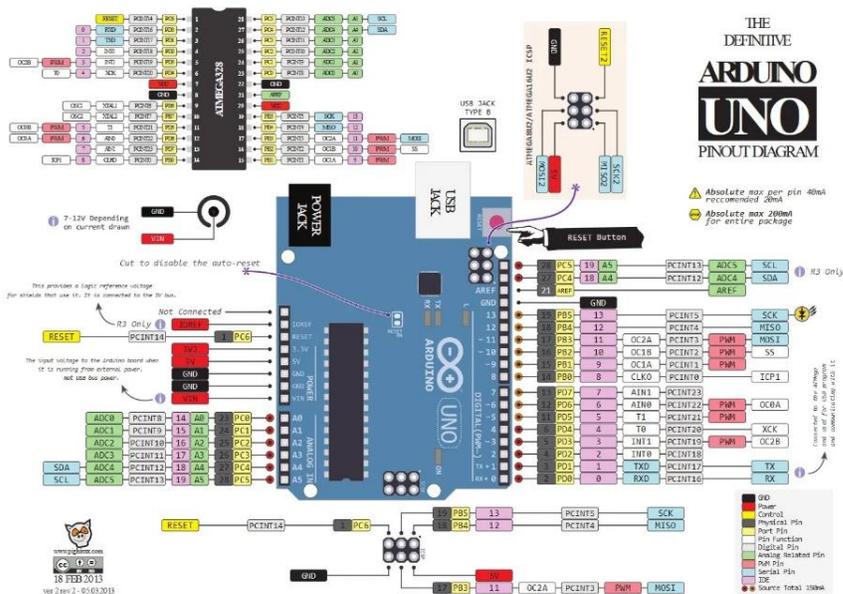
El software de la placa incluye un controlador USB que puede simular un ratón, un teclado y el puerto serie.

Esta tarjeta puede ser administrada por programas básicos que viene con la tarjeta o con otros programas como MyOpenLab, Basic, lenguaje C y JAVA.

Tabla 2. Características Arduino Uno R3

<b>Microcontrolador</b>	ATmega328
<b>Voltaje de operación</b>	5V
<b>Voltaje de entrada (recomendado)</b>	7-12V
<b>Voltaje de entrada (límites)</b>	6-20V
<b>Pines de E/S digitales</b>	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
<b>Pines de entrada analógica</b>	6
<b>Corriente DC por pin de E/S</b>	40 mA
<b>Corriente DC para 3.3V Pin</b>	50 mA
<b>Memoria Flash</b>	32 KB de los cuales 0,5 KB utilizados por el <u>bootloader</u>
<b>SRAM</b>	2 KB (ATmega328)
<b>EEPROM</b>	1 KB (ATmega328)
<b>Velocidad de reloj</b>	16 MHz

Figura 9. Distribución interna del Arduino

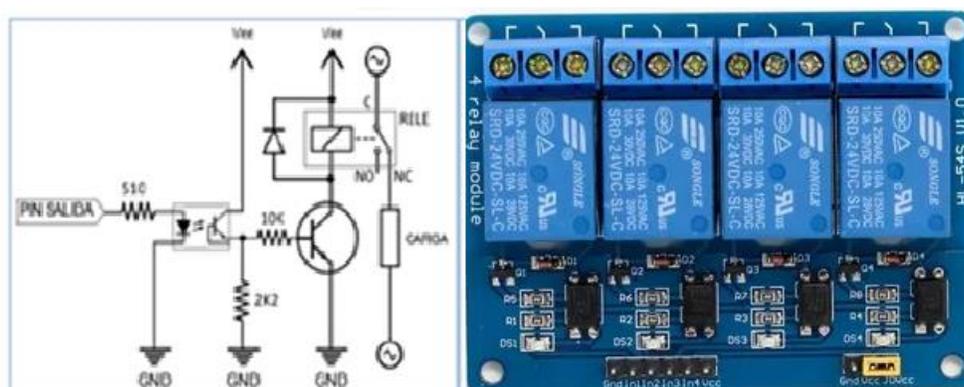


#### 4.1.2. Modulo interfaz de potencia relé de 4 canales

Se caracteriza por ser la encargada de aislar la etapa de control en la cual se maneja cargas de baja tensiones o corrientes, con la etapa que maneja cargas más elevadas en tension y corriente.

Este módulo relé de cuatro canales dispone de optoacopladores y posee 3 terminales VCC, GND, y una entrada de señal de lógico, tiene la capacidad para manejar cargas con una corriente máxima de 10A y hasta 250VAC. El módulo es accionado por 5V, en donde cada uno necesita entre 15mA y 20mA.

Figura 10. Interfaz de relé



Fuente: <https://i2.wp.com/descubrearduino.com/wp-content/uploads/2018/10/arduino-Pinout.jpg?resize=1024%2C737&ssl=1>.

Tabla 3. Especificaciones técnicas

<b>Plataforma</b>	Arduino, 8051, AVR, PIC, DSP, ARM, MSP430, TTL
<b>Normas internacionales de seguridad</b>	Control de carga, área regional de tanque de aislamiento
<b>Aislamiento</b>	Si
<b>Interfaz</b>	Estándar
<b>Control</b>	Dispositivos varios/cargas
<b>Voltaje de operación</b>	250VAC/30VDC
<b>Voltaje de la bobina (relé)</b>	5V
<b>Corriente de operación</b>	10A
<b>Corriente de activación por relé</b>	15mA~20mA
<b>Canales</b>	2 (independientes protegidos con <u>Optoacopladores</u> )
<b>LED indicador</b>	Para cada canal (cuando bobina está activa)

## 4.2. Etapa 2

Proyectar el diseño del lazo de control y monitoreo para la temperatura del aire de carga

en las unidades Allen PS1.

Para alcanzar este objetivo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

Estudio de campo de los elementos instalados en el antiguo lazo de control.

Realizar el diseño del sistema del lazo de control y monitoreo para la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1.

Ejecutar la simulación del diseño en el simulador de Proteus y validar el funcionamiento de este.

#### 4.2.1. Sistema de Control de Temperatura

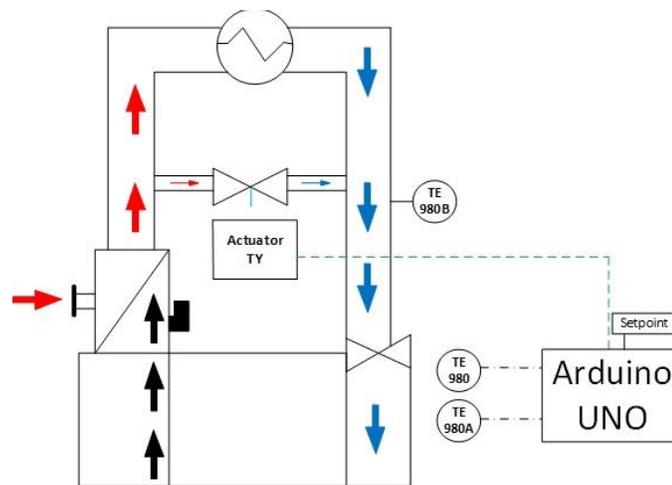
Se realizó un estudio de campo de acuerdo con el sistema que estaba instalado para establecer las condiciones de operación del nuevo sistema de control de temperatura de aire de carga que consta de los siguientes elementos:

Tabla 4. Sistema de control de temperatura

Tag	Descripción	Elemento de control
TE-980-	Sensor temperatura aire de carga RTD PT100	Variable de proceso
TE-980A	Sensor temperatura aire de carga RTD PT100	Variable de proceso
TCV-980	Válvula mariposa Bypass radiadores 6"	Elemento final de control
TY-980	Actuador eléctrico Válvula mariposa (Modutrol MS7520H)	---
ZT-980		
TIC-980	Controlador de Temperatura programado en Arduino Uno	Controlador

Fuente: Autor del proyecto

Figura 11. Sistema aire de carga unidades Allen



Fuente: Autor del proyecto

En la figura 11 se establece la propuesta para el cambio del control análogo en el lazo de control con instrumentación de 4 a 20 mA existente; de acuerdo a lo encontrado en el campo las señales de los sensores de temperatura y la salida de control al actuador de la válvula se tienen disponibles para que sus datos sean leídos directamente por el sistema embebido Arduino UNO al igual que la retroalimentación de posición actual de la válvula TCV-980. En la gráfica se establece para el diseño la nueva propuesta la cual implica los menores cambios posibles en el sistema en cuanto cableado y nuevos equipos, realmente se hace compatible en 95% con el sistema instalado, representando esto un ahorro significativo en trabajo técnico de montaje y economía en términos generales.

#### 4.2.1.1. Estrategia de control

La estrategia de control describe las acciones que realiza el sistema de control

Arduino asociado las unidades Allen PS1 sobre la válvula by pass de control TCV-980.

El Arduino uno, está programado para realizar la adquisición de datos de campo de la máquina, procesar la información y ejecutar las diferentes acciones de control sobre la unidad de generación, incluyendo, el control PID para realizar la apertura/cierre de la válvula de bypass TCV-980 para mantener una temperatura de aire de carga uniforme de acuerdo a un setting o punto de seteo establecido por el operador y fijado a través del sistema de supervisión.

#### **4.2.1.2. Estrategia de control sincronizada con la sala de mando**

El Coordinador en sala de control, a través del sistema de supervisión tendrá las siguientes opciones:

Selección del modo de operación del control de la válvula: AUTO / MANUAL, El modo manual le permitirá al operador fijar el porcentaje deseado de apertura de la válvula. En modo automático se habilita un controlador PID que teniendo como variable de proceso la temperatura de aire de entrada al motor (TE-980 / TE-980A), establecerá la salida requerida hacia el posicionador de la válvula TCV-980 para mantener una temperatura uniforme sobre el setpoint fijado.

Configuración de la temperatura de setpoint dentro de un rango establecido.

Visualización de tendencias de la salida de control al actuador y su retroalimentación de la posición actual.

Adicionalmente, de acuerdo con las condiciones de proceso de las variables de temperatura (Temperatura de agua de enfriamiento TE-969 / TE-969A, temperatura de aceite lubricante TE-970 / TE-970A, Temperatura de aire de carga TE-980/980A y porcentaje de apertura de la válvula de control TCV-980) se realizará en forma automático un control de apagado / encendido de ventiladores.

#### **4.2.1.2.1. Estrategia de control en modo manual**

En modo manual, el operador podrá fijar el porcentaje de apertura de la válvula deseado. El controlador debe ajustar la salida hacia el actuador de la válvula para llevarla gradualmente al porcentaje fijado.

#### **4.2.1.2.2. Estrategia de control en modo automático**

En modo automático, el Arduino UNO ejecutará un control PID ajustando la salida de control al actuador de la válvula TY-980 para minimizar el error entre el set-point y la variable de proceso, garantizando un perfil de temperatura uniforme, adaptándose a las condiciones externas del lazo como lo son la temperatura ambiente, la potencia entregada por la unidad, el encendido / apagado de ventiladores en el radiador. El control PID debe cumplir las siguientes características:

La señal de proceso de entrada al PID se debe seleccionar automáticamente entre la mayor de las dos señales de temperatura disponibles: TE-980 y TE-980A, si alguna de las señales de temperatura se encuentra en modo falla o mantenimiento, el control debe ser

ejecutado por la señal de temperatura entregada por el sensor en servicio.

El control no permite la puesta en modo mantenimiento de las dos señales redundantes al mismo tiempo. El set-point debe ser configurable desde el sistema de supervisión iFIX y estar limitado por el controlador entre 90 °F y 130 °F. El controlador para alcanzar el set-point debe ajustar la señal de salida al actuador TY-980 (0-100%), de acuerdo a la salida del control PID.

Para incrementos de temperatura (Apertura de la válvula) esta salida de control debe tener limitación por tasa de cambio configurable en el Arduino en unidades de % de apertura /min, para decremento de temperatura, (cierre de la válvula) no se debe tener limitación. El límite superior aceptable para la salida de control hacia el actuador TY-980 debe permitir limitarse en un valor fijo.

La sintonización del lazo de control debe priorizarse para evitar sobre picos (Max +/- 5 °F) en el primer ciclo y con una desviación permisible de máximo 3 °F en estado estable. En estado transitorio (En un arranque de máquina o después de un cambio de set-point) la respuesta del lazo debe llegar a estado estable en un tiempo entre 30 segundos y 3 minutos.

#### **4.2.1.2.3. Modo falla del lazo de control**

Se encuentran los siguientes:

- Ante la falla de energía, el control debe llevar la válvula a su estado seguro: FC - Cierre.

- Ante la falla de uno de los sensores de temperatura, el control debe pasar inmediatamente a hacer control por el segundo sensor disponible.
- Ante la falla de ambos sensores de temperatura a la vez, el control debe llevar la válvula a su estado seguro FC – Cierre
- Ante la presencia de una alarma por alta temperatura de aire de carga (temperatura superior a 140°F), se presume falla en el lazo de control, por lo que el controlador deberá pasar el lazo a modo manual y llevar la válvula a su posición de cierre (0% de apertura).

#### **4.2.1.2.4. Estrategia de control apagado / encendido de ventiladores**

Durante la operación del sistema de control de temperatura en modo automático, se puede presentar la situación en la que la válvula esté abierta al máximo y aún la temperatura no alcance el setting establecido, produciendo condensación de agua; en este caso el controlador deberá tomar la acción de apagado de uno o máximo dos ventiladores, según el siguiente criterio:

Si el lazo de control se encuentra en modo auto y la temperatura de aire de carga (TE-980 / TE-980A) es menor o igual a 120 °F y si la válvula se encuentra con una apertura igual o mayor al 80% del valor máximo de salida, y, si la temperatura de agua de enfriamiento (TE-969 / TE-969A ) es menor o igual a 178 °F, y, si la temperatura de aceite lubricante (TE-970 / TE-970A) es menor o igual a 157 °F; entonces el control debe dar la orden de apagado a un ventilador y esperar un tiempo de 10 mins para volver a hacer la evaluación de temperatura y decidir si se requiere apagar un segundo ventilador.

Si el lazo de control de temperatura se encuentra en modo auto y la temperatura de agua de enfriamiento (TE-969 o TE-969A ) es mayor o igual a 185 °F, o la temperatura de aceite lubricante (TE-970 o TE-970A) es mayor o igual a 165 °F o la temperatura de aire de carga (TE-980 o TE-980A) es mayor o igual 125°F y la válvula de control opera por debajo del 5% de apertura se evalúa si alguno de los ventiladores sujetos de control están apagados, de ser así, se da orden de encendido a un ventilador y se esperan 20 seg, para evaluar nuevamente las condiciones de temperatura y apertura de la válvula para determinar si se debe encender un segundo ventilador, Si la temperatura de aire de carga (TE-980 o TE-980A) llega a su set de alarma (140 °F) el control debe encender la totalidad de los ventiladores, cerrar la válvula, y pasar el lazo a modo manual alertando de esta situación en el sistema de supervisión.

El sistema debe ser capaz de detectar falla de arranque de algún ventilador y reportarlo al sistema de supervisión

#### **4.2.2. Diseño del lazo de control**

Se toma los elementos de campo en base al estudio realizado para saber cuáles se reutilizan. En realidad, se va a rediseñar el lazo existente se plantea un objetivo para ese nuevo diseño de acuerdo con la estrategia de control diseñada la cual fue avalada por el jefe de operación.

Se debe Garantizar un control estable y confiable en el lazo de temperatura de aire de carga, en las unidades Allen en la estación de bombeo PS1, manteniendo la temperatura ideal de entrada al motor siguiendo las recomendaciones del fabricante: 120°F.

Figura 12. Instrumentación del lazo de control



Fuente: Autor del proyecto

### 4.2.3. Acciones de los controladores

Las acciones que realiza un controlador son las decisiones que se requieren para compensar las perturbaciones observadas en la variable de proceso y que son transmitidas al elemento de control final para que las ejecute. A continuación, se estudian las acciones de los controladores PID, además de la acción de dos posiciones.

### 4.2.4. Acción de dos posiciones o de encendido y apagado (On/Off)

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de control final sólo tiene dos posiciones fijas que es, en muchos casos, encendido o apagado.

En el control de dos posiciones, la señal de salida,  $m(t)$  permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de error,  $e(t)$ , es positiva o negativa. De este modo,

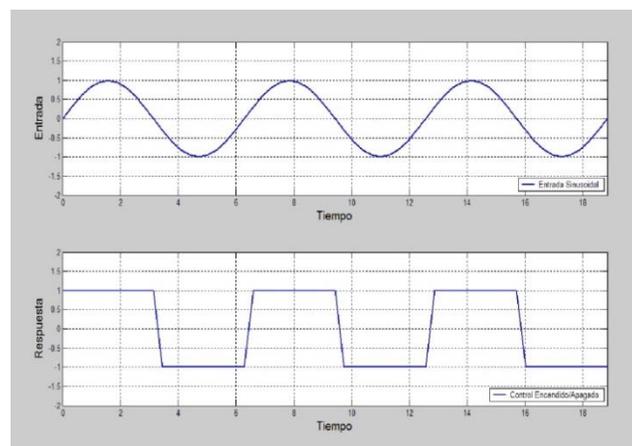
$$m(t)=M1, \quad e(t)>0$$

$$m(t)=M2, \quad e(t)<0$$

En donde M1 y M2 son constantes. Es común que los controladores de dos posiciones sean dispositivos eléctricos, por ejemplo, una válvula eléctrica operada por solenoides.

La Figura 9 superior muestra la entrada sinusoidal de amplitud uno y frecuencia 1.0 rad/seg a un controlador encendido/apagado. La respuesta del controlador observada en la Figura 13 inferior, muestra que mientras la onda sinusoidal es positiva el controlador se mantiene en la posición encendido (1) y cuando la onda sinusoidal cambia a valores negativos el controlador cambia a la posición apagado (-1) y sucesivamente alterna entre las dos posiciones de acuerdo con el valor que tome su variable de entrada.

Figura 13. Controlador de dos Posiciones



Fuente: Programa Matlab

Acción de control proporcional, P

Para una acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador,  $m(t)$  y la señal de error,  $e(t)$  es:

$$m(t) = K_c e(t)$$

O bien, en cantidades transformadas por el método de Laplace,

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c$$

Para el estudio de la acción proporcional se consideró un lazo cerrado de control retroalimentado de una variable de un sistema de segundo orden con ganancia de  $1/8$  y dos polos con valores de  $-1/2$  y  $-1/4$ . La ganancia del controlador proporcional es de 2 y se considera tanto a la válvula como el sensor como sistemas de ganancia pura con valores de 2 y 1, respectivamente. La respuesta del sistema ante un cambio paso en la variable de entrada se desarrolló con el programa de Matlab `proporcional.m` que se muestra a continuación.

Programa `proporcional.m`

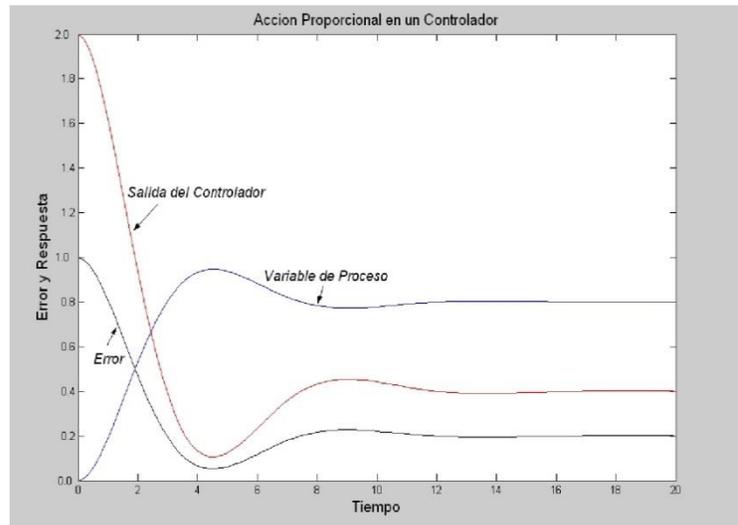
```
%UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE CUCUTA
%INGENIERIA ELECTROMECHANICA
%LAZO DE CONTROL Y MONITOREO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE DE CARGA EN LAS
%UNIDADES ALLEN PS1 DE LA EMPRESA SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC
%OSCAR MAURICIO DIAZ ROMERO
%CONTROL PROPORCIONAL
function f = prop(t,y)
Kc = input('Ganancia del Controlador = ');
Kv = input('Ganancia de la Valvula = ');
```

```

Ks = input('Ganancia del Sensor = ');
K = input('Ganancia del sistema = ');
dX = input('Cambio paso en la variable de entrada = ');
to = input('Tiempo de Simulacion = ');
n = input('Numero de polos en la funcion de transferencia del sistema = ');
m = input('Numero de zeros en la funcion de transferencia del sistema = ');
for i = 1:n
fprintf('Polo Numero %1.0f \n',i);
p(i) = input('Valor = ');
if i < m +1
fprintf('Zero Numero %1.0f \n',i);
z(i) = input('Valor = ');
elseif m == 0
z = [];
end
end
Gp = zpk(z,p,K);
G = [1 0 Ks; Kc -1 0; 0 Kv*Gp -1];
B = [1; 0; 0];
R = (inv(G))*B*dX;
[y,t] = step(R,to);
plot(t,y(:,1),'k',t,y(:,2),'r',t,y(:,3),'b')
title('Accion Proporcional en un Controlador', 'FontSize',14);
xlabel('Tiempo', 'FontSize',14);
ylabel('Error y Respuesta', 'FontSize',14);

```

Figura 14. Acción Proporcional en un Controlador



Fuente: Programa Matlab

Se muestra la variación del error que se alimenta al controlador proporcional y la

amplificación que hace éste de dicha información de acuerdo al valor de la ganancia; y que la variable de proceso se estabiliza con el control proporcional después de un período de perturbación.

Lo anterior quiere decir que en la respuesta del control proporcional hay un error en estado estable o desplazamiento (offset) para una entrada con un cambio paso. Este desplazamiento se elimina si se incluye la acción de control integral en el controlador.

#### 4.2.5. Acción de control integral, I

En una acción de control integral, la rapidez de cambio en la respuesta del controlador,  $m(t)$  es proporcional al error,  $e(t)$ , es decir,

(4.1)

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_c e(t)$$

O bien,

(4.2) 
$$m(t) = \int_0^t e(t)dt$$

En donde  $K_c$ , es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral es:

(4.3)

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_c}{s}$$

A partir de la ecuación (4.2) se deduce que si, por ejemplo, se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $m(t)$  varía dos veces más rápido y a partir de la ecuación (4.3) se explica que cuando el error se hace igual a cero, el valor de  $m(t)$  permanece constante. En ocasiones, la acción de control integral se denomina Control de Reajuste (Reset).

La ilustración gráfica de la acción integral se muestra en la Figura 14 construida con el programa de Matlab `integral.m`. Se asigna una ganancia de 0.5 al controlador integral y se considera tanto a la válvula como el sensor como sistemas de ganancia pura con valor de 1. El sistema utilizado es de segundo orden con ganancia de  $1/8$  y dos polos con valores de  $-1/2$  y  $-1/4$  y la variable de entrada se perturba con un cambio paso unitario.

#### Programa `integral.m`

```
%UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE CUCUTA
%INGENIERIA ELECTROMECHANICA
%LAZO DE CONTROL Y MONITOREO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE DE CARGA EN LAS
%UNIDADES ALLEN PS1 DE LA EMPRESA SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC
%OSCAR MAURICIO DIAZ ROMERO

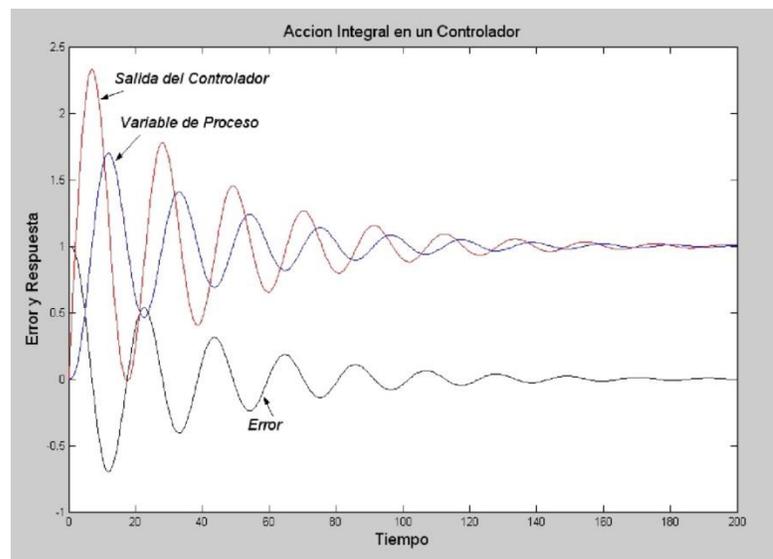
%CONTROL INTEGRAL
function f = integ(t,y)
Kc = input('Ganancia del Controlador = ');
Kv = input('Ganancia de la Valvula = ');
Ks = input('Ganancia del Sensor = ');
K = input('Ganancia del sistema = ');
dX = input('Cambio paso en la variable de entrada = ');
to = input('Tiempo de Simulacion = ');
n = input('Numero de polos en la funcion de transferencia del sistema = ');
m = input('Numero de zeros en la funcion de transferencia del sistema = ');
for i = 1:n
fprintf('Polo Numero %1.0f \n',i);
p(i) = input('Valor = ');
if i < m +1
```

```

fprintf('Zero Numero %1.0f \n',i);
z(i) = input('Valor = ');
elseif m == 0
z = [];
end
end
Gp = zpk(z,p,K);
Gc = tf([Kc],[1 0]);
G = [1 0 Ks; Gc -1 0; 0 Kv*Gp -1];
B = [1; 0; 0];
R = (inv(G))*B*dX;
[y,t] = step(R,to);
plot(t,y(:,1),'k',t,y(:,2),'r',t,y(:,3),'b')
title('Accion Integral en un Controlador', 'FontSize',14);
xlabel('Tiempo', 'FontSize',14);
ylabel('Error y Respuesta', 'FontSize',14);

```

Figura 15. Acción Integral en un Controlador



Fuente: Programa Matlab

La Figura 14 muestra que, en un controlador de acción integral, con parámetros apropiados, el error que se alimenta alcanza un valor de cero y la respuesta correspondiente del controlador se mantiene constante. Observe que el valor de la señal de salida del controlador en un instante cualquiera es el área debajo de la curva de error, es decir, la integral o sumatoria de

errores hasta el instante en consideración. La variable de proceso se estabiliza en un valor sin diferencia con respecto al valor de la variable deseada del proceso, es decir, sin error en estado estacionario. La acción de control integral ha eliminado el error observado en la respuesta del controlador proporcional, pero puede conducir a una respuesta oscilatoria de amplitud decreciente lenta o, incluso, de amplitud creciente y ambos casos, por lo general, se consideran inconvenientes.

#### 4.2.6. Acción de control Proporcional – Integral, PI

La acción de control proporcional – integral, PI, se define mediante la ecuación

(4.4)

$$m(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt$$

O la función de transferencia del controlador es

(4.5)

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left[ 1 + \frac{1}{\tau_I s} \right]$$

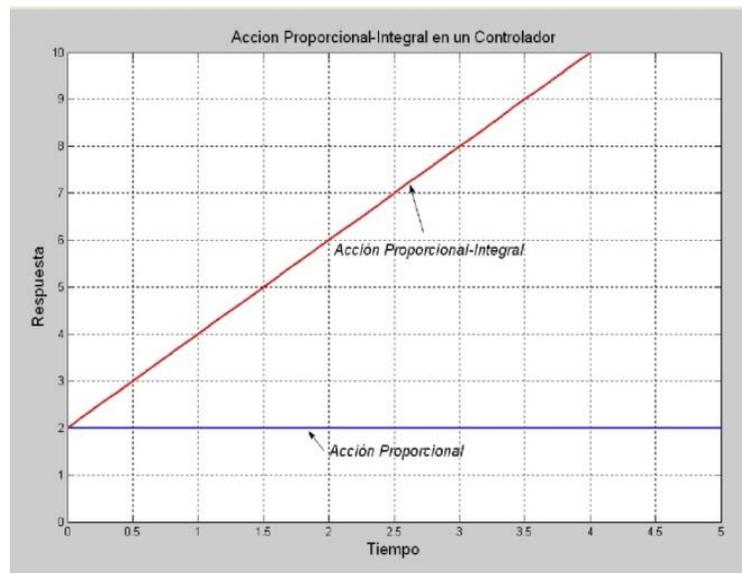
Siendo  $K_c$  la ganancia proporcional y  $TI$  el denominado tiempo integral. Tanto  $K_c$  como  $TI$  son ajustables.

#### 4.2.7. Significado del tiempo integral.

El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor

de  $K_c$  afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto. La Figura 12 muestra los perfiles de las acciones proporcional y proporcional-integral de un controlador para un cambio paso unitario en el error de entrada.

Figura 16. Acciones Proporcional y Proporcional – Integral



Fuente: Programa Matlab

Se deduce que la acción proporcional hace una amplificación constante del error alimentado de acuerdo con su ganancia (2). Para el controlador proporcional e integral, la respuesta inicial es igual a la ganancia proporcional y esta respuesta se repite sumada para períodos de tiempo igual al tiempo integral (1). La Figura 16 es construida con el programa de Matlab acción propintegral.m

## Programa propintegral.m

```

%UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE CUCUTA

%INGENIERIA ELECTROMECHANICA
%LAZO DE CONTROL Y MONITOREO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE DE CARGA EN LAS
%UNIDADES ALLEN PS1 DE LA EMPRESA SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC

%OSCAR MAURICIO DIAZ ROMERO

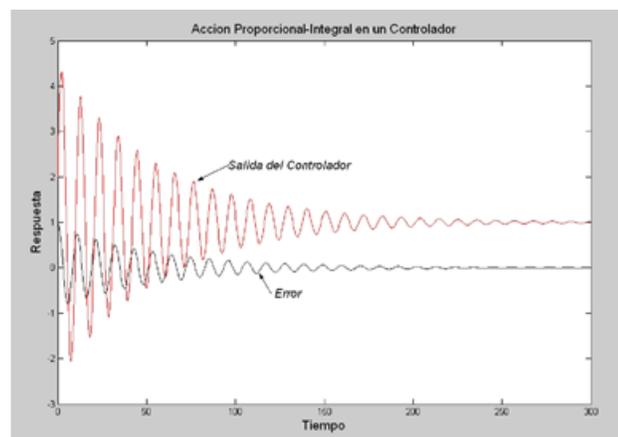
%CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL
function f = propinteg(t,y)
Kc = input('Ganancia del Controlador = ');
taui = input('Tiempo Integral = ');
Kv = input('Ganancia de la Valvula = ');
Ks = input('Ganancia del Sensor = ');
K = input('Ganancia del sistema = ');
dX = input('Cambio paso en la variable de entrada = ');
to = input('Tiempo de Simulacion = ');
n = input('Numero de polos en la funcion de transferencia del sistema = ');
m = input('Numero de zeros en la funcion de transferencia del sistema = ');
for i = 1:n
fprintf('Polo Numero %1.0f \n',i);
p(i) = input('Valor = ');
if i < m +1
fprintf('Zero Numero %1.0f \n',i);
z(i) = input('Valor = ');
elseif m == 0
z = [];
end
end
Gp = zpk(z,p,K);
B = [1; 0; 0];
for i = 1:2
if i == 1
tau(i) = 0;
Gc(i) = tf([Kc],[0 1]);
else
tau(i) = taui;
Gc(i) = tf([Kc Kc*tau(i)],[tau(i) 0]);
end
G = [1 0 Ks; Gc(i) -1 0; 0 Kv*Gp -1];
R = (inv(G))*B*dX;
[y,t] = step(R,to);
if i == 1
plot(t,y(:,3),'k')
hold on
else
plot(t,y(:,3),'r')
end
end
title('Accion Proporcional-Integral en un Controlador', 'FontSize',14);
xlabel('Tiempo', 'FontSize',14);
ylabel('Error y Respuesta', 'FontSize',14)

```

#### 4.2.8. Error y Respuesta en una acción proporcional – integral.

La ilustración gráfica de la acción proporcional e integral dentro de un lazo de control se muestra en las Figuras 16 y 17 construidas con el programa de Matlab acción proporcional-integral.m.

Figura 17. Error y Respuesta de un controlador proporcional e integral



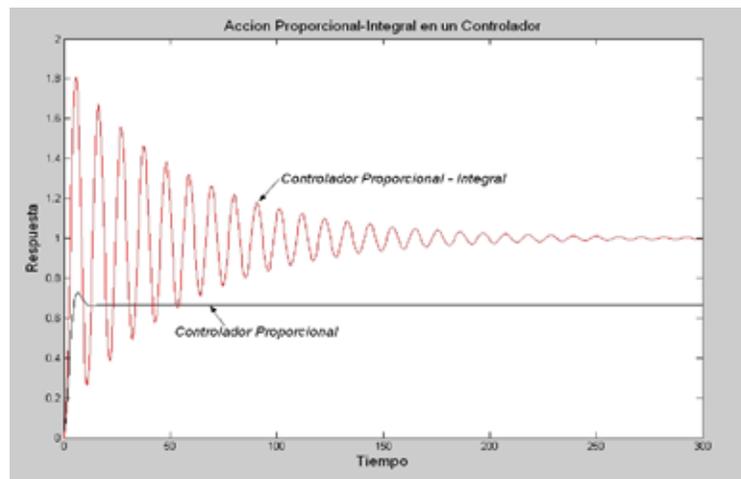
Fuente: Programa Matlab

Se utilizó el mismo sistema empleado para los casos anteriores y se asigna un valor de 2 para la ganancia del controlador y un tiempo integral de 1. Con acciones de control proporcional e integral no hay error en estado estable (offset) y la respuesta del controlador es estable y diferente de cero.

En la Figura 17 se muestran las respuestas del lazo de control con acción solo proporcional y con acciones proporcional e integral. Nuevamente, se observa que la acción de

control integral ha eliminado el error en estado estable que resulta en la respuesta del controlador proporcional, pero condujo a una respuesta oscilatoria de amplitud decreciente lenta, lo que puede resultar inconveniente.

Figura 18. Respuesta de un controlador proporcional e integral



Fuente: Programa Matlab

#### 4.2.9. Acción de control proporcional – derivativa, PD

La acción de control proporcional – derivativa, PD, se define mediante la ecuación,

(4.6)

$$m(t) = K_c e(t) + K_c \tau_c \tau_d \frac{de(t)}{dt}$$

(4.7)

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c (1 + \tau_d s)$$

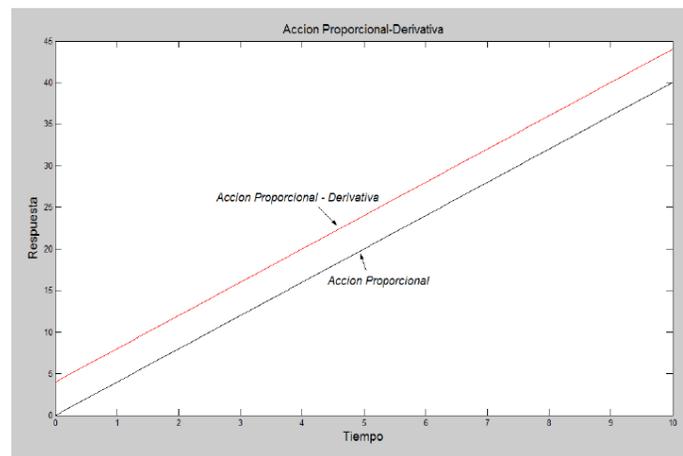
Siendo  $K_c$  la ganancia proporcional y  $\tau_d$  una constante denominada tiempo derivativo. Ambos parámetros son ajustables.

#### **4.2.10. Significado del tiempo derivativo**

La acción de control derivativa, en ocasiones denominada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. El tiempo derivativo es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional.

Si la señal de error es una función rampa unitaria, la salida del controlador se convierte en la que se muestra en la Figura 18. La acción de control derivativa tiene un carácter de previsión. Sin embargo, es obvio que una acción de control derivativa nunca prevé una acción que nunca ha ocurrido.

Figura 19. Acción Proporcional y Proporcional – Derivativa



Fuente: Programa Matlab

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, aporta un medio de obtener un control con alta sensibilidad. Una ventaja de usar una acción de control derivativa es que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Por tanto, el control derivativo prevé el error, inicia una acción oportuna y tiende a aumentar la estabilidad del sistema.

Aunque el control derivativo no afecta en forma directa el error en estado estable, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite el uso de un valor más grande en la ganancia, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

Debido a que el control derivativo opera sobre la velocidad de cambio del error, y no sobre el error mismo, este modo nunca se usa solo. Siempre se emplea junto con una acción de

control proporcional o proporcional – integral.

La Figura 19 muestra las respuestas de los controladores proporcional, proporcional-integral y proporcional derivativo para el proceso utilizado en los casos anteriores con válvula y sensor con ganancias de uno. Se asigna la misma ganancia de 2 para cada una de las acciones y tiempo integral de 2 y tiempo derivativo de 10.

Programa proder.m proporcional –derivativo.

```
%UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE CUCUTA

%INGENIERIA ELECTROMECHANICA
%LAZO DE CONTROL Y MONITOREO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE DE CARGA EN LAS
%UNIDADES ALLEN PS1 DE LA EMPRESA SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC

%OSCAR MAURICIO DIAZ ROMERO

%PROPORCIONAL DERIVATIVO

% Archivo propder.m

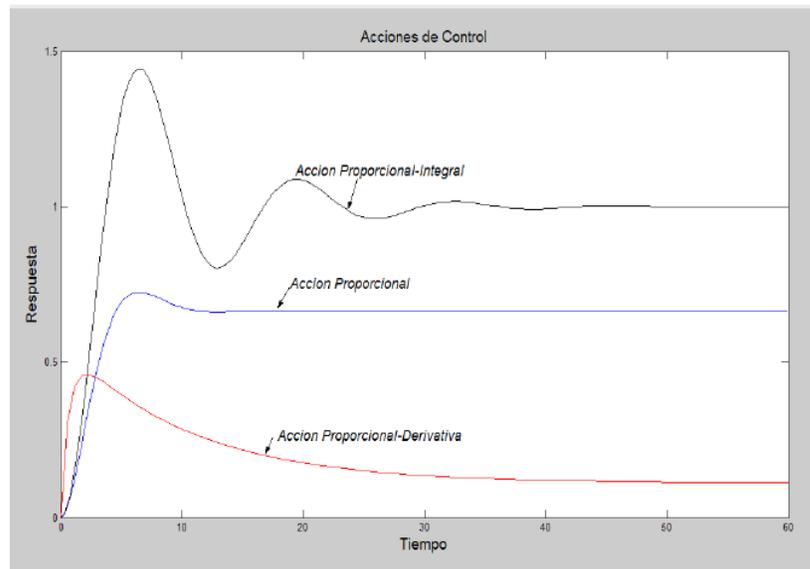
function f = propder(t,y)
Kc = input('Ganancia del Controlador = ');
taui = input('Tiempo Integral = ');
taud = input('Tiempo Derivativa = ');
Kv = input('Ganancia de la Valvula = ');
Ks = input('Ganancia del Sensor = ');
K = input('Ganancia del Proceso = ');
n = input('Numero de Polos = ');
for i = 1:n
fprintf('Polo Numero %1.0f\n',i)
p(i) = input('Valor del Polo = ');
end
to = input('Tiempo de Simulacion = ');
z = [];
G = zpk(z,p,K);
G1 = series(G,Kv);
Gp = tf([Kc],[0 1]);
Gi = tf([Kc*taui Kc],[taui 0]);
Gd = tf([K*taud K],[0 1]);
FP = series(G1,Gp);
CP = feedback(FP,Ks);
[y,t] = step(CP,to);
plot(t,y,'b')
```

```

hold on
FI = series(G1,Gi);
CI = feedback(FI,Ks);
[y,t] = step(CI,to);
plot(t,y,'k')
FD = series(G1,Gd);
CD = feedback(FD,Ks);
[y,t] = step(CD,to);
plot(t,y,'r')
title('Acciones de Control','FontSize',14), xlabel('Tiempo','FontSize',14),
ylabel('Respuesta','FontSize',14)

```

Figura 20. Acciones de Control P, PI y PD



Fuente: Programa Matlab

Las respuestas observadas en la Figura 19 se obtienen con el programa Matlab proporcional derivativo.m. Se sugiere al momento del diseño insertar los valores pedidos de acuerdo a la estrategia de control sugerida por la sala de control de tal manera que permita la asignación de una ganancia adecuada para la acción proporcional-derivativa y notar que la acción derivativa controla la variable de temperatura alcanzando un valor con un error en estado

estacionario y la ganancia puede tomar valores mayores que permitan estabilizar el sistema o lazo de control.

#### 4.2.11. Acción de control proporcional – integral – derivativa, PID

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional – integral – derivativo o PID. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

(4.8)

$$m(t) = K_c e(t) + \int_0^t e(t)dt + k_c \tau_d \frac{de(t)}{dt}$$

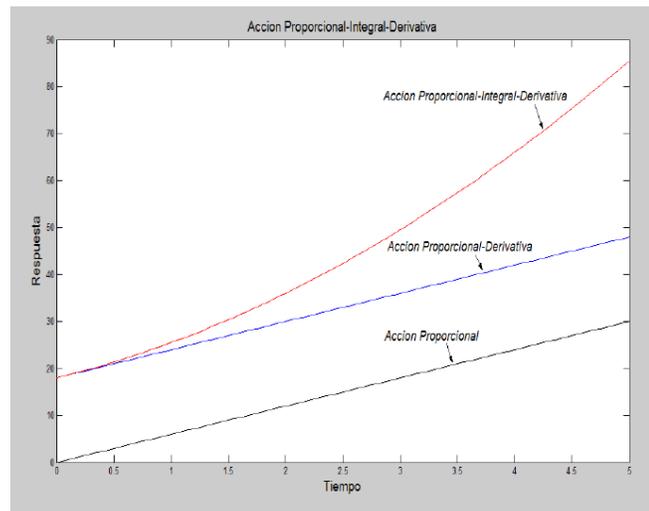
(4.9)

$$\text{ó} \quad \frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left[ 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_d s \right]$$

La Figura 20 muestra la respuesta rampa unitaria que compara las acciones proporcionales, proporcional-derivativa y proporcional-integral-derivativa, un ejemplo con los siguientes parámetros: ganancia es de 2 el tiempo integral de 2 y el tiempo derivativo es de 3 y la pendiente de la rampa es 2.

Si la señal de error es una función rampa unitaria, la salida del controlador PID es una combinación de amplificación, reajuste y anticipación, propios de las acciones proporcional, integral y derivativa.

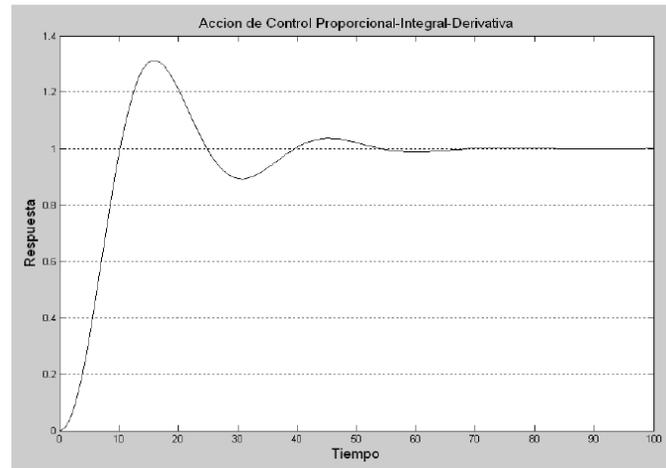
Figura 21. Acción Proporcional-Integral-Derivativa



Fuente: Programa Matlab

En la Figura 21 se muestra la respuesta del control proporcional-integral-derivativo a una variación paso unitario en su variable de entrada para el proceso estudiado en los casos anteriores. Se asignó un valor de 200 para la ganancia un tiempo integral de 0.5 y un tiempo derivativo de 0.5. No hay error estable y la respuesta presenta una anticipación con respecto a una acción proporcional – integral, mostrada en la gráfica de una más amortiguada.

Figura 22. Acción de control proporcional – integral



Fuente: Programa Matlab

Después del estudio del modelo matemático de los controladores PID se toma el controlador Proporcional – Derivativo – Integral para desarrollar el control en el sistema arduino.

En el desarrollo del programa pid.ino se puede realizar lectura de datos con la interface de Matlab, en el momento de implementar el control se puede reemplazar la graficación y muestreo de los datos por otro software compatible con el software utilizado en la sala de control; se deja abierto para que su aplicación e implementación se pueda realizar en diferentes plataformas.

#### 4.2.12. Diseño del control PID con el sistema Arduino

Después del estudio del modelo matemático de los controladores PID se toma el controlador Proporcional – Derivativo – Integral para desarrollar el control en el sistema arduino.

En el desarrollo del programa pid.ino se puede realizar lectura de datos con la interface de Matlab, en el momento de implementar el control se puede reemplazar la graficación y muestreo de los datos por otro software compatible con el software utilizado en la sala de control; se deja abierto para que su aplicación e implementación se pueda realizar en diferentes plataformas.

#### 4.2.12.1. Modelo matemático del control PID en Arduino

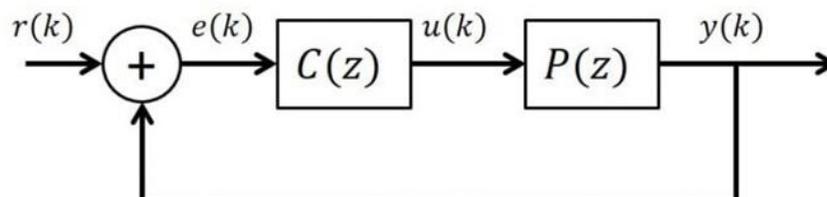
Al iniciar el diseño del sistema del control con el Arduino tenemos en cuenta que el controlador PID actúa sobre el error. Donde el error solamente es la diferencia entre el setpoint o punto de seteo y la salida que es el punto donde el sensor realiza la medición y entrega un valor medido.

El error se representa por la siguiente ecuación.

$$(4.10) \quad e(k) = r(k) - y(k)$$

Su representación se realiza en el siguiente diagrama de bloques:

Figura 23. Sistema a bloques del control PID



Fuente: Autor del proyecto

En este sistema a bloques representamos las señales en función de la variable Z lo que indica que el sistema es digital, teniendo a  $C(z)$  y  $P(z)$  como las funciones del controlador y el proceso en función de la variable compleja  $z$  y que se trata de un control digital que actúa por instantes de muestreo, donde  $k$  representa el tiempo para el sistema de muestreo.

$r(k)$  es la señal de referencia o set point,  $e(k)$  es la señal de error que resulta de la resta entre  $r(k)$  y  $y(k)$  o la entrada menos la salida,  $C(z)$  es el controlador PID de temperatura discreto,  $u(k)$  es la señal de control  $P(z)$  y la planta o proceso en representación discreta que se desea controlar,  $y(k)$  es la variable de salida la cual es leída por el sensor del proceso.

Para el caso del control PID continuo se representa por la siguiente ecuación:

$$(4.11) \quad u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{t_i} \int_0^t e(t) dt + k_p t_d \frac{de(t)}{dt}$$

La ecuación indica que el control PID está conformado por tres parámetros:

- $K_p$  = ganancia proporcional.
- $t_i$  = tiempo integral.
- $t_d$  = tiempo derivativo.

#### **4.2.12.2. Controlador PID Discreto en Arduino**

El control PID discreto es la resultante de discretizar la ecuación continua (4.11) aproximando el término integral mediante la sumatoria trapezoidal y el término derivativo

mediante la diferencia de dos puntos de la siguiente forma:

(4.13)

$$\int e(t)dt = \sum \left[ \frac{e(k) + e(k-1)}{2} \right] T_s$$

(4.14)

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{e(k) - c(k-1)}{T_s}$$

En este caso  $T_s$  se conoce como el tiempo de muestreo, que es el tiempo que determina cada cuantos intervalos se va a ejecutar la ley de control discreta.

Se debe tomar en cuenta que se está trabajando con muestras  $k$ , lo cual indica que el error será representado por la variable  $e(k)$  que significa lo siguiente:

- $e(k)$  es el error en el instante actual, o tiempo de muestreo actual (presente).
- $e(k-1)$  es el error en un instante anterior, o en el tiempo de muestreo anterior (pasado).

Dónde:

$$(4.15) \quad T_s < \frac{0}{4}$$

$$(4.16) \quad \frac{T}{20} \leq T_s \leq \frac{T}{10}$$

La constante de tiempo  $T$ , se halla tomando el tiempo de estabilización y se divide por 4.

Los parámetros de ajuste del controlador PID de temperatura que se va a implementar en el Arduino se establecen usando tres estrategias diferentes a partir de los parámetros continuos:

$$k_p, t_i, t_d.$$

Para este caso específico se tomó el retardo de tiempo del modelo continuo como:

$$0 = L + T_s/2$$

Donde  $T_s/2$  es una aproximación que corresponde al retardo introducido por el muestreador y el retenedor, recordando que es el período de muestreo.

El control discreto PID se obtiene discretizando la ecuación continua (4.11) mediante el siguiente proceso matemático donde se obtiene la función de transferencia tipo pulso del controlador PID digital.

$$C(z^{-1}) = \frac{u(k)}{e(k)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

Dónde:

$$q_0 = k_p \left[ 1 + \frac{T_s}{2t_i} + \frac{t_d}{T_s} \right]$$

$$q_1 = -k_p \left[ 1 - \frac{T_s}{2t_i} + \frac{2t_d}{T_s} \right]$$

$$q_2 = \frac{k_p t_d}{T_s}$$

Se obtiene la ley de control que se va a ingresar al microcontrolador la cual sale del control PID discreto en Arduino cuando se realiza el despeje de  $u(k)$ .

$$u(k)(1 - z^{-1}) = q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k)$$

$$u(k) - u(k)z^{-1} = q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k)$$

$$u(k) = u(k)z^{-1} + q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k)$$

Con la Aplicación de la transformada inversa Z se obtiene la ecuación en diferencias:

$$(4.17) \quad u(k) = u(k-1) + q_0e(k) + q_1e(k-1) + q_2e(k-2)$$

Dónde:

- $u(k)$  = ley de control actual.
- $u(k-1)$  = ley de control un instante de muestreo atrás.
- $e(k)$  es el error actual (Referencia – temperatura).
- $e(k-1)$  es el error un instante de muestreo atrás.
- $e(k-2)$  es el error dos instantes de muestreo atrás.

### 4.2.12.3. Identificación del Modelo de la Planta

Para realizar el diseño del controlador de Temperatura PID digital con arduino para el

control del sistema de enfriamiento de la unidad ALLEN PS1 es importante entender el funcionamiento del proceso que vamos a controlar, en este caso se caracteriza el modelo matemático del tubocargador el cual comprime el aire para refrigerar la culata del motor de la unidad ALLEN PS1; a continuación se hace una descripción del sistema mecánico de la culata que será tomado como la planta para efectos del diseño.

En el lazo de control para el diseño los tres elementos principales son:

- Dispositivo de medición: sensor de temperatura PT100.
- Actuador: Valvula Mariposa servopilotada.
- Dispositivo capaz de realizar un control computarizado: Arduino UNO.

### Modelo de la Planta:

Figura 24. Culata de un cilindro del motor Allen



Fuente: Autor del proyecto.

- 1-Cara inferior de la culata con las válvulas de admisión y escape

- 2- Cara inferior de la culata con las válvulas de admisión y escape sin válvulas
- 3-Culatas para motor Allen vista lateral

Figura 25. Culata de un cilindro del motor Allen (Uno de los 8 cilindros en línea)



Fuente: Autor del proyecto

El aire de carga Ingresar por el turbo hacia la Válvula termostática o mariposa donde el control PID verifica la temperatura si es igual o menor a 120 F, la válvula se abre y el aire ingresa por el orificio de entrada de la culata a la cámara de combustión, si la temperatura es mayor a 120 F la válvula se cierra y hace que el aire ingrese por lo radiadores.

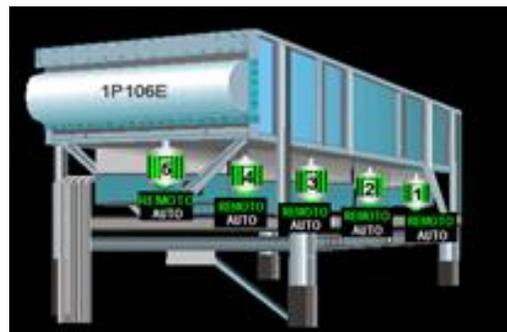
Figura 26. Parte superior de la culata, válvulas de admisión y escape



Fuente: Autor del proyecto.

## Enfriadores unidad PS1

Figura 27. Enfriadores unidad Allen PS1



Fuente: Autor del proyecto

Cada unidad Allen PS1 cuenta con un radiador por el cual se regula la temperatura del aire de carga, agua de camisas y aceite lubricante. Este radiador tiene 5 ventiladores de 15 Hp, 480V y 21 Amperios cada uno, Los ventiladores son los encargados de inyectar aire forzado a

los serpentines del radiador y están en operación continuamente las 24 horas dependiendo del control de temperatura. En este sistema de refrigeración se busca el ahorro de energía ya que si se cumplen con algunas de las condiciones descritas en la lógica de control en cuanto a temperatura se programa el apagado de 2 ventiladores de la unidad lo que genera un ahorro de energía. La secuencia se programa para apagar 1 y 3 y así realizar ahorro de energía.

### **Función de transferencia.**

Para hallar la función de transferencia se encuentran diferentes estrategias para obtener la función de transferencia de los sistemas, para este caso se tomaron dos métodos distintos:

- Modelo fenomenológico con leyes físico-químicas.
- Identificación de sistemas a través de la curva de reacción.

### **Modelo Fenomenológico:**

Este modelo se sustenta en la aplicación de las leyes termodinámicas para obtener un modelo matemático no lineal del sistema y así realizar una linealización del sistema usando las series de Taylor.

En un modelo térmico se consideran dos mecanismos principales a saber:

- Convección

- Radiación

Obteniendo la siguiente ecuación.

$$(4.18) \quad mc_p \frac{dT}{dt} = \alpha Q_i + U A(T_\infty - T) + c\sigma A(T_\infty^4 - T^4)$$

- $C_{pi}$  = calor específico.
- Masa =  $m$
- $T - T_{ref}$  = Cambio o variación de temperatura.
- $U$  = Coeficiente de transferencia de calor.
- $A$  = Área.
- $T$  = Temperatura del sistema
- $T_\infty$  = Es la temperatura del ambiente.
- $\epsilon$  = Es la emisividad.
- $\sigma$  = Es la constante de Stefan-Boltzmann.

Para establecer los parámetros del modelo se tuvo en cuenta el coeficiente de transferencia de calor y el factor del elemento generador de calor en este caso se relacionan los siguientes parámetros.

**T. Entrada:** Es el aire de carga que ingresa por el turbo hacia la Válvula termostática o mariposa donde el control PID verifica si es igual o menor a 120 F.

$$(4.19) \quad Q_{in} = \alpha Q_i$$

Dónde:

$Q_i$  es el porcentaje de salida de aire caliente de la válvula. El parámetro  $\alpha$  es el factor que relaciona la salida del turbo (0-100%) con la potencia disipada por el aire caliente en vatios.

**T. Salida:** la válvula se abre y el aire ingresa por el orificio de entrada de la culata a la cámara de combustión produciendo el calentamiento de la misma que se produce por dos mecanismos principales: convección y radiación.

$$(4.20) \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{out}$$

T salida está dada por:

$$(4.21) \quad Q_{out} = kT(T - T_{\infty}) + \epsilon\sigma A(T^4 - T_{\infty}^4)$$

- $kT(T - T_{\infty})$  Ley de enfriamiento de Newton.
- $\epsilon\sigma A(T^4 - T_{\infty}^4)$  Ley de Stefan-Boltzmann.
- $kT$  Constante de pérdida para el ambiente.
- T temperatura del turbocargador.
- $T_{\infty}$  temperatura del ambiente.
- $\epsilon$  emisividad
- $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann.
- A El área.

$$K_T = UA$$

U es el coeficiente de transferencia de calor, A es el área.

Remplazando valores en la ecuación (4.21) se tiene:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = Qi_{\infty} + UA(T_{\infty} - T) + \epsilon\sigma A(T_{\infty}^4 - T^4)$$

Se deriva la función del tiempo obteniendo:

$$\frac{dQ}{dt} = Qi_{\infty} + UA(T_{\infty} - T) + \epsilon\sigma A(T_{\infty}^4 - T^4)$$

Si  $Q = mcp(T - T_{ref})$

- Cp= calor específico.
- M= la masa.
- (T-Tref) = Cambio o variación en la temperatura.

Se puede hallar el calor liberado o absorbido.

Reemplazando se tiene:

$$mCp \frac{dT}{dt} - mCp \frac{dT_{ref}}{dt} = \infty Qi + UA(T_{\infty} - T) + \epsilon\sigma A(T_{\infty}^4 - T^4)$$

Si la temperatura de referencia es constante al derivar se tiene que el valor será cero.

Luego se obtiene

$$mCp \frac{dT}{dt} = \infty Qi + UA(T_{\infty} - T) + \epsilon\sigma A(T_{\infty}^4 - T^4)$$

Se procede a denominar el modelo como una función para linealizarlo y se debe encontrar la función que debe ser cero pues no se presentan variaciones, se puede decir que el sistema esta estacionado y de esta forma se llega a una ecuación algebraica de orden 4 y se deben hallar las cuatro raíces. 4 raíces, teniendo en cuenta el punto de equilibrio de la derivada.

$$0 = \alpha Q_i s + UA(T_{\infty s} - Ts) + \epsilon \sigma A(T_{\infty s}^4 - Ts^4)$$

Ecuación algebraica de orden 4  $(\epsilon \sigma A)Ts^4 + (UA)Ts - (\alpha Q_i s + UAT_{\infty s} + \epsilon \sigma AT_{\infty s}^4) = 0$

Usando la siguiente función de Matlab se encuentra la raíz positiva del polinomio, entregando el resultado en grados kelvin o Celsius; de debe tener en cuenta que el valor  $T_a$  se debe ingresar en grados kelvin.

```
function [TK,TC] = T_ss(eps, sigma, A, U, Qi, Ta, alpha)
%Equilibrio
p=[eps*sigma*A 0 0 U*A -alpha*Qi-U*A*Ta-eps*sigma*A*Ta^4];
rp=roots(p);
Ts=[];
for i=1:4
    if isreal(rp(i)) && rp(i)>0
        Ts=[Ts;rp(i)];
    end
end
TK=Ts;
TC=TK-273.15;
```

Para terminar el proceso se debe aplicar la serie de Taylor realizando derivadas parciales con referencia a la temperatura y evaluando los puntos de equilibrio.

Finalmente se aplica transformada de Laplace para obtener la función de transferencia.

Obteniendo la siguiente función:

$$(4.22) \quad \frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{\left(\frac{\alpha}{mC_p}\right)}{s + \left(\frac{UA}{mC_p} + \frac{4\epsilon\sigma A}{mC_p} T^3 s\right)}$$

Se deben tener los valores del sistema tomado como planta y reemplazar en la ecuación o modelo lineal hallado.

Tabla 5. Parámetros del modelo

Quantity	Value
Temperatura inicial (T <sub>0</sub> )	296.15 K (23°C)
Temperatura Ambiente (T <sub>∞</sub> )	296.15 K (23°C)
Salida del turbo (Q)	0 to 60 W (0%-100%)
Factor del turbo (α)	0.014 W/(% heater)
Capacidad Calorifica (C <sub>p</sub> )	500 J/kg-K
Area de la superficie (A)	4.2 m <sup>2</sup>
Masa (m)	2000 kg
Coefficiente de transferencia de calor(U)	5 W/m <sup>2</sup> -K
Emisividad (ε)	0.9
Stefan Boltzmann Constant (σ)	5.67×10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> -K <sup>4</sup>

Se halla la función de transferencia.

Los datos de la tabla se toman valores bastantes aproximados

$$G(s) = \frac{1.127e^{-10s}}{160s + 1}$$

Para el cálculo de los parámetros del control PID de Temperatura con Arduino y Matlab se usó la función de transferencia del modelo fenomenológico.

Se realizó el programa en Matlab para realizar la prueba de linealidad.

```

%UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE CUCUTA

%INGENIERIA ELECTROMECHANICA
%LAZO DE CONTROL Y MONITOREO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE DE CARGA EN LAS
%UNIDADES ALLEN PS1 DE LA EMPRESA SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC

%OSCAR MAURICIO DIAZ ROMERO

clc
clear
close all

T0 = 24 + 273.15;      % K
Ta = 24 + 273.15;     % K
Qi=0;                 % Porcentaje
alpha = 0.014;        % W / % heater
Cp = 500;              % J/Kg K= 12 / 100^2 Area in m^2
A = 4.2;               % Area (m^2)
m = 2000;              % Kg
U = 5.0;               % W/m^2 K
eps = 0.9;             % Emissivity
sigma = 5.67e-8;      % Stefan-Boltzman

Qi=0:5:100;

for k=1:length(Qi)
    %Equilibrio
    [Ts] = T_ss(eps, sigma, A, U, Qi(k), Ta, alpha);
    T(k)=Ts;
end

plot(Qi, T-273.15, 'linewidth', 2)
xlabel('Qi (%)');
ylabel('T (C)')

Qi=0;                  % Porcentaje
[Ts, TC] = T_ss(eps, sigma, A, U, Qi, Ta, alpha);
num= alpha/(m*Cp);
den=[1 (U*A+4*eps*sigma*A*Ts^3)/(m*Cp)];

```

```

G=tf(num,den)
G=tf(num/den(2),den/den(2))

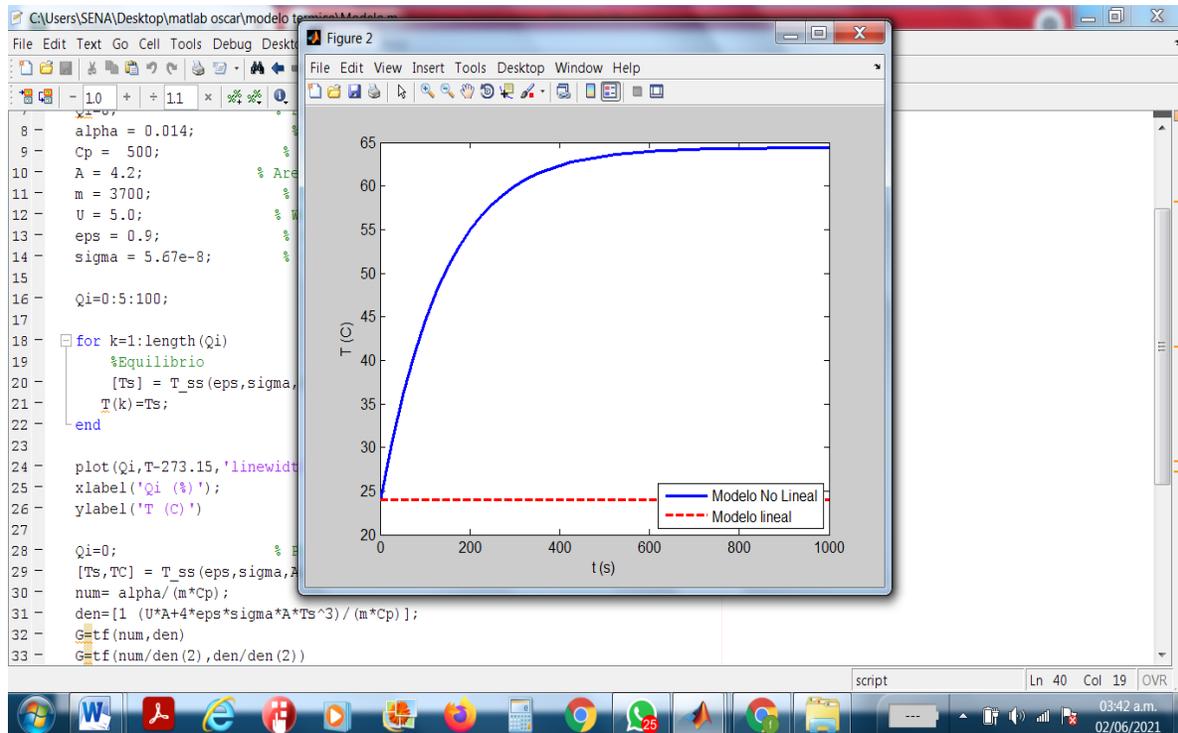
du=Qi+40;
%% Comparación con modelo No Lineal
[tsim, Tnl] = ode45(@(tsim,x)energy_bal(tsim,x,du,...
    alpha,Ta,U), [0 1000], Ts);
u(1:length(tsim))=du;
Tl=lsim(G,u,tsim);

figure
plot(tsim, Tnl-273.15,tsim,Tl+T0-273.15,'--r','linewidth',2)
xlabel('t (s)');
ylabel('T (C)')
legend('Modelo No Lineal', 'Modelo lineal','Location','southeast')

```

Se obtiene la gráfica del modelo no lineal.

Figura 28. Modelo no lineal



Fuente; Matlab.

#### 4.2.12.4. Control PID Arduino de Temperatura usando Ziegler y Nichols

Se usó la siguiente tabla para la sintonía del controlador PID de temperatura con arduino:

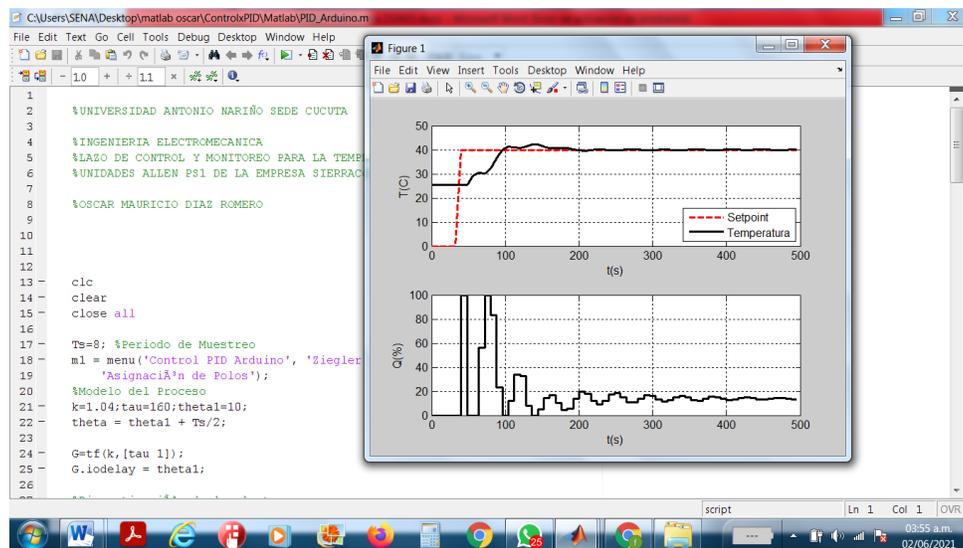
Tabla 6. Valores constantes de sintonía del controlador PID de temperatura con Arduino

<b><i>Controlador</i></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>\tau_i</math></b>	<b><math>\tau_d</math></b>
<b><i>P</i></b>	$\frac{\tau}{K\theta}$	—	—
<b><i>PI</i></b>	$\frac{0.9\tau}{K\theta}$	$3.33\theta$	—
<b><i>PID</i></b>	$\frac{1.2\tau}{K\theta}$	$2\theta$	$0.5\theta$

Se desarrolla el programa en Matlab aplicando el concepto de sintonía Ziegler y Nichols.

Se obtiene la gráfica donde se muestra la respuesta del sistema y se compara con la respuesta simulada del sistema.

Figura 29. Respuesta sintonía por Ziegler y Nichols



Fuente: Matlab

De la respuesta anterior, se puede ver como la sintonía por Ziegler y Nichols lleva la temperatura a la referencia de 40C y se puede comparar que la respuesta simulada es bastante próxima con la respuesta real del sistema, pues la temperatura máxima en planta es de 140 F o 60 C mostrando la importancia de la simulación de los procesos para el entendimiento y análisis de los sistemas de control.

#### 4.2.12.5. Control PI por Cancelación de Polos

El control PI por cancelación de polos cancela el polo de la planta con el parámetro integral del controlador.

- Se tomó una constante de tiempo aleatoria de 45 segundos para que estabilizar el proceso en más o menos 180 segundos, por la fórmula 4.16 se sabe que el tiempo de

estabilización es 4 veces la constante de tiempo.

$$T_s = 45$$

- se calcula la ganancia proporcional del control PI:

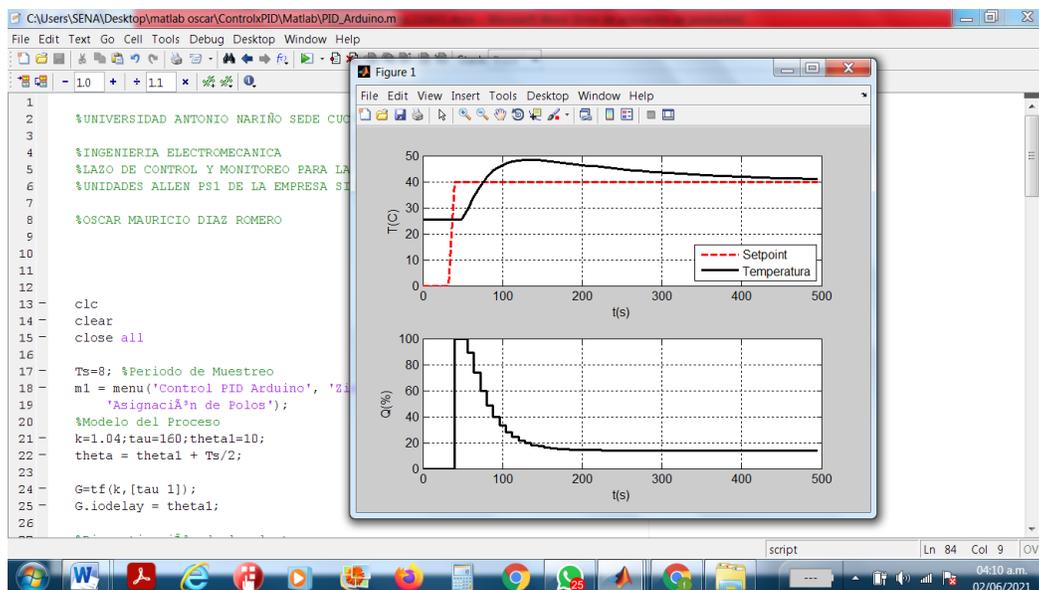
$$k_p = \frac{\tau}{K\tau_s} = \frac{160}{1.04 * 45} = 3.4188$$

- se calcula el tiempo integral del control PI:

$$t_I = \tau$$

A continuación se muestra la respuesta del sistema y se compara con la respuesta simulada del sistema.

Figura 30. Respuesta cancelación de polos



Fuente: Matlab.

#### 4.2.12.6. Control PI por Asignación de Polos

Para esta parte del diseño del controlador solo se utiliza la parte Proporcional e integral, llevando la acción derivativa en cero.

La idea básica de este diseño es asignarle polos al proceso para que actúe de la manera como se desea que trabaje el control:

- Se selecciona un tiempo de establecimiento deseado. Es decir el tiempo en que se quiere estabilizar la temperatura, se supone que se requiere que la temperatura se estabilice en más o menos 220 segundos:

$$T_{ss} = 220$$

- Se define un factor de amortiguamiento con el fin de aproximar el sistema a una dinámica subamortiguada de segundo orden.

$$\zeta = 0.6901$$

- Se calcula la frecuencia natural del sistema a fin de que se estabilice con el criterio del 2%

$$W_n = \frac{4}{\zeta T_{ss}} = \frac{4}{151.8235} = 0.0263$$

- Se calcula el polinomio deseado el cual contiene los dos polos complejos conjugados que están asignados al sistema, para eso se usa los coeficientes  $p1$  y  $p2$  y del polinomio de segundo orden:

$$s^2 + p1s + p2 = s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2$$

$$p1 = 2\zeta w_n = 0.0364$$

$$p2 = W_n^2 = 0.9413 * 10^{-4}$$

Donde los polos son:

$$s_{1,2} = -0 - 0182 \pm j0.0191$$

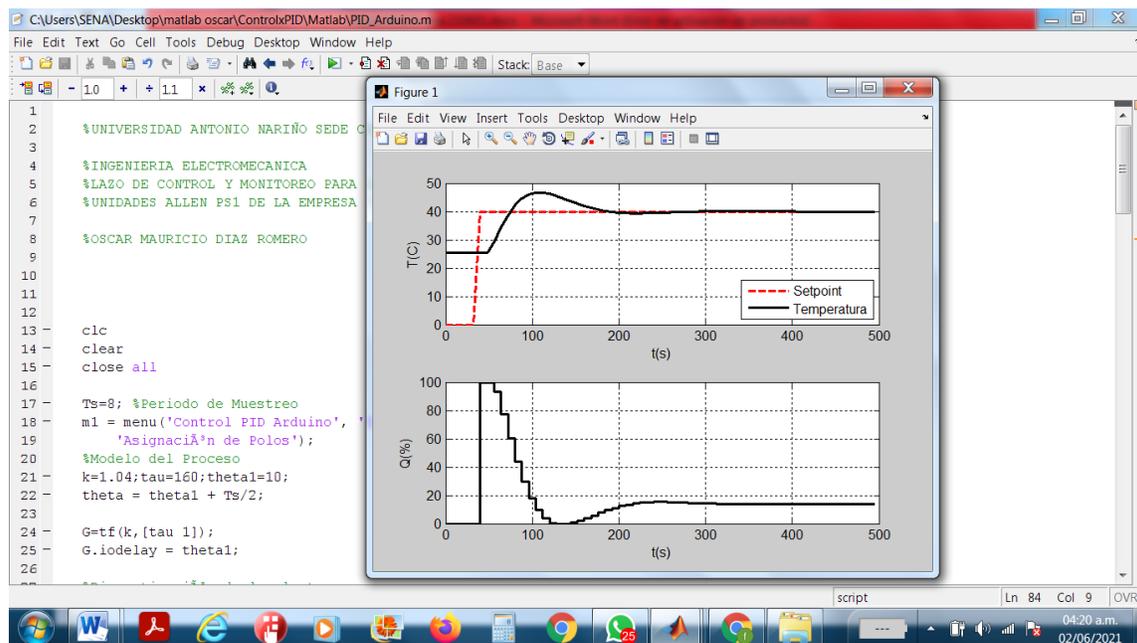
- Por ultimo se calcula el parametro  $k_c$  y  $t_i$  con las siguientes formulas:

- 

$$k_p = \frac{P_1\tau - 1}{K} = 4.6329$$

$$t_i = \frac{k_p K}{P_2\tau} = 43.3832$$

Figura 31. Respuesta asignación de polos



Fuente: Matlab

En la gráfica se observa como concuerdan las dinámicas simuladas con las dinámicas reales.

En este caso el control consiguió llevar nuevamente la variable a la referencia en el tiempo establecido.

Adicionalmente, se puede recalcular el controlador por asignación de polos para hacer que el sistema tenga un tiempo de establecimiento más lento, por ejemplo de  $T_{ss}$  segundos.

### Programa de Matlab ejecutado para los casos anteriores.

```
%UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE CUCUTA

%INGENIERIA ELECTROMECHANICA
%LAZO DE CONTROL Y MONITOREO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE DE CARGA EN LAS
%UNIDADES ALLEN PS1 DE LA EMPRESA SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC

%OSCAR MAURICIO DIAZ ROMERO

clc
clear
close all

Ts=8; %Periodo de Muestreo
m1 = menu('Control PID Arduino', 'Ziegler y Nichols', 'Cancelamiento de
Polos',...
'Asignación de Polos');
%Modelo del Proceso
k=1.04;tau=160;theta1=10;
theta = theta1 + Ts/2;

G=tf(k,[tau 1]);
G.iodelay = theta1;

%Discretización de la planta
Gd = c2d(G,Ts,'zoh');

switch(m1)
case 1
```

```

%Control PID por Ziegler y Nichols
kp=(1.2*tau)/(k*theta);
ti=2*theta;
td=0.5*theta;
incontrolabilidad = theta / tau
case 2
%Control PID por Cancelamiento de polos
tau_d=45;
kp=(tau)/(tau_d*k);
ti=tau;
td=0;
case 3
%Control PID por Asignación de Polos
% Especificaciones de Diseño
Mp=5; %Maximo Pico
ep=sqrt(((log(Mp/100))^2)/(pi^2+((log(Mp/100))^2))); %Fator de
amortiguamiento
% ep=1;
Tlc=220;
if ep<1
Wn=4/(ep*Tlc);
else if ep==1
Wn=5.8335/Tlc;
end
end

P1=2.0*ep*Wn;
P2=Wn^2;

kp=(P1*tau-1)/k;
ti=(k*kp)/(P2*tau);
td=0;
end

% Calculo do controle PID digital
q0=kp*(1+Ts/(2*ti)+td/Ts);
q1=-kp*(1-Ts/(2*ti)+(2*td)/Ts);
q2=(kp*td)/Ts;

% Loop de Control
nit=63;
u(1:nit)=0;
r(1:nit)=0;
r(6:nit)=40;
y(1:nit)=25.5;
e=r-y;
T0 = 25.5 + 273.15; % K
Ta = 25.5 + 273.15; % K
Qi=0; % Porcentaje
alpha = 0.014; % W / % heater
Cp = 500; % J/Kg K= 12 / 100^2 Area in m^2
A = 4.2; % Area (m^2)
m = 2000; % Kg
U = 5.0; % W/m^2 K
eps = 0.9; % Emissivity

```

```

sigma = 5.67e-8;           % Stefan-Boltzman
[x0,Tc] = T_ss(eps,sigma,A,U,0,Ta,alpha);
d = round(thetal/Ts);
for k=3:nit
    % Modelo Lineal
    t = 0:Ts:(k-1)*Ts;
    y=lsim(G,u(:,1:k),t,'zoh')+25.5;

%Modelo NO Lineal
% t=((k-1):1:k)*Ts;
% [tsim, Temp] = ode15s(@(tsim,x)energy_bal(tsim,x,u(k-1-d),...
%     alpha,Ta,U), t, x0);
% x0 = Temp(end,:);
% y(k)=x0-273.15;

%Error
e(k)=r(k)-y(k);

%PID
u(k) = u(k-1) + q0*e(k) + q1*e(k-1) + q2*e(k-2);

if (u(k) >= 100.0)
    u(k) = 100.0;
end
if (u(k) <= 0.0)
    u(k) = 0.0;
end

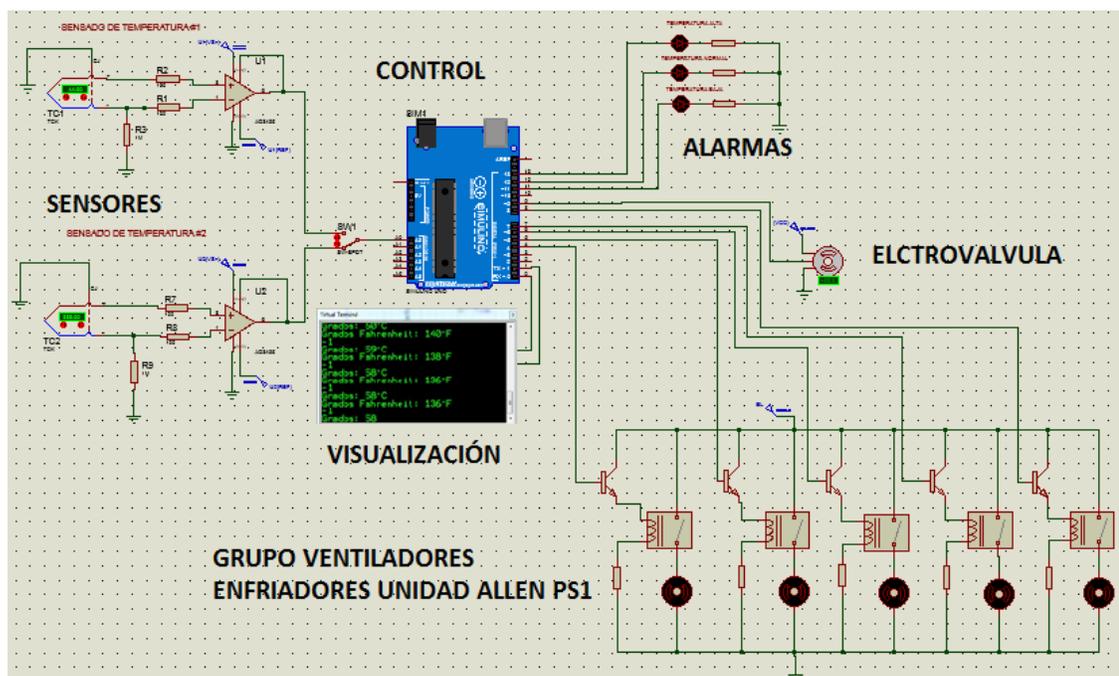
end

t=0:Ts:(nit-1)*Ts;
figure(1)
subplot(211)
plot(t,r,'--r',t,y,'-k','linewidth',2),grid
xlabel('t(s)');
ylabel('T(C)');
legend('Setpoint','Temperatura','location','southeast')
subplot(212)
stairs(t,u,'-k','linewidth',2),grid
xlabel('t(s)');
ylabel('Q(%)');

```

#### 4.2.12.7. Simulación del control PID con el sistema Arduino

Figura 32. Simulación en proteus del control proporcional – integral – derivativo



Fuente: Software proteus control en el Arduino- prueba

Se procedió a realizar el montaje en proteus después de realizar y comprobar el control PID con Matlab, Verificando su funcionamiento con el programa.ino como se puede observar en la figura 31.

## Programa control de temperatura PID con Arduino

```
/* CONTROL PID DE TEMPERATURA*/  
  
//INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
  
//LAZO DE CONTROL Y MONITOREO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE DE CARGA  
  
//EN LAS UNIDADES ALLEN PS1 DE LA EMPRESA SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC  
  
//AUTOR: ÓSCAR MAURICIO DÍAS ROMERO  
  
#include <Servo.h>  
  
Servo myservo;  
  
// DECLARACION DE LAS VARIABLES  
int s1 = A0;  
int Temp = 0;  
int TempF = 0;  
int pos = 0;  
char Grados = "";  
  
//ALARMAS GENERADAS  
int TEMP_ALTA = 13;  
int TEMP_NORMAL = 12;  
int TEMP_BAJA = 11;  
  
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  pinMode (TEMP_ALTA, OUTPUT);  
  pinMode (TEMP_NORMAL, OUTPUT);  
  pinMode (TEMP_BAJA, OUTPUT);  
  
  myservo.attach(9);  
  
}  
  
void loop() {  
  
  //LECTURA DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA  
  
  Temp= analogRead(s1);  
  Temp = (((Temp - 1.25)/0.005)/1024.0);
```

```
delay (60);
TempF= ((Temp * 1.8)+ 32);

//EJECUCION DE LAS ACCIONES DEPENDIENDO DE LA TEMPERATURA
if (Temp > 60) {
  digitalWrite(TEMP_ALTA, HIGH);
  digitalWrite(TEMP_NORMAL, LOW);
  digitalWrite(TEMP_BAJA, LOW);
  delay(10);
  for (pos = 0; pos <= 93; pos += 1){
    myservo.write(pos);
  }
}
else {
  digitalWrite(TEMP_ALTA, LOW);
  for (pos = 93; pos >= 0; pos -= 1) {
    myservo.write(pos);
  }
}

if (Temp<40){
  digitalWrite(TEMP_BAJA, HIGH);
  digitalWrite(TEMP_NORMAL, LOW);
  digitalWrite(TEMP_ALTA, LOW);
}

if (Temp >=31 && Temp <=59){
  digitalWrite(TEMP_BAJA,LOW);
  digitalWrite(TEMP_NORMAL, HIGH);
  digitalWrite(TEMP_ALTA, LOW);
}

delay (10);

Serial.print ("Grados: ");
Serial.print (Temp);
Serial.print (Grados);
Serial.println("C");
delay (300);
Serial.print ("Grados: ");
Serial.print (TempF);
Serial.print (Grados);
Serial.println("F");
delay (300);

//Serial.println(pos);
}
```

### **4.3. Etapa 3**

Esquematizar los planos del control e instrumentación para el lazo de control de monitoreo de la temperatura del aire de carga en las unidades Allen PS1.

Para alcanzar este objetivo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

Dibujar los planos de instrumentación del lazo de control y monitoreo de acuerdo con el diseño establecido.

Dibujar los planos de la parte eléctrica y de control electrónico del sistema de monitoreo y control de acuerdo con el diseño establecido.

#### **4.3.1. Planos de instrumentación**

El sistema eléctrico para el control manual y automático para el circuito de potencia de los ventiladores.

Figura 33. Sistema eléctrico para el control manual y automático del sistema de refrigeración

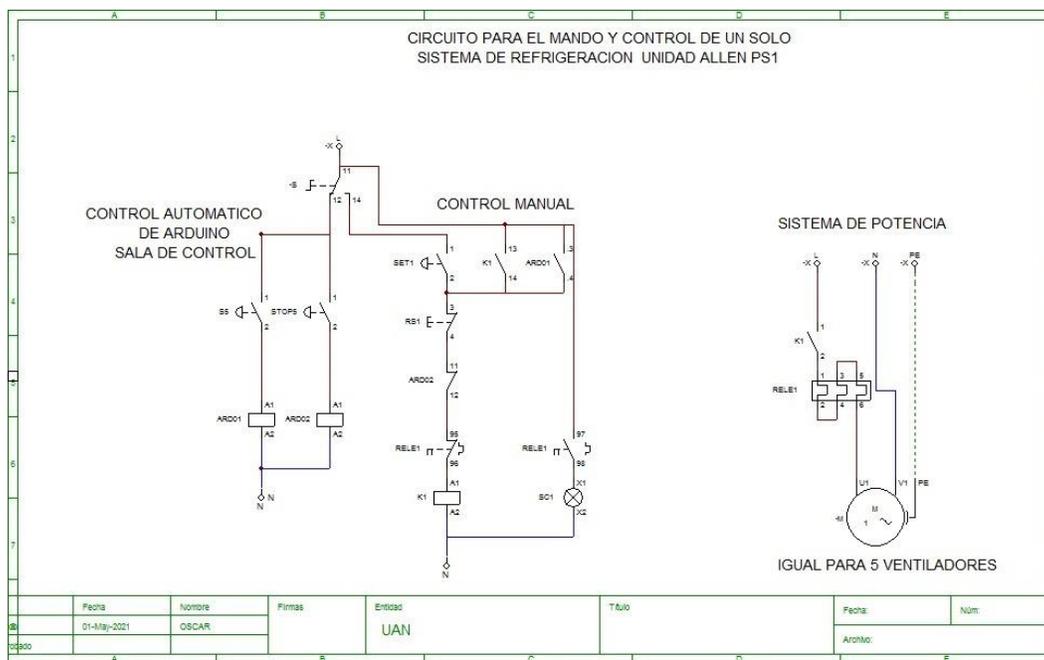
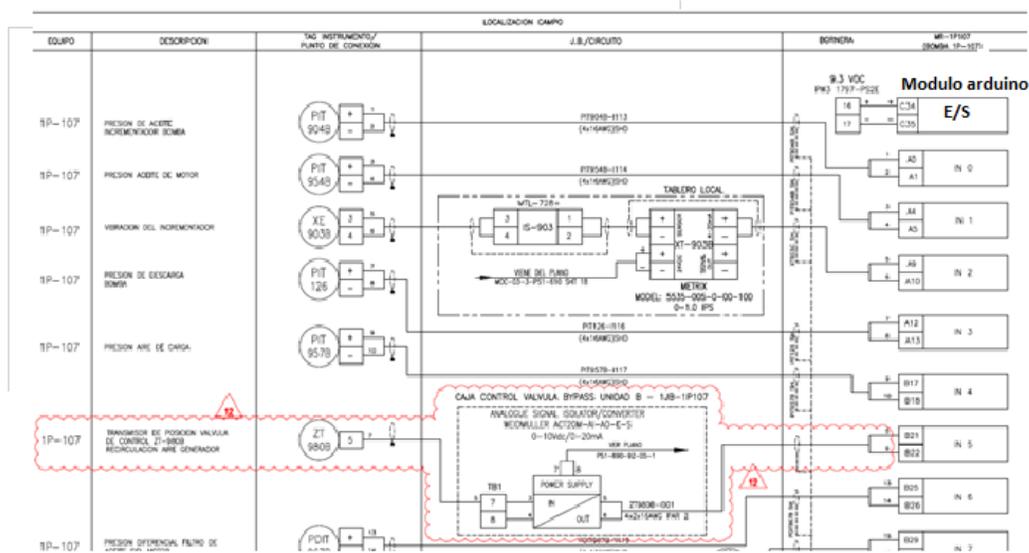
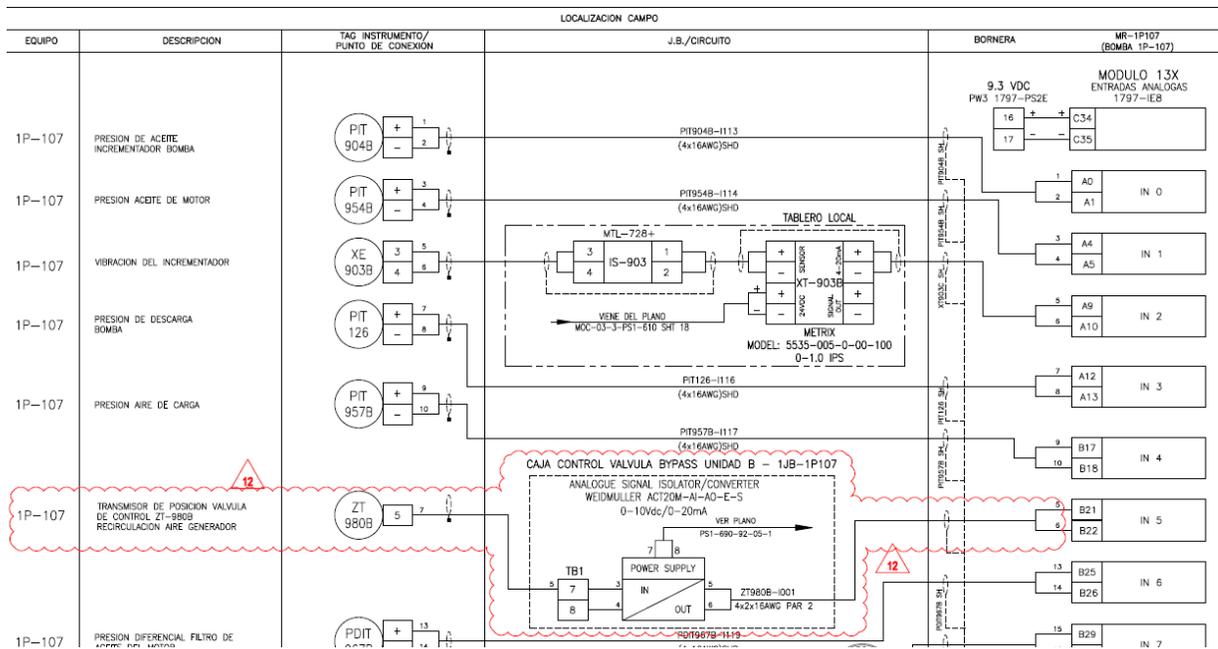


Figura 34. Planos de instrumentación de interfaz módulo arduino



Módulo Arduino con entradas analógicas insertado en el circuito de instrumentación de la temperatura, para remplazar el sistema dañado.

Figura 35. Planos de instrumentación electroválvula mariposa



### 4.4. Análisis Económico

(Véase la Tabla 7).

Tabla 7. Presupuesto global del proyecto

<b>PRESUPUESTO</b>	
<b>MATERIA PRIMA (MP)</b>	
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>
DISEÑO PLANOS ELÉCTRICOS	\$ 850.000
DISEÑO PLANOS ELECTRÓNICOS	\$ 550.000
<b><i>TOTAL</i></b>	<b><i>\$ 1.400.000</i></b>
<b>MANO DE OBRA (MO)</b>	
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>
GASTOS DE INGENIERIA	\$ 1.200.000
<b><i>TOTAL</i></b>	<b><i>\$ 1.200.000</i></b>
<b>COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACION (CIF)</b>	
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>
COMPUTADOR Y PROGRAMA DE DISEÑO	\$ 240.000
PAPELERÍA Y ÚTILES DE ESCRITORIO	\$ 50.000
<b><i>TOTAL</i></b>	<b><i>\$290.000</i></b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>
MATERIA PRIMA (MP)	\$ 1.400.000
MANO DE OBRA (MO)	\$ 1.200.000
COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACION (CIF)	\$ 290.000
<b><i>TOTAL</i></b>	<b><i>\$ 2.890.000</i></b>

#### 4.5. Análisis de Impacto Ambiental

Para realizar el análisis del impacto ambiental se debe tener en cuenta los incidentes que se producen continuamente con la salida de servicio de la unidad Allen PS1 en la estación de bombeo Caño Limón Arauca.

Otros incidentes como los que se producen de forma operacional cuando sale de servicio la estación de bombeo se tiene que arrancar de nuevo el motor diésel y esto genera la emisión de partículas de monóxido de carbono, teniendo en cuenta que el motor trabaja con combustible de crudo y esto afecta en un alto porcentaje el medio ambiente en la zona de caño limón Arauca.

Estación de Bombeo: El análisis del tramo del oleoducto comienza en la estación de bombeo PS1, la cual, según La Autoridad Nacional de licencias ambientales, tiene como función transportar el crudo hasta la estación Samoré y la estación Banadia desde el campo Caño limón. Para obtener un flujo máximo, la estación fue diseñada con una operación de cuatro unidades de bombeo dispuestas en paralelo. Dichas unidades constan de un motor, un incrementador y una bomba. Además, cuenta con equipos auxiliares como: 4 bombas booster eléctricas, 1 tanque de relevo de 5,000 Bls, Suministro de energía por ISA y sistema de generación propio, Sistema Contra incendios y Sistema de medición.

Con el diseño adecuado para el monitoreo y control de la variable de temperatura de la unidad de bombeo Allen PS1 se puede obtener un beneficio en favor del medioambiente en el campo de caño limón, ya que si presentan incidentes como la salida de servicio de la unidad de bombeo Allen PS1 o la mala operación del motor diésel por fallas en el control de temperatura se está expuesto altas emisiones de particulado a la atmosfera.

Cuando se están monitoreando y controlando las señales de temperatura se puede detectar y reducir los problemas térmicos que se puedan presentar en la operación de la unidad Allen

PS1, evitando las emisiones a la atmosfera y las fugas de aceite que seguramente afectan y contaminan el medio ambiente y las fuentes hídricas aledañas alrededor del campo.

## 4.6. Glosario

Accionadores: Dispositivos que actúan sobre el proceso a controlar.

Adquisición de datos Tarea que conlleva la captación de las distintas señales provenientes del sistema.

Alarmas generales Alarmas que afectan a la totalidad del sistema, y que poseen prioridad sobre las alarmas locales.

Byte: almacena un valor numérico de 8 bits sin puntos decimales. Tienen un rango de 0 a 255.

delay(ms): Pausa tu programa por la cantidad de tiempo especificada en milisegundos, donde 1000 es igual a 1 segundo.

Funciones: Una función es un bloque de código que tiene un nombre y un grupo de declaraciones que se ejecutan cuando se llama a la función. Podemos hacer uso de funciones integradas como void setup() y void loop() o escribir nuevas.

Monitor Serial: herramienta que permite enviar y visualizar los datos que se manejan a través del puerto Serie.

Variable: forma de llamar y almacenar un valor numérico para usarse después por el programa. Como su nombre indica, las variables son números que pueden cambiarse continuamente al contrario que las constantes, cuyo valor nunca cambia. Una variable necesita ser declarada y, opcionalmente, asignada al valor que necesita para ser almacenada.

## 5. Conclusiones

El proyecto brindo un apoyo para presentar una solución económica de diseño a la empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC para reemplazar un sistema obsoleto.

Una condición inevitable en la mayoría de los problemas de control prácticos es la existencia de limitaciones en los actuadores. Que pueden ser máximos o mínimos rangos de actuación, o máximos rangos de velocidad de actuación.

## 6. Recomendaciones

Las recomendaciones aquí expuestas son producto del desarrollo de este proyecto.

Continuar con el desarrollo de proyectos en el área de control para completar el laboratorio de la universidad.

Que el desarrollo de MATLAB y el trabajo con sistemas Arduino se vea reflejado en todo el entorno educativo desde el primer semestre hasta las materias más avanzadas; ya que hoy se pueden usar los dos Arduino para leer datos y Matlab para procesar la información.

## Referencias Bibliográficas

Manuales técnicos de la empresa SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC.

National Instruments. (2012). Oil well fracture pump monitoring and analysis using LabVIEW and NI RIO technology. Recuperado de <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11315>

NTC 2050 NORMA TECNICA COLOMBIANA 2050, Codigo electrico colombiano 1998-11-25.

Planos Instrumentación:

MR-1P106 – RMP-3X - MODULO 36X ENTRADAS ANALOGAS 1719-IF4HB  
DIAGRAMA DE INTERCONEXION (MOC-03-2-PS1-610-46-R3).

MR-1P106 – RMP-3X - MODULO 37X SALIDAS ANALOGAS 1719-CF4H  
DIAGRAMA DE INTERCONEXION (MOC-03-2-PS1-610-47-R3).

UNIDAD A – 1JB-1P106 VALVULA BYPASS CONEXIÓN CONTROL Y  
ALIMENTACION (PS1-690-91-05-1-R1).

Sincrón. (2011). Sistema de monitoreo y control de pozos petroleros en el Huila (Ecopetrol).  
Recuperado de <http://www.sincron.com.co/catalogo4.htm>

Zapata, A. y Gil, C. (2011). Monitoreo y supervisión remota mediante sistema SCADA.  
Mundo Eléctrico, 25(84), 17-19.

## **Anexos**

## A. Acuerdo de Confidencialidad

### ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD

#### FORMATO PARA DESARROLLO DE TESIS

Yo, Oscar Mauricio Díaz Romero, (en adelante el “Estudiante”) identificado(a) como aparece al pie de mi firma, me obligo a cumplir los siguientes lineamientos relacionados con la Información Confidencial (tal y como la misma se define más adelante) entregada por SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC o cualquiera de sus Compañías subsidiarias o afiliadas (en adelante, “SIERRACOL”);

#### CONSIDERACIONES

1. Que, mediante comunicación del 23 de febrero de 2021, el Estudiante solicitó autorización a SIERRACOL para adelantar su tesis de grado de INGENIERIA ELECTROMECHANICA sobre LAZO DE CONTROL Y MONITOREO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE DE CARGA EN LAS UNIDADES ALLEN EN PSI DE LA EMPRESA SIERRACOL ENERGY ARAUCA LLC (en adelante la “Tesis”).
2. Que, como consecuencia de lo anterior, SIERRACOL está dispuesta a autorizar al Estudiante para desarrollar su Tesis siempre y cuando el Estudiante se comprometa a dar a la Información Confidencial (tal y cómo esta se define más adelante) a la cual tenga acceso o le sea suministrada, el manejo que se establece en el presente Acuerdo.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, en virtud del presente acuerdo de confidencialidad (en adelante el “Acuerdo”), el Estudiante se obliga con SIERRACOL a:

**Primero - Definiciones:** Para los propósitos de este Acuerdo, salvo que se exprese lo contrario, los términos definidos en este numeral tienen los significados que se asignan a continuación, y los términos escritos con la primera letra en mayúscula, incluidos en cualquier parte de este Acuerdo mediante comillas y/o paréntesis tienen los significados atribuidos de este modo a ellos.

1. “Acuerdo” significa el presente acuerdo de confidencialidad.
2. “Información Confidencial” significa toda la información y todos los datos de cualquier índole o carácter, e independientemente de su formato o presentación, incluyendo las claves de acceso a dicha información suministradas por SIERRACOL al Estudiante. La Información Confidencial puede incluir, aunque no esta necesariamente limitada a ello, información técnica, secretos profesionales, registros, archivos, proyecciones, reportes, planos, pronósticos, información comercial, contractual, industrial, financiera, operativa, de negocios, impuestos, asuntos legales, programas de computador, ventas, fórmulas, datos, procesos, métodos, artículos de fabricación, maquinaria, aparatos, diseños, materiales de composiciones, productos, ideas, mejoras, inventos, descubrimientos, trabajo experimental o de desarrollo, trabajo en proceso, planos, o cualquier otro material que SIERRACOL entregue directamente o a la que el Estudiante tenga acceso en desarrollo de la Tesis.

Cualquier información, material, datos o reportes, independientemente de su forma, que sean desarrollados por el Estudiante en virtud del desarrollo de la Tesis, que hayan sido recibidos por el Estudiante por parte de SIERRACOL, o a los que tenga acceso el Estudiante por parte de SIERRACOL en ejecución del desarrollo de la Tesis, serán considerados como Información Confidencial y serán propiedad de SIERRACOL. El término Información Confidencial también se referirá, sin limitarse, todas las anotaciones, entrevistas, notas de reuniones, análisis, compilaciones, estudios, interpretaciones o cualquier otro material, con independencia de su forma o medio, preparados por el Estudiante y que contengan, reflejen o estén basados total o parcialmente en Información Confidencial.

3. “Parte o Partes” a la firma del presente Acuerdo, son SIERRACOL por un lado y el Estudiante por el otro.

4. "Persona" significa cualquier individuo, corporación, sociedad, empresa conjunta, asociación, sociedad por acciones, compañía de responsabilidad limitada, fiduciaria, organización estatal, organización no incorporada u organización gubernamental, subdivisión, agencia o autoridad similar, ya sea extranjera o nacional.
5. "Representantes" significa los directores, ejecutivos, funcionarios, empleados, agentes o representantes de SIERRACOL., incluyendo, pero no limitándose a sus respectivos abogados, contadores, consultores y asesores financieros.

**Segundo - Entrega de la Información Confidencial:** SIERRACOL. está dispuesta, de acuerdo con los términos y condiciones del presente Acuerdo, sujeto a su entera discreción, a permitir el acceso y/o suministrar al Estudiante, Información Confidencial de su propiedad o bajo su custodia o administración, relacionada con la operación de SIERRACOL. para el desarrollo de la Tesis, teniendo en cuenta que SIERRACOL. conoce que ésta información no es pública, que es de carácter confidencial y que desea mantenerla en esos términos.

El Estudiante reconoce que la Información Confidencial es y continuará siendo propiedad de SIERRACOL.. No se permitirá ningún uso de la Información Confidencial distinto del que se prevé en el presente Acuerdo y para los propósitos para los cuales expresamente se haya entregado la Información Confidencial en desarrollo de la Tesis. Tal uso no implica la cesión de derechos de autor, cesión de derechos reales o subjetivos, propiedad industrial o intelectual, ni el otorgamiento de licencia alguna, implícita o de cualquier naturaleza.

**Tercero - Confidencialidad:** El Estudiante declara y acepta lo siguiente:

1. La Información Confidencial entregada por SIERRACOL. no será utilizada por el Estudiante para propósitos diferentes a los relacionados con el desarrollo de la Tesis y que dicha información se mantendrá estrictamente confidencial y no será, sin el consentimiento previo por escrito de SIERRACOL., compartida, vendida, comercializada, publicada o de cualquier otra forma revelada a ninguna Persona en forma alguna por el Estudiante, de ninguna manera cualquiera que ella sea, del todo o en parte, incluso mediante fotocopias o reproducciones, sin el previo consentimiento por escrito de SIERRACOL.. El Estudiante entiende que la Información Confidencial no podrá ser utilizada para fines distintos a los previstos para el desarrollo de la Tesis.
2. No divulgará a ninguna persona natural o jurídica, ninguna información relacionada con la Información Confidencial entregada por SIERRACOL..
3. Mantener en estricta reserva y no divulgar ni utilizar, en provecho propio o de terceros y para fines distintos al desarrollo de la Tesis, la Información Confidencial que sea entregada por SIERRACOL., salvo se obtenga la autorización previa y escrita de SIERRACOL..
4. No se considerará Información Confidencial aquella información que: (i) sea de público conocimiento al momento de su revelación o que llegue a ser de conocimiento público, con posterioridad a su revelación, por vías diferentes a actos u omisiones de la Parte Receptora; (ii) sea conocida por la Parte Receptora antes o al momento de ser recibida u obtenida en desarrollo de la Tesis, sin que dicho conocimiento tenga su origen en la violación de una obligación de confidencialidad, (iii) sea desarrollada por la Parte Receptora en forma independiente o con base en información o documentación recibida de un tercero, sin que esto último constituya, a su vez, la violación de una obligación de confidencialidad; (iv) sea recibida u obtenida, de buena fe, por la Parte Receptora, de un tercero, sin que ello constituya, a su vez, la violación de una obligación de confidencialidad; (v) su divulgación y/o revelación fuere requerida por la Parte Receptora por aplicación de legislación vigente, acto administrativo en firme, orden de autoridad judicial y/o gubernamental competente con jurisdicción sobre las Parte o sus afiliadas, o por normas de cualquier bolsa de valores en la cual las acciones de las Partes o corporaciones relacionadas se encuentren registradas, en los términos y en la medida que ello fuere exigido.

5. El Estudiante reconoce que ni SIERRACOL ni sus Representantes certifican u otorgan garantías respecto de que la Información Confidencial sea exacta o completa. El Estudiante declara que ni SIERRACOL ni sus Representantes tendrán responsabilidad frente al Estudiante o a cualquiera de sus Representantes por el uso o interpretación que de a la Información Confidencial.
6. En particular el Estudiante se obliga a no revelar o utilizar la Información Confidencial y a no divulgar la misma a personas que no estén directamente relacionadas con el desarrollo de la Tesis. El Estudiante declara que entiende y conoce que la Información Confidencial incluye información sensible y comercialmente estratégica que no puede ser divulgada, conocida o de otra forma revelada a ningún tercero, ya sea directa o indirectamente.
7. La Información Confidencial únicamente podrá ser revisada en las instalaciones de SIERRACOL y no podrá efectuarse reproducción de la misma en ningún medio, físico, fotográfico, digital o cualesquiera otro, sin el consentimiento previo y escrito de SIERRACOL.

**Cuarto - Inexistencia de relación entre las Partes:** El Estudiante manifiesta que ningún acuerdo laboral, de prestación de servicios, de colaboración, sociedad, asociación o cualquier otra relación de mandato, surgido entre el Estudiante y SIERRACOL por este Acuerdo o de cualquier otra forma. El Estudiante no podrá hacer manifestaciones expresas o tácitas de ninguna clase a otras Personas, que pueda ser interpretada como la existencia de relaciones tales como acuerdo laboral, de prestación de servicios, de colaboración, sociedad, asociación o cualquier otra relación de mandato.

**Quinto - Irrenunciabilidad:** El Estudiante entiende y acuerda que ninguna falla o demora de SIERRACOL en ejercer cualquier derecho, poder o privilegio bajo este Acuerdo operará como una renuncia de dicho derecho, poder o privilegio, ni tampoco cualquier ejercicio individual o parcial de dicho derecho, poder o privilegio excluirá cualquier otro ejercicio o futuro ejercicio de dicho derecho, poder o privilegio dispuesto en el presente documento.

**Sexto - Plazo y Terminación:** La declaraciones y manifestaciones hechas por el Estudiante en este Acuerdo tendrán un plazo de cinco (5) años contados a partir de la fecha de su firma. Este Acuerdo terminará automáticamente cuando ocurra cualquiera de los siguientes eventos (i) vencimiento del plazo anteriormente estipulado o (ii) cuando el Estudiante suscriba un acuerdo posterior con SIERRACOL que contenga provisiones que cubran la confidencialidad de los datos de la Información Confidencial y derogue el presente Acuerdo.

**Séptimo – Devolución de la Información Confidencial:** el Estudiante deberá entregar inmediatamente a SIERRACOL, todos los originales de la Información Confidencial entregada por SIERRACOL o sus Representantes y destruir cualquier copia o reproducción (en papel) o medio electrónico) que de la misma exista, de tal manera que no conserve copias de la misma, devolver las claves de acceso que le hayan sido entregadas y suspender cualquier uso de las mismas, en los siguientes casos:

- a. En cualquier momento cuando SIERRACOL así lo requiera.
- b. En caso de incumplimiento del Estudiante de cualquiera de las obligaciones establecidas en éste Acuerdo.
- c. De cualquier manera, a la terminación del Acuerdo por cualquier causa, el Estudiante estará obligado a devolver la Información Confidencial a SIERRACOL sin que medie solicitud de SIERRACOL para el efecto.

**Octavo –Modificaciones:** Este Acuerdo sólo podrá ser modificado o prorrogado si el Estudiante y SIERRACOL así lo acuerdan mutuamente, lo cual deberá constar por escrito mediante Otrosí.

**Noveno – Responsabilidad por Incumplimiento:** En caso de incumplimiento total o parcial de las declaraciones y obligaciones derivadas de este Acuerdo, el Estudiante deberá indemnizar a SIERRACOL por todos los perjuicios que con dicho incumplimiento le causare.

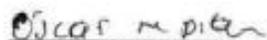
**Décimo - Excepciones a las obligaciones de confidencialidad:** La Información Confidencial no incluirá información que, mediante prueba escrita por parte del Estudiante, sea conocida por el público en general o

se encuentre disponible para el público en general en forma distinta a cualquier acto u omisión de el Estudiante. El Estudiante tendrá derecho a divulgar la Información Confidencial sin el consentimiento previo de SIERRACOL solo en el evento de que dicha Información Confidencial sea requerida judicialmente o por autoridad competente.

**Undécimo –Ley Aplicable y Domicilio:**

- a. Este Acuerdo será interpretado de conformidad con las leyes de la República de Colombia.
- b. Las Partes harán todos los esfuerzos razonables para resolver amigablemente cualquier disputa generada o relacionada con este Acuerdo, incluyendo esfuerzos razonables para resolver dicha disputa a través de consultas entre los ejecutivos de las Partes en el caso de que dicha disputa no sea de otra forma resuelta amigablemente. Cualquier disputa que surja o esté relacionada con este Acuerdo, incluyendo cualquier problema relativo a su existencia, validez o terminación, la cual no pueda ser resuelta amigablemente entre las Partes, se someterá a la decisión de la Jurisdicción Colombiana.
- c. Para todos los efectos legales, las Partes designan a la ciudad de Bogotá, D.C., como su domicilio contractual.

En aceptación de lo anterior, se firma en la ciudad de Arauca el día 23 de febrero de 2021



Oscar Mauricio Diaz Romero  
C.C. 1.116.783.174



Miguel Andres Lopez Mariño  
C.C. 79.915.491

0044802