

**DISEÑO DE UN BAÑO RECIRCULANTE CON CONTROL CONTINUO DE  
TEMPERATURA PARA VERIFICACIÓN METROLÓGICA EN LA DIVISIÓN DE  
MANTENIMIENTO TECNOLÓGICO DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE  
SANTANDER**

**JOSÉ ANDRÉS QUIROGA NIÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**DISEÑO DE UN BAÑO RECIRCULANTE CON CONTROL CONTINUO DE  
TEMPERATURA PARA VERIFICACIÓN METROLÓGICA EN LA DIVISIÓN DE  
MANTENIMIENTO TECNOLÓGICO DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE  
SANTANDER**

**JOSÉ ANDRÉS QUIROGA NIÑO**

**Trabajo de grado para otorgar el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## **DEDICATORIA**

A Dios, en primer lugar, que permitió lograr este meta.

A mi madre que siempre estuvo conmigo apoyándome.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre, que también hizo de padre. Porque me es corta la vida para agradecerle todo lo que ha hecho por nosotros.

## CONTENIDO

	<b>pag</b>
INTRODUCCION	19
1. JUSTIFICACION	22
2. OBJETIVOS	24
2.1 OBJETIVO GENERAL	24
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	24
3. TRAZABILIDAD DE LOS EQUIPOS DE MEDICION	26
3.1 CONCEPTOS GENERALES	26
3.2 IMPORTANCIA DE LA TRAZABILIDAD	29
3.3 CALIBRACION DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA	29
3.3.1 Calibración de sensores de temperatura usando constantes universales	30
3.3.2 Calibración de sensores de temperatura por comparación	32
4 BAÑOS TERMOSTATADOS	33
4.1 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN BAÑO TERMOSTATADO	34
4.1.1 Agitación del fluido de trabajo	34
4.1.2 Aislamiento y sellamiento	35
4.1.3 Sistema de intercambio de calor	35
4.1.4 Fluido de trabajo	35
4.1.5 Control continuo de temperatura	36
5 PROCESO DE DISEÑO	37
5.1 CRITERIOS DE DISEÑO	37
5.1.1 Costo	37
5.1.2 Eficiencia	37
5.1.3 Vida útil	38

5.1.4	Exactitud	38
5.1.5	Proceso de manufactura	38
5.2	SUBGRUPOS CONTENIDOS EN EL BANCO	38
5.3	PROCESO DE DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES	39
6	DISEÑO DE LOS SUBSISTEMAS ESTRUCTURAL Y AGITACION	41
6.1	SUBSISTEMA ESTRUCTURAL	41
6.1.1	Selección del material del banco	41
6.1.1.1	Acero inoxidable	41
6.1.1.2	Acero al carbono 1020	41
6.1.1.3	Madera	42
6.1.2	Diseño del marco	42
4.1.2.1	Análisis de factor de seguridad	42
6.1.3	Dimensionamiento del contenedor y tapa del contenedor	44
6.1.4	Selección del aislante	45
6.1.5	Selección del fluido de trabajo	46
6.2	SUBSISTEMA DE AGITACION	48
6.2.1	Selección de la hélice	48
6.2.2	Selección del motor	49
4.2.1.1	Determinación de la velocidad de giro y potencia	49
6.2.3	Diseño de la cubierta de hélice y acople	51
7	DISEÑO DE LOS SUBSISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	53
7.1	CAPACIDAD DE LOS SUBSISTEMAS	53
7.2	SUBSISTEMA DE REFRIGERACION POR COMPRESION	65
7.2.1	Selección del refrigerante	65
7.2.2	Selección de la unidad condensadora	66
7.2.3	Selección elemento expensor	68
7.2.4	Diseño del evaporador	69
7.3	SUBSISTEMA DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA ELÉCTRICA	75
7.3.1	Diseño de resistencia eléctrica	75
8	DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE CONTROL	76

8.1	SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES	76
8.1.1	Selección del controlador	76
8.1.2	Selección del sensor	78
8.1.3	Selección de los elementos de estado sólido	79
8.1.3.1	Relé de estado sólido como pre actuador del subsistema de refrigeración por compresión	79
8.1.3.2	Relé de estado sólido como pre actuador del subsistema de refrigeración por compresión	80
8.1.4	Selección de los elementos de seguridad	81
8.1.4.1	Fusible	81
8.1.4.2	Disyuntores	81
8.2	DIAGRAMAS DEL SUBSISTEMA DE CONTROL	82
8.2.1	Diagramas de control	83
8.2.2	Diagrama de potencia	84
8.3	DISEÑO Y ANALISIS DEL CONTROLADOR	85
8.3.1	Análisis matemático	85
8.3.2	Sistema de control	83
8.3.2.1	Subsistema de control PID para calentamiento por resistencia eléctrica	88
8.3.2.2	Subsistema de control ON-OFF para refrigeración por compresio	104
8.3.3	Configuración del controlador	104
8.3.4	Simulación	105
9	PROCESO DE CALIBRACION DE SENSORES DE TEMPERATURA POR COMPARACION	107
9.1	CONDICION AMBIENTAL	107
9.2	PREACUCIONES EN INDICACIONES	108
9.3	PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION	109
9.4	PRESENTACION DE RESULTADOS	110
10	OBSERVACIONES	112
11	CONCLUSIONES	114

12 RECOMENDACIONES	117
BIBLIOGRAFIA	118
ANEXOS	121

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pag.</b>
Figura 1. Relación cantidad de sensores – costo	22
Figura 2. Baño isotérmico	25
Figura 3. Trazabilidad de los equipos de medición	27
Figura 4. Instrumento de medición convencional	28
Figura 5. Punto triple del agua	30
Figura 6. Forma simple de establecer el punto triple del agua	31
Figura 7. Banco metrológico convencional	32
Figura 8. Proceso de diseño	39
Figura 9. Marco	43
Figura 10. Análisis marco	44
Figura 11. Contenedor y tapa de contenedor	45
Figura 12. Polietileno expandido	45
Figura 13. Tipos de flujos internos	49
Figura 14. Cubierta hélice	51
Figura 15. Acople	52
Figura 16. Perdidas de calor en el contenedor	55

Figura 17. Resistencias térmicas en la parte superior del contenedor	56
Figura 18. Resistencias térmicas en la base del contenedor	60
Figura 19. Resistencias eléctricas en las paredes del contenedor	62
Figura 20. Unidad condensadora Tecumseh CAJ/TAJ4492YHR	67
Figura 21. Tubo capilar convencional	68
Figura 22. Evaporador	74
Figura 23. Controlador OMROM E5CN-H de uso general	77
Figura 24. RTD OMEGA tipo PT 100	79
Figura 25. Diagrama de subsistema de control	83
Figura 26. Diagrama de potencia	84
Figura 27. Conexión del controlador	85
Figura 28. Respuesta transitoria de la función de transferencia	87
Figura 29. Relación entre voltaje efectivo y porcentaje de activación	89
Figura 30. Relación entre potencia disipada y el porcentaje de activación	90
Figura 31. Relación entre la potencia asumida y el porcentaje de activación	91
Figura 32. Análisis de la nueva función de transferencia con entrada de escalón unitario	93
Figura 33. Respuesta transitoria de la variable del proceso y acción de control	95
Figura 34. Diagrama de polos y ceros en lazo cerrado	96
Figura 35. Respuesta transitoria modificada a la variable del proceso y acción de control	97

Figura 36. Diagrama de polos y ceros modificado	98
Figura 37. Diagrama de bloques del sistema	99
Figura 38. Respuesta transitoria del comportamiento de la temperatura del fluido y la acción de control únicamente proporcional	98
Figura 39. Respuesta transitoria del comportamiento de la temperatura del fluido y la acción de control proporcional – integral	100
Figura 40. Diagrama de bloques de controlador PI	105
Figura 41. Diagrama de bloques de controlador P	106

## LISTA DE TABLAS

	pag
Tabla 1. Estado del volumen en función de la temperatura de operación	33
Tabla 2. Conductividad térmica de los aislantes comunes	35
Tabla 3. Acero AISI 304 en el mercado	41
Tabla 4. Polietileno expandido en el mercado	46
Tabla 5. Propilenglicol en el mercado	46
Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas del propilenglicol	47
Tabla 7. Diferentes flujos dentro de un sistema de agitación	48
Tabla 8. Características del motor	51
Tabla 9. Propiedades y características del fluido de trabajo	54
Tabla 10. Condiciones de ambiente de trabajo	54
Tabla 11. Propiedades de los materiales presentes en la pared del contenedor	58
Tabla 12. Propiedades del aire atmosférico	59
Tabla 13. Capacidades de los subsistemas de intercambio de calor	65
Tabla 14. Requerimientos operacionales de la unidad condensadora	66
Tabla 15. Especificaciones de la unidad condensadora	67
Tabla 16. Nomenclatura de los elementos de control	85

Tabla 17. Índices de eficiencia del controlador	103
Tabla 18. Análisis de viabilidad del proyecto	117
Tabla 19. Condiciones desfavorables para el funcionamiento del equipo	122

## LISTA DE ANEXOS

	pag
ANEXO A. MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL BANCO METROLOGICO	120
ANEXO B. PLANOS	123

## RESUMEN

### TITULO:

**DISEÑO DE UN BAÑO RECIRCULANTE CON CONTROL CONTINUO DE TEMPERATURA PARA VERIFICACION METROLOGICA EN LA DIVISION DE MANTENIMIENTO TECNOLOGICO DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.\***

### AUTOR:

**José Andrés Quiroga Niño. \*\***

### PALABRAS CLAVES:

**Baño isotérmico, calibración por comparación, control PID.**

### DESCRIPCION:

La globalización de la industria y el comercio ha traído consigo que productos y servicios similares, posean los mismos principios a pesar de las diferencias geográficas de sus fabricantes o proveedores. Esta normalización no fue posible sin la formación de grandes organizaciones como la ISO, conformadas por diferentes países que buscan delinear cualquier procedimiento científico o industrial adelantado mundialmente.

Tal situación se vive cuando se trabaja con magnitudes y medidas. De forma específica; es necesario que una magnitud determinada, sea la misma en cualquier parte del mundo. Para que esto sea posible, es necesario que los elementos de medición funcionen correctamente.

Definido el contexto, el diseño de un baño isotérmico como primer paso hacia su futura inclusión que proporcionaría los medios necesarios para que se pueda asegurar el buen funcionamiento de una gran cantidad de sensores de temperatura contenidos en las instalaciones de la universidad y cuyos servicios benefician grandes y pequeños proyectos.

Pero poseer el banco es uno de los muchos requisitos por cumplir, también es necesario realizar estas calibraciones siguiendo un procedimiento que proporcione justo la información necesaria, para recopilarla en documentos especiales, sencillos de interpretar y que no deje espacio a dudas o malos manejos por parte del operador. Cuidando en todo momento el bienestar de este y del medio ambiente, suponiendo que solo personal capacitado tendrá acceso al equipo.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Jaid Eduardo Quiroga Méndez.

## ABSTRACT

### TITLE:

**DESIGN OF A RECIRCULATING BATH WITH CONTINUOUS CONTROL OF TEMPERATURE FOR METROLOGIC VERIFICATION IN THE TECHNOLOGICAL MAINTENANCE'S DIVISION OF THE INDUSTRIAL UNIVERSITY OF SANTANDER.\***

### AUTHOR:

**José Andrés Quiroga Niño.\*\***

### KEY WORDS:

**Isothermal bath, Calibration by comparison, PID control.**

### DESCRIPTION:

The globalization of industry and commerce have brought with them that similar products and services have the same principles in despite of the geographical differences of their manufacturers or suppliers. This normalization wasn't possible without the creating of large organizations like ISO, formed by different countries that looking for outline any scientific procedure or industrial advanced globally.

This situation exists at the moment to work with variables and measures. In a specific way, it's necessary that a certain magnitude, is the same anywhere in the world. For this to be possible, it's necessary that the measuring elements have a good performance.

Defined the context, the design of a isothermal bath as a first step towards its future inclusion that would provide the necessary resources so that it can ensure the good operation of a large number of temperature sensors contained in the university an whose services benefit big ans small projects.

But to have the bank is one of the many requirements to fulfill, it's also necessary to do these calibrations following a procedure that provides just the necessary information to collect it on special documents, easy to interpret without space to doubt or mismanagement by the operator. Looking after at all time the welfare and the environment, assuming that only qualified people have access to the isothermal bath.

---

\* Graduation Project

\*\* Faculty of Physics-Mechanic Engineerings, School of Mechanic Engineering, Director Jabid Eduardo Quiroga Méndez.

## INTRODUCCION

Nuestra alma mater, con miras a destacarse como institución de alta calidad, debe y busca acogerse a todas las normativas del Sistema de Gestión Integral (SGI<sup>1</sup>) fundamentado en cuatro modelos de gestión: de Control interno (SCI<sup>2</sup>), Ambiental (SGA<sup>3</sup>), de Seguridad y Salud Ocupacional (S&SO<sup>4</sup>) y de la Calidad (SGC<sup>5</sup>). Bajo la premisa de esta última, los laboratorios y grupos de investigación enmarcan su estructura con el objetivo de cumplir con las crecientes exigencias de eficacia y eficiencia a fin de lograr su acreditación y así asegurar que sus procesos transitan por el mejor camino.

- 
1. Un Sistema de Gestión Integral (SGI) es una plataforma común para unificar los sistemas de gestión de la organización en distintos aspectos en uno solo.
  2. La gestión de control interno (SCI) busca orientar la entidad hacia el cumplimiento de los objetivos institucionales, así como la correcta administración de la información y los recursos. Todo esto bajo la norma MECI 1000:2005.
  3. El sistema de gestión ambiental (SGA) busca facilitar la relación con su entorno social, mediante la implementación de programas dirigidos a inculcar cambios de hábitos y establecer condiciones de trabajo que le permiten controlar el impacto ambiental de sus actividades. Con el cumplimiento de la norma ISO 14001:2004.
  4. La gestión de seguridad y salud ocupacional bajo la norma NTC-OHSAS 18001:2007 tiene como objetivo mantener las condiciones generales de salud y prevención de factores de riesgo.
  5. Bajo las normas ISO9001:2008 y NTCGP1000:2009 la gestión de calidad tiene como propósito fortalecer su capacidad técnica y administrativa para atender más eficazmente los requerimientos nacionales e internacionales.

Calidad que solo es alcanzada mediante el cumplimiento de diversas e importantes condiciones que centran su atención en las articulaciones más importantes de todo proceso de investigación, tales como; el buen manejo de la información, la correcta toma de muestras y datos experimentales, instalaciones y equipo adecuado, entre otros. Pero estos objetivos solo pueden ser alcanzadas mediante la implementación de exigentes políticas que buscan capacitar a los involucrados, incluir nuevos procesos y mejorar los existentes.

Con la confianza que el buen desarrollo de este nuevo enfoque, la Universidad Industrial de Santander dará un pequeño pero importante paso hacia la correcta realización de sus procesos de investigación, vitales a la hora de generar conocimiento.

Lo relacionado con el diseño de este baño isotérmico, será expuesto en este libro, bajo el siguiente orden.

Capítulo 1, como primer paso, es necesario saber que se busca obtener al realizar la trazabilidad a un sensor y los diferentes tipos de métodos para realizarlo. Por tal motivo una breve descripción de todo lo referente a la calibración de sensores puede ser encontrada en esta parte de este documento. Y con esto en mente poder direccionar la implementación de un baño isotérmico en estos procesos.

Capítulo 2, un baño isotérmico encierra un grupo de procesos y elementos. Se dedica este capítulo a la definición de las características y sistemas más significativos, que juntos conforman el banco.

Capítulo 3. Una correcta metodología asegura que se tomen buenas decisiones, por tal motivo este espacio está dedicado a expresar el proceso de diseño utilizado en este proyecto.

Capítulo 4. Este segmento del documento se realiza el diseño y selección de los componentes estructurales del banco, materiales y procesos de manufactura

empleados en su producción, sin embargo los planos de las piezas diseñadas se pueden observar en la sección de anexos.

Capítulo 5. El buen funcionamiento del banco depende en gran medida de un buen sistema de control, y en este capítulo se encuentran los componentes seleccionados y la arquitectura interna de estos.

Capítulo 6. El fluido de trabajo no puede alcanzar las temperaturas deseadas sin un correcto sistema de intercambio de calor, en este segmento de este documento podemos encontrar las pautas tomadas hacia el cumplimiento de este objetivo, los sistemas necesarios tanto para agregar como para retirar calor.

Capítulo 7. La calibración de un sensor solo es posible mediante el seguimiento de una serie de pasos y teniendo en cuenta diversas características que influyen en el éxito de la prueba. Este capítulo intenta realizar un proceso común de calibración, junto con las variables más significativas. Dejando una plantilla que sirva como base para procedimientos futuros. Siguiendo de la mejor manera la sección 5 de la norma ISO/IEC 17025 del 2005, donde se presentan los lineamientos de los procesos de laboratorio y análisis de datos para poder realizar conclusiones, recomendaciones y observaciones acertadas.

Complementarios. Desarrollar el diseño de un banco perteneciente a un área donde cada paso dado debe estar dentro de lo permitido por las normas, da como resultado el surgimiento de incógnitas que se resuelven conforme aumenta la profundización en la materia así como la adquisición de conocimiento. Todo esto es enunciado en esta importante parte del documento, dando así un punto de apoyo a futuras investigaciones.

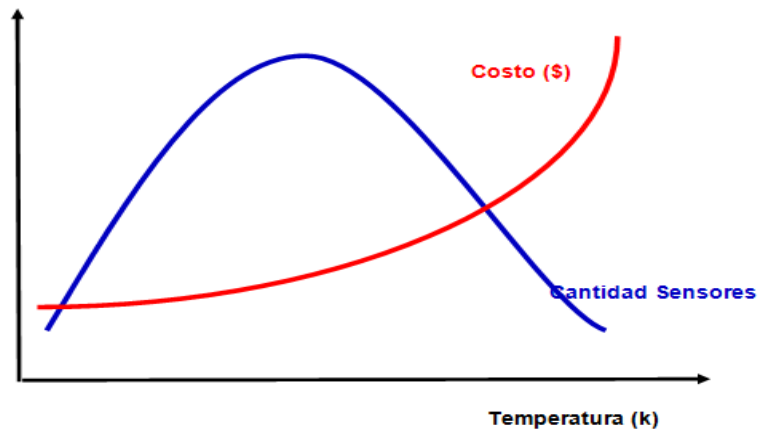
Anexos. Ningún diseño de un equipo está completo sin los planos de las piezas y un manual de mantenimiento que prolongue la vida útil de este.

## 1. JUSTIFICACIÓN

El tener un equipo patrón proporciona la opción de conocer el estado de un gran número de sensores que actualmente prestan su servicio en procesos donde la temperatura se encuentra dentro o muy cercano al rango de operación ofrecido por este, ya que la poca linealidad entre la señal de salida y los valores de entrada en elementos como termocuplas obliga a cumplir con esta condición.

Rango que esta designado por abarcar la mayor cantidad de sistemas de medición, sin dejar a un lado la relación costo beneficio. Ya que en cierto punto aumentar este, buscando ampliar su campo de acción (representando el incremento del número de sensores a tratar), indicaría la elevación de los costos de construcción, operación y mantenimiento de manera significativa. Como se puede observar en la siguiente grafica (\*).

Figura 1. Relación Cantidad Sensores - Costo



---

(\*) Grafica no sujeta a valores reales, su único fin es mostrar la tendencia de los costos y la cantidad de sensores con la temperatura.

Consciente de eso la División de Mantenimiento Tecnológico ve la necesidad de reforzar sus procesos de caracterización y patronaje mediante la inclusión en sus equipos de trabajo un banco metrológico de baño isotérmico. Siendo la sección encargada de proporcionar un soporte a las unidades académicas y administrativas del campus en procesos como; adquisición de nuevos equipos, instalación, operación y correcto funcionamiento. Con la seguridad que en la medida que su trabajo sea detallado, organizado y responsable, nuestra universidad tendrá a su disposición sistemas que prestaran gran ayuda en todos sus departamentos. A fin de continuar en la permanente búsqueda de la excelencia en la prestación de servicios, fortalecer procesos vitales como la investigación y un completo uso de los recursos contenidos en el campus.

Con este banco metrologico, los grupos de investigación y laboratorios podrán proporcionar un mejor servicio a la ciencia y la industria. Fundamentos de la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

## **2. OBJETIVOS**

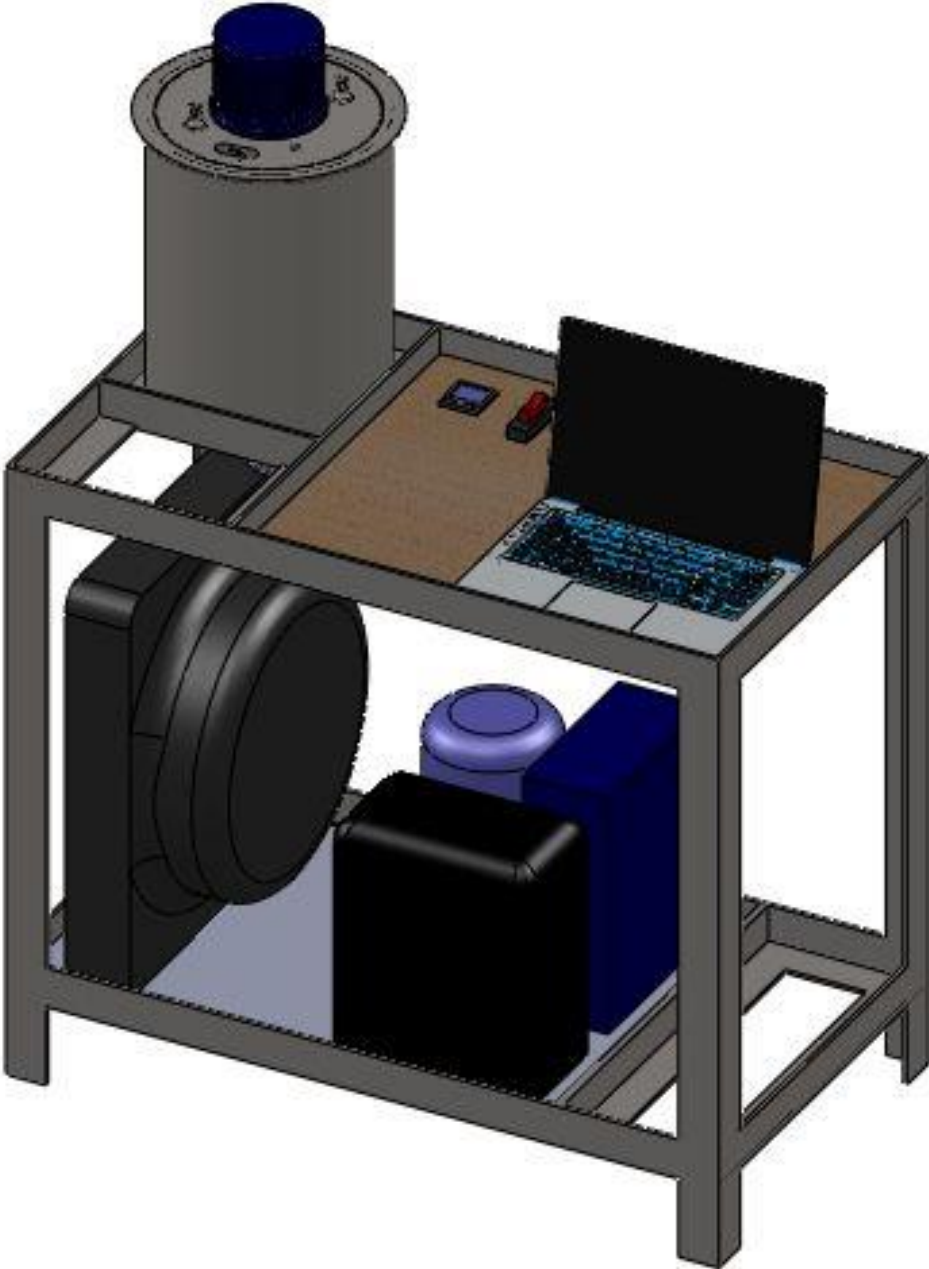
### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Contribuir al desarrollo de mecanismos de verificación metrológica en la División de Mantenimiento Tecnológico, realizando el primer paso hacia la construcción de un medio isotérmico mediante control continuo para la evaluación y caracterización de equipos de medición de temperatura utilizados en el campus.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- ✓ Realizar el diseño en detalle un banco de pruebas metrológicas; para el control de temperatura en un rango de 278K a 343K. Que poseerá una capacidad entre uno y tres sensores a calibrar.
  
- ✓ Establecer los procedimientos para verificación metrológica acordes al equipo e implementarlos en el mapa de procesos de la División de Mantenimiento de la Universidad Industrial de Santander siguiendo las indicaciones de la norma NTC – ISO 17025 y la norma ISO 9001:2008.
  
- ✓ Elaborar las guías de resultados del proceso de calibración, donde se pueda observar; el estado del dispositivo, observaciones, conclusiones y recomendaciones.

Figura 2. Baño isotérmico



### 3. TRAZABILIDAD DE EQUIPOS DE MEDICION

Con el propósito de destacarse como una institución de educación superior con grandes alcances en el campo de la investigación y generación de conocimiento, “todos los equipos utilizados para los ensayos, incluidos los equipos para mediciones auxiliares (por ejemplo, de las condiciones ambientales) que tengan un efecto significativo en la exactitud o en la validez del resultado del ensayo o del muestreo, deben tener su respectiva trazabilidad antes de ser puestos en servicio”<sup>1</sup> para determinar cuáles de ellos presentan un rango considerable de error en sus medidas y la variación de este en el tiempo, parámetros que terminaran definiendo las posibles acciones correctivas. Trazabilidad que se realiza sometiendo los elementos a analizar, a determinadas pruebas con la ayuda indispensable de un equipo patrón o variable universal.

Antes de incursionar en la trazabilidad de los sensores, es necesario tener unos conceptos básicos definidos claramente y así poder darle la interpretación correcta a este documento.

#### 3.1 CONCEPTOS GENERALES

Metrología; considerada la ciencia que estudia y busca normalizar las mediciones de cualquier tipo de variable física usando como principal herramienta la trazabilidad, todo esto con el fin de crear un sistema unificado en el cual la magnitud y el tipo de mediciones no cambie de un lugar a otro.

---

1. NORMA TECNICA COLOMBIANA. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. NTC-ISO/IEC 17025. Bogotá D.C: El Instituto, 2005.p.21.

Trazabilidad; se define como aquel seguimiento de cada uno de los equipos utilizados en la calibración de tal forma que lleguen a un punto en el cual se tomó una constante universal como principio fundamental. De tal forma que se pueda determinar que se usaron procesos y materias primas certificadas, fortaleciendo de esta forma la certeza que el funcionamiento del equipo patrón es el correcto.

Figura 3. Trazabilidad de un equipo de medición.



Calibración; es el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que debiera indicar de acuerdo con un patrón de referencia con valor conocido.

Medición; es el procedimiento de realizar la comparación de un instrumento a medir con otro previamente calibrado.

Instrumento de medición; es aquel equipo previamente calibrado y fabricado bajo altos estándares de calidad, que se usa como comparador del equipo a calibrar.

Figura 4. Instrumento de medición convencional



Fuente. WIKIPEDIA. Medición [online]. San Francisco (California): 2014. [Citado 20 Ene. 2014]. Disponible en Internet <<http://es.wikipedia.org/wiki/Medicion>>.

Error en la medición; definido como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero o valor proporcionado por el equipo calibrado. El objetivo de la calibración es minimizar este error hasta hacerlo nulo o dentro de los rangos permitidos.

Incertidumbre en la medición; al realizar más de una medición en un sistema a calibrar, podemos darnos cuenta que se obtienen diferentes valores en muchas de las mediciones; esto es debido a diferentes factores como campos magnéticos, vibraciones, manufactura, etc. La incertidumbre comprende este comportamiento y es un fenómeno muy difícil de evitar, por tal razón se busca que las magnitudes obtenidas pertenezcan a rango permitido para validar el proceso.

---

(\*) El rango permitido o permisible, depende enteramente de la función a desarrollar por el elemento a calibrarse. Es decir; en aplicaciones de seguridad industrial o el campo médico. Los sensores utilizados deben poseer un comportamiento excelente.

Variable a medir; considerada cualquier propiedad física o química de un sistema o elemento, tales como la temperatura, masa, volumen, densidad, etc.

Repetibilidad; en los procesos de calibración es necesario realizar la medición más de una vez, esto es conocido como repetibilidad y se usa para poder incluir en el resultado el error en la medición y factores que la estén afectando, y así poder obtener un resultado cercano al real.

Exactitud; refleja el grado de concordancia entre el resultado de la medición y el valor real del sistema.

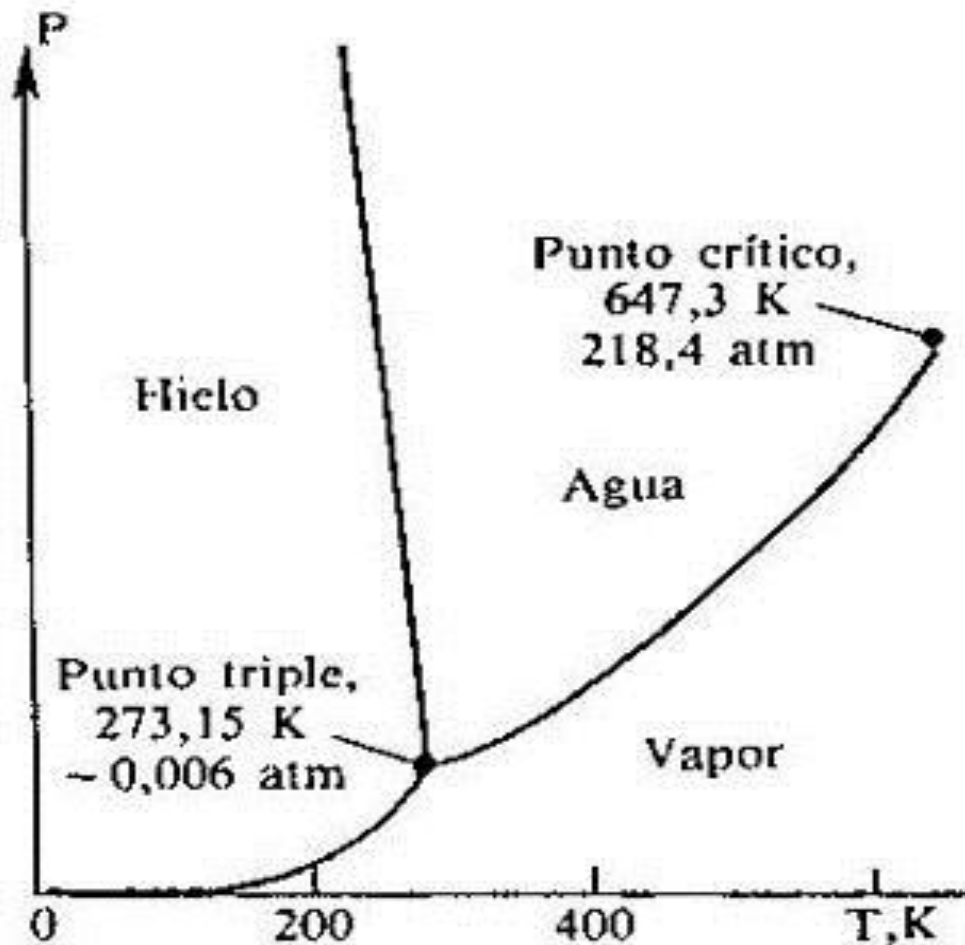
### **3.2. IMPORTANCIA DE LA TRAZABILIDAD**

Dada la gran expansión de la industria, es vital que todo el mundo trabaje bajo los mismos parámetros, facilitando la globalización de productos y/o servicios. Por tal motivo, la trazabilidad y su fundamentación de seguimiento hasta un punto de referencia único cobran una gran importancia. Por ejemplo; lo que se conoce en Colombia como la distancia de un metro (m), será la misma conocida en otro lugar del mundo, facilitando así la comunicación.

### **3.3. CALIBRACION DE SENSORES DE TEMPERATURA**

La Escala Internacional de Temperatura (EIT) en ingles International Temperature Scale (ITS) en 1990 dio a conocer la versión oficial, normalizada y mejorada del punto triple de agua en 273,15 K y 0.00611 atm. Que consiste básicamente en el estado termodinámico donde se puede encontrar el agua en fase sólido, fase líquida y fase gaseosa al mismo tiempo.

Figura 5. Punto triple del agua



Fuente. LIBROSINGENIERIA. Métodos de calibración de sensores de temperatura [online]. Madrid: 2010. [Citado 21 de Mar. 2013]. Disponible en internet <<http://www.librosingenieria.com/>>

También enuncia las dos principales maneras de calibrar un sensor de temperatura; mediante el uso de una constante universal y por comparación.

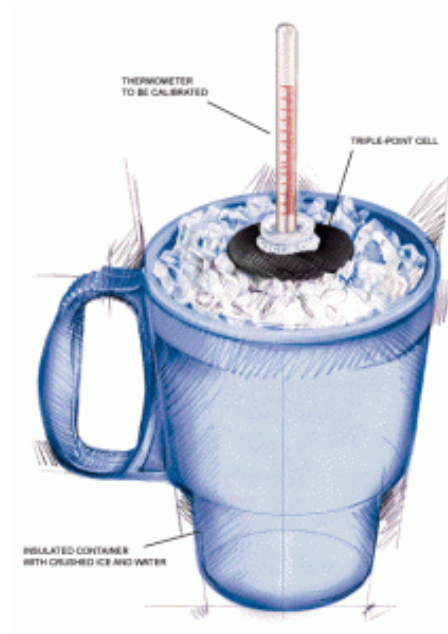
### 3.3.1 Calibración de sensores de temperatura usando constantes universales

Bajo determinadas condiciones de presión y temperatura que permite llegar el

fluido de trabajo (\*) a un punto de equilibrio entre sus fases, son sumergidos los sensores a calibrar y se monitorea su señal emitida de temperatura, para posteriormente compararlos con las normas internacionales.

La forma simplificada se realiza, introduciendo los sensores en una mezcla de hielo y agua que constantemente está siendo agitada para garantizar la misma temperatura en todo el baño. Pero este método es poco preciso ya que depende fielmente de la presión del sistema.

Figura 6. Forma simplificada de establecer el punto triple



Fuente. LIBROSINGENIERIA. Métodos de calibración de sensores de temperatura [online]. Madrid: 2010. [Citado 21 de Mar. 2013]. Disponible en internet <<http://www.librosingenieria.com/>>

---

(\*) Si las condiciones normales de trabajo de los sensores a calibrar lo permiten, se usa como fluido de trabajo el agua por economía, sencillez y exactitud de su punto triple. De lo contrario el Neon, el Hidrogeno, la Plata y el Mercurio surgen como opciones.

**3.3.2 Calibración de sensores de temperatura por comparación.** Descrito como un método en el cual se busca agregar o retirar calor a un fluido de trabajo agitado, hasta que este llegue a la temperatura deseada en todos sus puntos, y se pueda realizar la medición y comparación de la señal de temperatura emitida por los sensores a calibrar sumergidos en el volumen de líquido y la alcanzada por este.

El equipo encargado de realizar este proceso es conocido como un banco metrológico o medio isotérmico.

Figura 7. Banco metrológico convencional



Fuente. ISOTECHNA. Baño isotérmicos [online]. Colchester (Vermont): 2012. [Citado 14 de Jun. 2013]. Disponible en internet <<http://www.isotechna.com/>>

#### 4. BAÑOS ISOTERMICOS

La calibración de sensores mediante comparación, se realiza generalmente gracias a bancos o equipos especiales conocidos como medios isotérmicos, baños termostatados o equipos metroológicos, estos se entienden como un sistema que se encarga de mantener la mayor uniformidad de temperatura en todos los puntos de un volumen de un fluido, ya sea líquido o gaseoso.

La determinación del estado del volumen está estrechamente relacionada con el rango de temperaturas a trabajar en el banco, como será expuesto en la siguiente tabla, basada en la documentación proporcionada por el curso online de TECNICAS DE CONTROL METROLOGICO - Caracterización de medios isotérmicos y calibración de temperatura. Módulo 1 – Conceptos generales de calibración.

Tabla 1. Estado del volumen en función de la temperatura de operación.

<b>Rango de temperaturas(*)</b>	<b>Medio isotérmico</b>
<b>-40°C ~ 300°C</b>	Baño de mezcla acuosa
<b>5°C ~ 95°C</b>	Baño de agua
<b>250°C ~</b>	Horno de gases

Los medios isotérmicos con fluido de trabajo líquido, son conocidos como baños isotérmicos y su aplicación va desde cultivo de bacterias hasta calibración de sensores de temperatura. Por otra parte, los hornos de gases abarcan aplicaciones especiales y su análisis no tendrá lugar en este documento.

El uso de varios equipos se debe a que es muy difícil y costoso que uno solo pueda abarcar todos los rangos disponibles en el mercado de los medios isotérmicos.

#### **4.1 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN BAÑO ISOTERMICO**

Son muchos los fabricantes de este tipo de bancos encontrados en el mercado y se puede apreciar que todos ellos consideraron las mismas exigencias en el diseño de estos equipos. Tales características son vitales para garantizar un buen funcionamiento en busca de una excelente prestación de servicios y serán expuestas a continuación.

- ✓ Agitación del fluido de trabajo
- ✓ Aislamiento y sellado
- ✓ Sistema de intercambio de calor
- ✓ Fluido de trabajo
- ✓ Control continuo de la temperatura

**4.1.1 Agitación del fluido de trabajo.** Dada la condición de mantener la misma temperatura en todo el volumen del fluido de trabajo, es necesario en muchos casos la presencia de algún equipo de agitación o un pequeño sistema de bombeo que se encargue de mantener en constante movimiento el líquido.

En un sistema sin agitar, la condición isotérmica tarda más tiempo en lograrse o se presentan gradientes de temperatura significativos en puntos alejados de la fuente de calor o del sumidero respectivamente.

**4.1.2 Aislamiento y sellamiento.** Una de las maneras de facilitar el control de la temperatura deseada y su uniformidad, es recubriendo con aislante las superficies en contacto con el fluido de trabajo. También es necesario sellar correctamente las uniones del contenedor producidas en su elaboración, evitando de esta manera las fugas de fluido de trabajo y la contaminación por agentes externos.

Tabla 2. Conductividad térmica de los aislantes comunes

Material	Conductividad térmica
<b>Polietileno expandido (Termolon)</b>	0,036 – 0,046 W/m.K
<b>Poliestireno expandido (Icopor)</b>	0,034 – 0,045 W/m.K
<b>Poliuretano expandido</b>	0,023 W/m.K
<b>Espuma elastomérica</b>	0,0258 W/m.K

**4.1.3 Sistema de intercambio de calor.** Buscando alcanzar cualquier valor dentro del rango de temperaturas es necesaria la inclusión de uno o más sistemas de intercambio de calor, que tengan como propósito agregar o retirar este del fluido de trabajo.

**4.1.4 Fluido de trabajo.** Dado que su función es recibir o proporcionar calor alcanzando diferentes temperaturas, mientras permanece en contacto con piezas y superficies del banco.

Propiedades como; resistencia a la corrosión y a la fluidez, capacidad de transferir calor y bajo nivel de emisión de gases tóxicos cobran un valor importante y son tenidas en cuenta en el momento de su selección.

**4.1.5 Control continuo de temperatura.** Disminuir la complejidad de operación de los sistemas industriales es quizás una de las metas planteadas actualmente en cientos de empresas, y en los medios isotérmicos. Un control retroalimentado proporciona la solución a varios problemas funcionales del banco, por ejemplo; alcanzar una temperatura dentro del rango permitido y el buen uso de la energía.

## 5. PROCESO DE DISEÑO

Son muchas las ideas que surgen para solucionar un problema de estas características, pero es necesario tener un debido proceso, claro y bien estructurado, que no deje espacio a decisiones no argumentadas ni preguntas sin resolver.

Por tal motivo se planteó un proceso de diseño que busca tomar la experiencia de profesionales de las distintas áreas contenidas en el banco, junto a la información encontrada respecto a estos equipos y enmarcarlos dentro de los lineamientos presentados por los criterios de diseño.

### 5.1. CRITERIOS DE DISEÑO.

Es necesario tener en cuenta una serie de criterios que aportan una guía hacia la selección y diseño de los elementos apropiados.

5.1.1 **Costo:** buscando como medida la mejor relación entre costo – beneficio, es necesario buscar en el mercado elementos que posean características apropiadas al mejor precio.

5.1.2 **Eficiencia:** una excelente relación entre la potencia consumida en operación y la transmitida al fluido de trabajo, es un parámetro necesario a la hora de seleccionar los componentes del equipo, de no tenerse en cuenta, aspectos como el cuidado del medio ambiente y un gasto económicos mínimo en su operación no se podrían cumplir.

5.1.3 **Vida útil:** la corrosión y las fugas son quizás los problemas más significativos que afectan contra la vida útil del equipo, pensando en ello; reconocemos la prioridad de algunas características como el fluido de trabajo y el material de los contenedores.

5.1.4 **Exactitud:** ya que la función del banco es la calibración de sensores, no se puede ser indulgente a la hora de seleccionar el sensor y equipo controlador. Pues la resolución del primero debe ser significativamente mayor a la de los sensores a calibrar.

5.1.5 **Proceso de manufactura:** en muchas ocasiones la principal limitante es que no es posible maquinar bajo determinadas especificaciones, en este punto el conocimiento empírico de los técnicos toma gran valor pues son ellos quienes aportando ideas o corrigiendo las existentes, direccionan el sentido del diseñador.

## 5.2 SUBGRUPOS CONTENIDOS EN EL BANCO.

Buscando obtener un proceso de diseño ordenado, es necesario dividir el diseño del banco en subsistemas, que serán tratados en los posteriores tres capítulos:

- ✓ Subsistema de marco estructural.
- ✓ Subsistema de refrigeración por compresión.
- ✓ Subsistema de calentamiento por resistencia eléctrica.
- ✓ Subsistema de control.
- ✓ Subsistema de agitación.

### 5.3 PROCESO DE DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES.

Después de observar todos los parámetros a tener en cuenta a la hora de tomar una decisión, es posible establecer una serie de pasos mínimos, necesarios que garantizan una correcta acción de diseño. En la siguiente grafica podemos ver tales pasos, usados en el desarrollo de este proyecto.

Figura 8. Proceso de diseño.

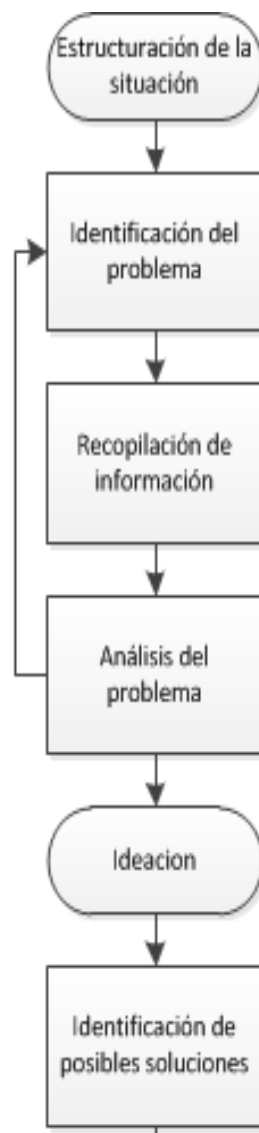
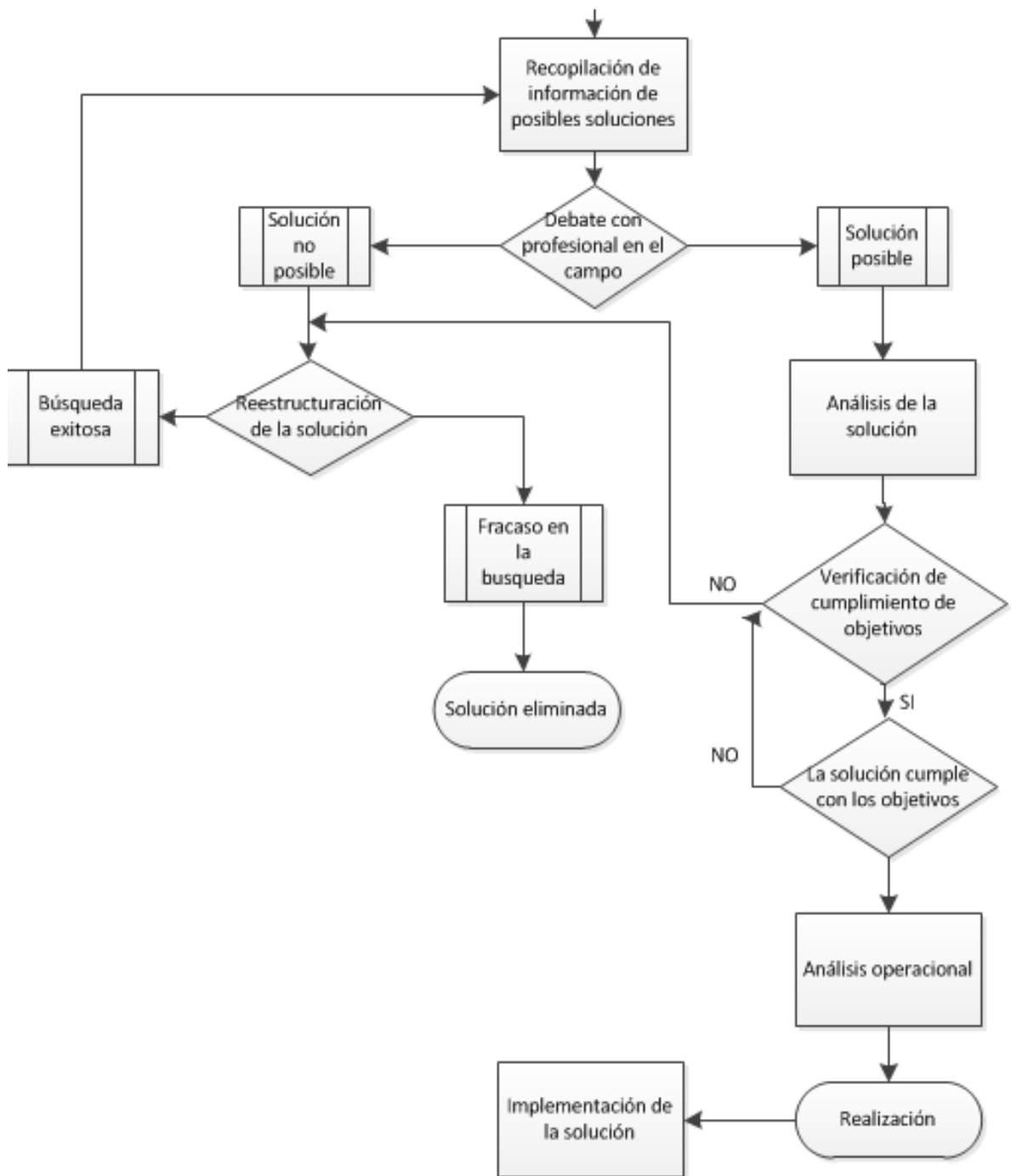


Figura 8. Proceso de diseño (continuación).



## 6. DISEÑO DE LOS SUBSISTEMAS ESTRUCTURAL Y AGITACIÓN.

### 6.1 SUBSISTEMA ESTRUCTURAL.

**6.1.1 Selección de los materiales del banco.** Dadas las diversas funciones de los componentes del banco es necesario usar más de un material.

**6.1.1.1 Acero inoxidable AISI 304.** Por mucho el material más apropiado para fabricar las piezas que están en contacto directo con el fluido de trabajo, pues dada la composición química de este, es posible que se presente en algún grado la corrosión de no tenerse las precauciones adecuadas.

También fue necesario tener en cuenta su costo, facilidad de adquisición y los procesos de manufactura necesarios para fabricar las piezas (soldadura, doblado, corte, etc.).

De este acero son muchos los espesores de láminas encontradas en la región, sin embargo se elige lámina calibre 16 (1,52 mm) con dimensiones 122 cm x 244 cm.

Tabla 3. Acero AISI 304 calibre 16 en el mercado

TAMAÑO	VALOR
122 cm x 244 cm	276,000
150cm x 300 cm	425,000

**6.1.1.2 Acero al carbono 1020.** Elementos como el marco están sujetos a diferentes condiciones de funcionamiento, por tal motivo se selecciona un acero al carbono común como materia prima.

**6.1.1.3 Madera.** Este elemento se incluye en el banco para ordenar de la mejor manera los elementos del subsistema de control, y facilitar un espacio de trabajo para ubicar computadores portátiles o documentos, se incluye dentro del diseño una lámina. Con dimensiones de 480 mm x 595 mm x 10 mm.

**6.1.2 Diseño del marco.** Para su construcción se selecciona como materia prima un perfil en L de acero al carbono calibre (50 mm X 5 mm) y procesos de manufactura como soldadura y corte. La estructura donde reposan todos los componentes del banco, debe ser cuidadosamente diseñada, por ello se hace uso del paquete de software Solidworks® para realizar un análisis de factor de seguridad del perfil seleccionado, para conocer si este es viable o no.

**6.1.2.1 Análisis de factor de seguridad.** De acuerdo al diseño del marco existen tres (3) zonas principales donde recae la mayor cantidad de carga estática correspondientes a;

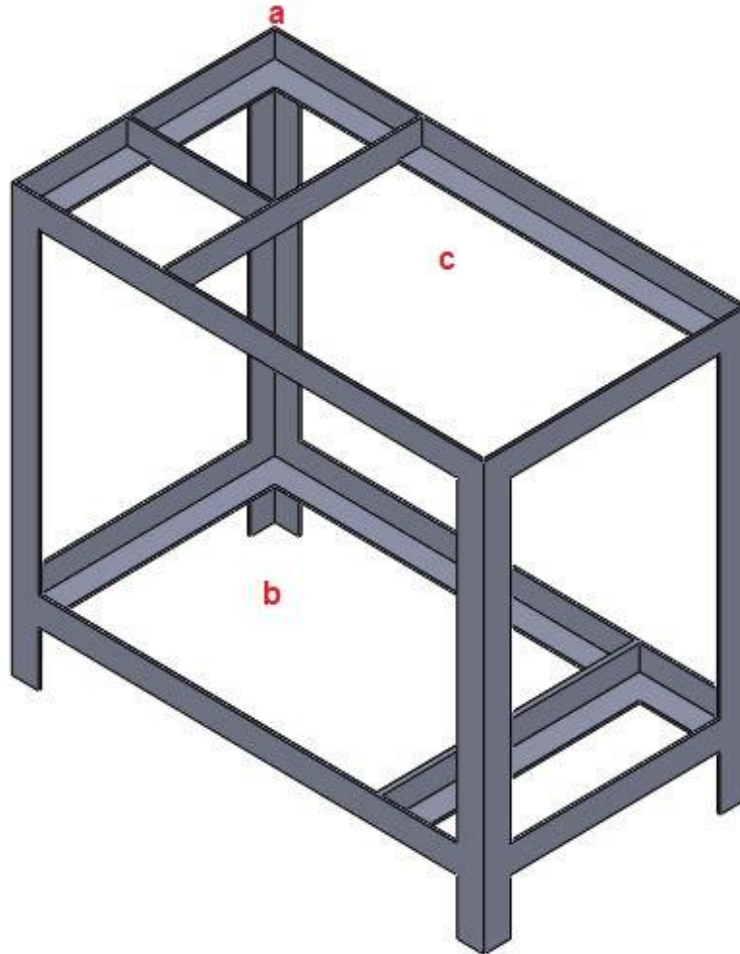
✓ la carga producida por el contenedor, y elementos contenidos en él (a): corresponde al peso del contenedor, motor de agitación, fluido de trabajo y elementos sumergidos en este, sumando un valor aproximado de 30 Kg.F, sin embargo para efectos del análisis de tomará un valor sobredimensionado de 50 KgF.

✓ la carga producida por la unidad condensadora (b): con un peso de 40 Kg.F (valor de catálogo) pero para efectos del cálculo será reemplazada por una carga de 45 KgF.

✓ la carga producida por los elementos de control y la zona de trabajo (c): dado que la carga producida por estos elementos es muy baja, para efectos del cálculo se supone un valor de 20 KgF como el peso que ejercen este montaje sobre el marco.

Ya definidos estos valores, es necesario identificar sobre las zonas del marco sobre las cuales tienen efecto.

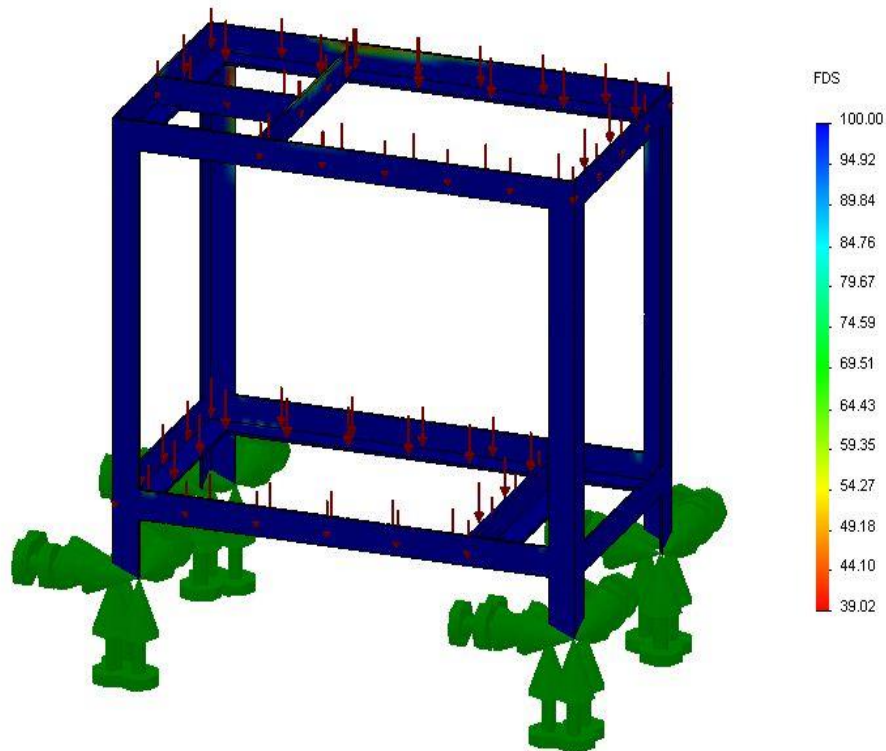
Figura 9. Marco.



El uso de ángulos para su fabricación provee la característica de apoyar y sujetar elementos como; la unidad condensadora y el contenedor. Reduciendo el uso de elementos de sujeción.

El análisis realizado con la ayuda del SolidWorks®, proporciona los siguientes resultados. Donde es notable que el factor de seguridad posee grandes valores, asegurando con ello que el marco resiste las cargas aplicadas.

Figura 10. Análisis marco.

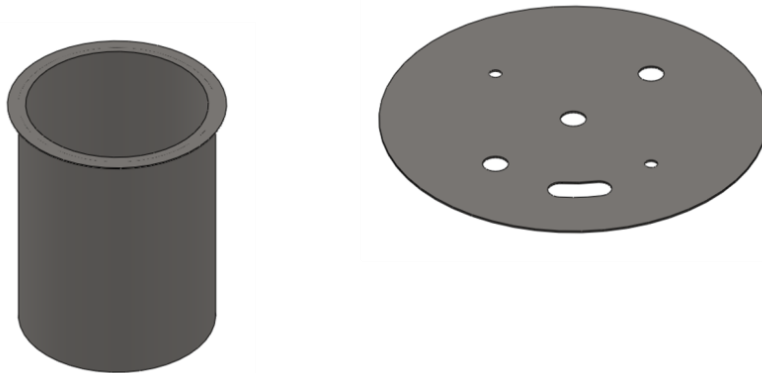


Este elemento del banco tiene un costo de fabricación de 100,000 pesos.

**6.1.3 Dimensionamiento del contenedor y la tapa del contenedor.** Gracias a facilidad de mecanizado y soldadura se diseña un contenedor de forma cilíndrica de diámetro 250 mm y altura 350 mm, con una abertura en su fondo donde se suelda un trozo de tubo de acero AISI 304  $\frac{1}{2}$ " de tal forma que se pueda instalar una válvula que facilitara la extracción del fluido de trabajo. El costo de su manufactura se encuentra alrededor de 35,000 pesos.

Por su parte la tapa del contenedor, se compone de una lámina circular con las respectivas ranuras para introducir en el fluido de trabajo los elementos encargados de la transferencia de calor y la medición. Este elemento tiene un costo de producción equivalente a 30,000.

Figura 11. Contenedor y tapa de contendor.



**6.1.4 Selección del aislante.** Son varios los aislantes encontrados en la industria regional, sin embargo gracias a su fácil montaje y economía. El polietileno expandido es el seleccionado o conocido también como Termolón.

Figura 12. Polietileno expandido



Fuente. ASCONSTRUCTORAS. Termolon [online]. Medellín: 2009. [Citado 10 Nov del 2013]. Disponible en internet: <<http://www.aconstructoras.com>>

Su precio varía según su calibre medido en milímetros de grosor y se enuncia en la siguiente tabla. Los valores están proporcionados para una lámina de 1,15m x 1m. Sin embargo su longitud puede ser la deseada por el cliente, ya que se consigue mediante rollos de varias decenas de metros.

Tabla 4. Polietileno expandido en el mercado.

<b>CALIBRE</b>	<b>VALOR</b>
<b>No.8 (8 mm)</b>	10,300
<b>No. 10 (10 mm)</b>	11,000
<b>No. 12 (12 mm)</b>	13,100

Para este proyecto se selecciona una lámina de calibre No. 10 con dimensiones 1,15m x 1m por un costo de 11,000 pesos.

**6.1.5 Selección del fluido de trabajo.** Al tomar como criterio de selección, el costo, peligrosidad y propiedades fisicoquímicas, se selecciona el Propilenglicol, presente en estado líquido bajo condiciones ambientales (presión y temperatura) y muy conocido en el mundo industrial gracias a sus innumerables aplicaciones, entre las que se destacan; disolvente, humectante y anticongelante.

Tabla 5. Propilenglicol en el mercado

<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR</b>
<b>20 Kg (19,3 Lt)</b>	178,000
<b>1 Lt</b>	12,000

Dado que se necesita un volumen equivalente a un cilindro de 0,25 m de diámetro y 0,33 m de altura (Aprox. 16,78 Lt). Es aconsejable comprar los 20 Kg del fluido y tener los restantes como reserva.

El Propilenglicol tiene apariencia de un líquido incoloro, sinsabor, ligeramente viscoso y con un olor propio de los glicoles.

Las propiedades fisicoquímicas más significativas serán expuestas en la siguiente tabla.

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas del propilenglicol.

<b>PROPIEDAD</b>	<b>VALOR</b>
<b>Formula</b>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>
<b>Peso molecular</b>	76,10 (g/mol)
<b>Punto de ebullición, 1 atm</b>	187,4° C
<b>Densidad, 25 C, 1 atm</b>	1,036 g/cm <sup>3</sup>
<b>Presión de vapor, 20° C</b>	0,011 KPa
<b>25° C</b>	0,017 KPa
<b>Punto de fusión</b>	Sobre-enfriamiento
<b>Viscosidad, 25° C</b>	48,6 cP
<b>60° C</b>	8,42 cP
<b>Temperatura critica de fluidez</b>	<-57 C
<b>Calor especifico, 25° C</b>	2,51 J/g°K
<b>Punto de inflamación</b>	104 C
<b>Punto de auto-ignición</b>	371 C
<b>Conductividad térmica, 25° C</b>	0,2061 W/m°K
<b>Conductividad eléctrica, 25° C</b>	10 mS/m
<b>Calor de formación</b>	-422 KJ/mol
<b>Calor de vaporización, 25° C</b>	67 KJ/mol

## 6.2 SUBSISTEMA DE AGITACIÓN

Los efectos en el comportamiento de un fluido al ser agitado, dependen en igual medida del tipo de movimiento como de las propiedades del medio (para este caso propilenglicol).

**6.2.1 Selección de la hélice.** El tipo movimiento está en función de factores como; el tipo de hélice, las características de giro (velocidad, torque). Definido esto, el primer paso es seleccionar el tipo de hélice necesaria para obtener los mejores resultados.

Principalmente existen dos tipos de hélices usados en estas aplicaciones, cada una de ellas presentan unas características específicas y la selección depende enteramente del flujo que se busca obtener.

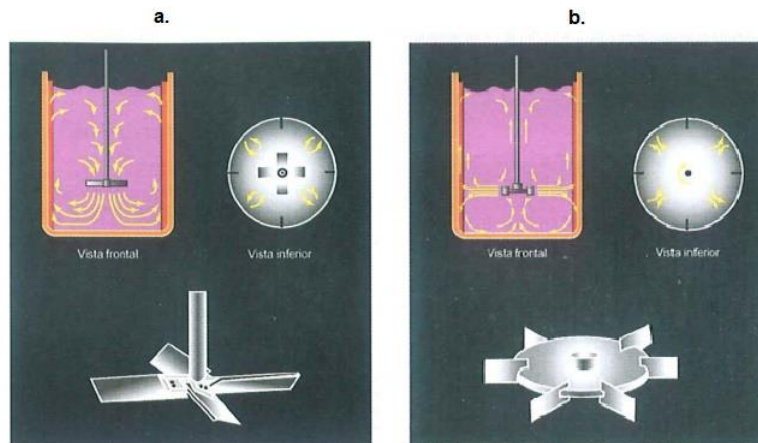
Tabla 7. Diferentes flujos dentro de un sistema de agitación.

Flujo axial	Flujo radial
✓ Utilizado en procesos con baja viscosidad	✓ Utilizado en procesos con fluidos de alta viscosidad
✓ Produce altos caudales	✓ Produce bajos caudales
✓ Requiere un bajo torque	✓ Requiere un alto torque
✓ Utiliza hélices de aletas oblicuas	✓ Utiliza hélices de palas rectas

Dado que el flujo axial se acomoda de mejor manera a los requerimientos del caso. Se selecciona una hélice de aletas oblicuas, con un número de estas entre 3 y 4 con un diámetro externo de 80 mm. Es igualmente importante que su material no sea corrosivo, o degradable al sumergirlo en soluciones acuosas.

La siguiente grafica proporciona información extra que fortalece la decisión tomada.

Figura 13. Tipos de flujos internos.



a) Flujo axial. b) flujo radial.

Fuente. RIERA LERIN, I; SESÉ CASTEL J y SANTAMARÍA SERNA, F. Aplicación tecnológica de la agitación en la industria químico-farmacéutica, Aspectos teóricos. En: Industria Farmacéutica. Mayo – Junio, 2007. no 133, p 86 – 98.

**6.2.2 Selección del motor.** Dado que los parámetros a cumplir son principalmente el tipo de alimentación, la velocidad de giro y torque. Y la cuantificación de estos últimos es compleja y depende del comportamiento del fluido de trabajo. Por tal motivo se realizaron cálculos basados en suposiciones que brindan una aproximación al caso real.

**6.2.2.1 Determinación de la velocidad de giro y la potencia.** Dado que un fluido de agitado en estado turbulento debe poseer un número de Reynolds superior a  $2,4 \cdot 10^5$  y las dimensiones de la hélice previamente seleccionada, se determina la velocidad de giro necesaria por parte del motor.

$$Reynolds = \frac{N * d^2}{\nu}$$

Dónde:

$d = 80[mm]$  → *diametro exterior de la helice*

$N$  → *revoluciones por segundo*

$\nu = 4,6911 * 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$  → *viscosidad cinematica*

Obteniendo entonces que es necesario un motor que gire a 105550 RPM. Un valor extremadamente alto y por lo tanto no aplicable bajo este contexto.

Esto básicamente significa que no es posible alcanzar el estado de flujo turbulento, obstaculizando el propósito de alcanzar la misma temperatura en todo el volumen del fluido de trabajo.

Con esto en mente se realiza el análisis para un motor que gire a 7200 RPM, estando ubicado este en el umbral de lo económicamente viable. Sin dejar de un lado su disponibilidad en la región.

El cálculo de la potencia del motor requiere un poco mas de análisis y en los sistemas de agitación en estado laminar, viene determinada mediante la siguiente ecuación.

$$Pot = \frac{K_L * N^2 * d^3 * \mu}{\omega} [watts] \rightarrow \text{Potencia necesaria para una helice}$$

Dónde:

$K_L = 41$  → *Conste. dependiente de la geometria de la helice y el fluido*

$\omega$  → *velocidad de giro en*  $\left[ \frac{rad}{s} \right]$

$\mu$  → *viscosidad dinamica en*  $\left[ \frac{Pa}{s} \right]$

Dado que son dos hélices las que se han de instalar en el eje del motor el resultado anterior es multiplicado por dos (2), obteniendo una potencia necesaria de 294 [Watts].

Estos datos junto a los de funcionamiento del motor como el tipo de alimentación, permiten seleccionar un elemento que se ajuste a nuestras necesidades.

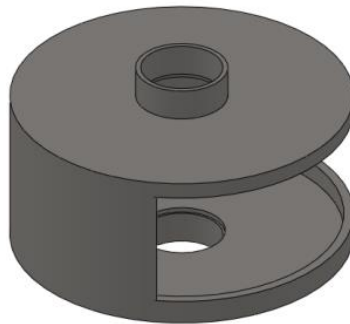
Tabla 8. Características del motor

<b>Características principales</b>	
<b>Alimentación</b>	110V (60Hz)
<b>Potencia</b>	2/5 HP
<b>Giro</b>	7200 RPM
<b>Valor (aprox.)</b>	170.000

**6.2.3 Diseño de la cubierta de la hélice y el acople.** Este componente del banco no puede pasarse por alto, ya que mantienen las partes móviles alejados de los demás elementos sumergidos en el fluido de trabajo. El costo de su fabricación es 25,000 pesos cada una (dos en total).

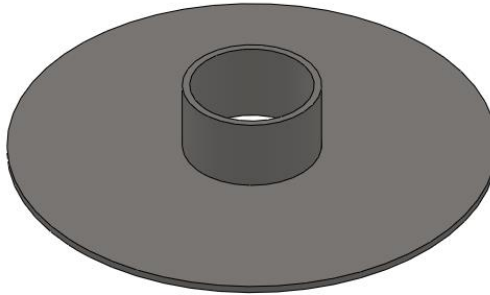
La cubierta de la hélice tiene forma cilíndrica con un agujero lateral, importante para extender el movimiento del fluido. Para su elaboración es necesario usar procesos de manufactura tales como soldadura, cortado y doblado.

Figura 14. Cubierta de hélice.



El acople esta conformado por una lámina de acero AISI 304 que se encuentra soldada a un tubo de 1" roscado internamente. Este elemento tiene como propósito unir las partes de la cubierta de hélice con la tapa del contenedor. Este elemento posee un costo de 10,000 pesos.

Figura 15. Acople



## 7. DISEÑO DE LOS SUBSISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La posibilidad de que el fluido de trabajo alcance varias temperaturas es quizás una de las principales funciones del banco, puesto que facilita definir el comportamiento del sensor a calibrar con mayor facilidad. Basado en esto es necesaria la presencia de subsistemas de transferencia de calor tales como; subsistema de refrigeración por compresión y calentamiento por resistencia eléctrica para cumplir con los objetivos del proyecto trazados previamente.

### 7.1 CAPACIDAD DE LOS SUBSISTEMAS

Son varios los parámetros que influyen en el cálculo de la capacidad máxima del sistema, la masa de refrigerante, el tipo de refrigerante y las temperaturas extremas deseadas son quizás algunos de los más significativos. Todo esto para obtener una estimación de la capacidad necesaria de los diferentes componentes encargados de intercambiar calor.

Tomando como principio un balance de cargas, donde el calor total o potencia total es igual a la suma entre el necesario o útil para alcanzar las temperaturas extremas deseadas y el perdido a través de las paredes del contenedor en dicho momento. Se busca así un diseño que alcance fácilmente cualquier valor dentro del rango de funcionamiento del banco.

$$Pot_{total} = Pot_{util} + Pot_{loss}$$

Antes de iniciar el análisis, es útil establecer algunos de los datos obtenidos con el objetivo de una mejor comprensión. La siguiente tabla tiene dicho propósito.

Tabla 9. Propiedades y características del fluido de trabajo.

<b>Propiedades y características del volumen de fluido de trabajo</b>		
<b>Volumen [Vol]</b>	$= \left( \pi * \frac{\phi^2}{4} \right) * Altura [m^3]$	0,0162
<b>Densidad [<math>\rho</math>]</b>	$\left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$	1036
<b>Masa [masa]</b>	$= \rho * vol * 1000 [g]$	16782
<b>Calor específico [Cp]</b>	$\left[ \frac{J}{g * ^\circ K} \right]$	2,51
<b>Conductividad térmica [k]</b>	$\left[ \frac{W}{m * ^\circ K} \right]$	0,2061
<b>Viscosidad dinámica [<math>\eta</math>]</b>	$[Pa * s]$	0,0486
<b>Número de Prandtl [Pr]</b>	$= \frac{Cp * \eta}{k}$	0,5919

Donde  $\phi$  es el diámetro del contenedor en metros.

El análisis se puede desarrollar para unas condiciones de trabajo controladas, dado que este es uno de los requisitos previos a la calibración.

Tabla 10. Condiciones del ambiente de trabajo

<b>Condiciones ambientales</b>	
<b>Temperatura ambiente [<math>T_{amb}</math>]</b>	$[^\circ C]$ 20

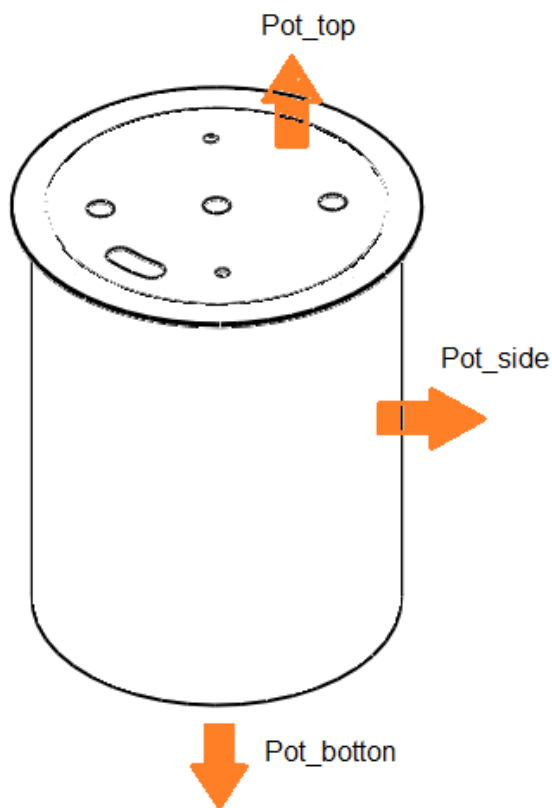
Para facilitar el proceso, las pérdidas a través del contenedor se dividen en tres principales. Las pérdidas a través de la tapa del contenedor, las pérdidas a través de la base del contenedor y las pérdidas a través de las paredes. De igual forma en el análisis no tendrán lugar los valores numéricos puesto que existen dos

fenómenos un calentamiento y un enfriamiento. Pero al final se podrá encontrar con los valores finales, que son de vital importancia para dimensionar los sistemas de transferencia de calor.

$$Pot_{loss} = Pot_{top} + Pot_{side} + Pot_{botton}$$

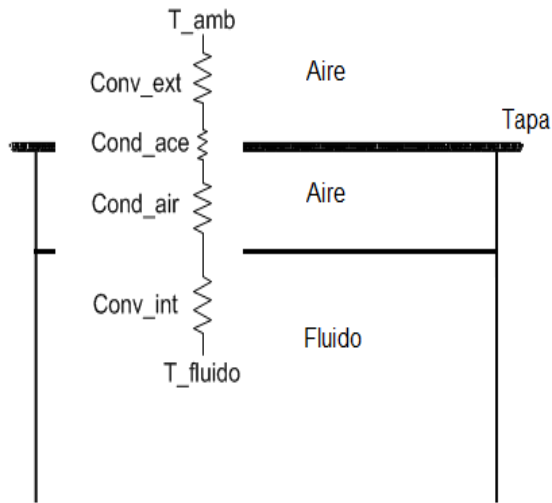
El siguiente grafico proporciona una mejor idea de lo anteriormente mencionado.

Figura 16. Perdidas de calor en el contenedor



Iniciando con las pérdidas de potencia a través de la parte superior del contenedor.

Figura 17. Transferencia de calor en la parte superior del contenedor.



En la ecuación general que rige este comportamiento pueden ser observados los distintos parámetros característicos de la situación; por ejemplo, la transferencia de calor a través del aire almacenado entre el fluido de trabajo y la cara inferior de la tapa puede ser considerada como conducción a través de un fluido. Esto facilita el análisis sin afectar significativamente los resultados.

$$Pot_{top} = \frac{T_{fluido} - T_{amb}}{R_{conv_{int}}(top) + R_{cond_{air}}(top) + R_{cond_{ace}}(top) + R_{conv_{ext}}(top)}$$

Donde cada una de las resistencias térmicas son analizadas a continuación.

$$R_{conv_{int}}(top) = \frac{1}{h_{int_{top}} * Area_{top}}$$

Dónde:

$$Area_{top} = \frac{\pi * \phi^2}{4} \rightarrow \text{Area de la cara superior del contenedor}$$

Dado que el fluido giratorio tiene un comportamiento con respecto al aire muy similar al encontrado en la transferencia de calor de una placa giratoria en

contacto con un fluido. Es posible usar ese modelo para determinar el coeficiente de calor interno de la cara superior.

$$Re_{int_{top}} = \frac{\omega * (0,125^2)}{\nu} \rightarrow \text{numero de Reynolds}$$

$$Nu_{int_{top}} = \frac{0,585 * Re_{int_{top}}^{0,5}}{\left(\frac{0,6}{Pr}\right) + \left(\frac{0,95}{Pr^{\frac{1}{3}}}\right)} \rightarrow \text{numero de Nusselt}$$

$$h_i = \frac{Nu_{int_{top}} * k}{L_c} \rightarrow \text{coef. de TC por conveccion}$$

$$L_c = \frac{Area_{top}}{Perimetro_{top}} \rightarrow \text{long. caracteristica}$$

Al reemplazar la longitud característica definida con anterioridad e integrar entre cero (0) y el radio del contenedor (0,125). Se obtiene la siguiente ecuación.

$$h_{int_{top}} = Nu_{int_{top}} * k * 4 * \pi \rightarrow \text{coef. de TC por conveccion}$$

Siendo k la conductividad térmica del fluido de trabajo.

El proceso para determinar la resistencia térmica presentada por el aire atrapado entre el fluido y la cara inferior de la tapa, es menos complejo. Su ecuación corresponde a un fenómeno de transferencia por conducción.

$$R_{con_{air}}(top) = \frac{e_{air}}{k_{air} * Area_{top}}$$

Dónde:

$$e_{air} = 0,02[m] \rightarrow \text{espacio entre el fluido y la cara posterior.}$$

$$k_{air} = 0,024 \left[ \frac{W}{m * K} \right] \rightarrow \text{conductividad termica del aire}$$

Para poder determinar la conducción de calor a través del acero, es necesario saber previamente las características y propiedades de este.

Tabla 11. Propiedades de los materiales presentes en la pared del contenedor

<b>Propiedades del aislante y del acero inoxidable</b>		
<b>Conductividad térmica del aislante</b> [ $k_{ais}$ ]	$\left[ \frac{W}{m * ^\circ K} \right]$	0,026
<b>Conductividad térmica del acero</b> [ $k_{ace}$ ]	$\left[ \frac{W}{m * ^\circ K} \right]$	16,5
<b>Espesor del aislante</b> [ $e_{ais}$ ]	[m]	0,01
<b>Espesor del acero</b> [ $e_{ace}$ ]	[m]	0,00152

Aunque en este caso no se tenga en cuenta el aislante. En el análisis de las paredes del contenedor y el fondo de este podemos encontrarlo.

$$R_{cond_{ace}}(top) = \frac{e_{ace}}{k_{ace} * Area_{top}}$$

Para finalizar las resistencias térmicas presentes en la transferencia de calor por la parte superior del contenedor. Se encuentra la convección natural entre la tapa de este y el medio ambiente.

$$R_{conv_{ext}}(top) = \frac{1}{h_{ext_{top}} * Area_{top}}$$

Donde.

$h_{ext_{top}} \rightarrow$  Coef. de TC por conveccion

$$Pr_{ext} = \left( \frac{\mu_{air} * cp_{air}}{k_{air}} \right) \rightarrow \text{numero de Prandtl}$$

La siguiente tabla presenta las propiedades del aire atmosférico necesarias para el análisis.

Tabla 12. Propiedades del aire atmosférico.

Propiedades del aire atmosférico	
Viscosidad dinámica ( $\mu_{air}$ )	$1,8072 * 10^{-5} [Pa * s]$
Viscosidad cinemática ( $\nu_{air}$ )	$1,457 * 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$
Calor específico ( $cp_{air}$ )	$1,007 \left[ \frac{J}{g * K} \right]$
Conductividad térmica ( $k_{air}$ )	$0,024 \left[ \frac{W}{m * K} \right]$

$$Gr_{ext_{top}} = \frac{\left( 9,81 * \left( \frac{1}{T_{amb} + 273} \right) * (T_{top} - T_{amb}) \right) * Lc_{ext_{top}}^3}{\nu_{air}^2} \rightarrow \text{numero de Grashof}$$

$$Ra_{ext_{top}} = Gr_{ext_{top}} * Pr_{ext} \rightarrow \text{numero de Rayleigh}$$

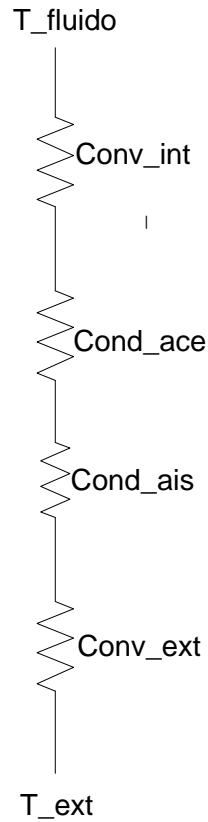
$$Nu_{ext_{top}} = 0,54 * Ra_{ext_{top}}^{\frac{1}{4}} \rightarrow \text{numero de Nusselt}$$

$$h_{ext_{top}} = Nu_{ext_{top}} * \frac{k_{air}}{Lc_{ext_{top}}} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] \rightarrow \text{coef de TC por conveccion}$$

Con esto se puede culminar y determinar la magnitud de la potencia perdida a través de la parte superior del contenedor.

Ahora es necesario analizar la base de este y luego finalizar con los lados.

Figura 18. Resistencias térmicas de la base del contenedor



De la misma forma como se definió previamente la transferencia de calor por la parte superior, es necesario ahora definirla por el fondo o parte inferior del contenedor. Iniciando con la determinación de la ecuación general.

$$Pot_{botton} = \frac{T_{fluido} - T_{amb}}{R_{conv_{int}}(botton) + R_{cond_{ace}}(botton) + R_{cond_{ais}}(botton) + R_{conv_{ext}}(botton)}$$

Se usa la comparación previamente definida, en la cual se estipula que la capa de fluido actúa como una placa giratoria en contacto con otro material (en este caso el acero). Podemos decir que el coeficiente de transferencia de calor por convección interno de la parte posterior posee la misma magnitud que su análogo en la parte superior del volumen de fluido.

$$h_{int_{botton}} = h_{int_{top}}$$

La resistencia a la transferencia de calor ofrecida por el fondo del contenedor. Es muy similar a la encontrada en la tapa. Tanto en la definición de la ecuación como en su magnitud.

$$R_{cond_{ace}}(botton) = R_{cond_{ace}}(top)$$

El aislante ofrece una gran resistencia al flujo de calor o potencia perdida. La ecuación necesaria para su definición es encontrada a continuación:

$$R_{cond_{ais}}(botton) = \frac{e_{ace}}{k_{ace} * Area_{botton}}$$

Donde.

$$Area_{botton} = Area_{top}$$

Finalizando con el análisis que busca definir el coeficiente de calor por convección exterior en la parte inferior del contenedor.

$$R_{conv_{ext}}(botton) = \frac{1}{h_{ext_{botton}} * Area_{botton}}$$

$$Lc_{ext_{botton}} = Lc_{ext_{top}}$$

$$Gr_{ext_{top}} = \frac{\left(9,81 * \left(\frac{1}{T_{amb} + 273}\right) * (T_{top} - T_{amb})\right) * Lc_{ext_{top}}^3}{v_{air}^2} \rightarrow \text{numero de Grashof}$$

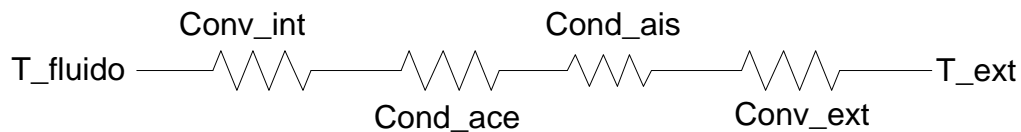
$$Ra_{ext_{top}} = Gr_{ext_{top}} * Pr_{ext} \rightarrow \text{numero de Rayleigh}$$

$$Nu_{ext_{top}} = 0,27 * Ra_{ext_{top}}^{\frac{1}{4}} \rightarrow \text{numero de Nusselt}$$

$$h_{ext_{top}} = Nu_{ext_{top}} * \frac{k_{air}}{Lc_{ext_{top}}} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] \rightarrow \text{coef de TC por conveccion}$$

Por último, es necesario tratar el calor perdido a través de las paredes laterales del contenedor.

Figura 19. Resistencias térmicas en las paredes del contenedor



La ecuación que rige este fenómeno es la siguiente.

$$Pot_{side} = \frac{T_{fluido} - T_{Amb}}{R_{conv_{int}}(side) + R_{cond_{ace}}(side) + R_{cond_{ais}}(side) + R_{conv_{ext}}(side)}$$

Se inicia con la resistencia térmica ofrecida por el fluido de trabajo, para esto es necesario determinar el coeficiente de convección interno.

$$R_{conv_{int}}(side) = \frac{1}{h_{int_{side}} * Area_{side}}$$

Donde.

$$Area_{side} = \pi * \phi * h [m^2]$$

$h = 0,33[m] \rightarrow$  altura de la pared del contenedor

$$Re_{int_{side}} = \frac{\omega * \phi^2}{4 * \nu} \rightarrow \text{numero de Reynolds}$$

$$Lc_{int_{side}} = \frac{\pi * \phi}{2} \rightarrow \text{longitud característica}$$

$$Nu_{int_{side}} = Re_{int_{side}}^{0,5} * Pr^{\frac{1}{3}} * 0,664 \rightarrow \text{numero de Nusselt}$$

$$h_{int_{side}} = \frac{Nu_{int_{side}} * k}{Lc_{int_{side}}}$$

Siendo.

$k \rightarrow$  conductividad del fluido de trabajo

Luego se determinan las resistencias térmicas ofrecidas por la pared de acero inoxidable y el aislante que la cubre.

$$R_{cond_{ace}}(side) = \frac{\ln\left(\frac{\frac{\phi}{2} + e_{ace}}{\frac{\phi}{2}}\right)}{2 * \pi * k_{ace} * h}$$

$$R_{cond_{ais}}(side) = \frac{\ln\left(\frac{\frac{\phi}{2} + e_{ace} + e_{ais}}{\frac{\phi}{2} + e_{ace}}\right)}{2 * \pi * k_{ais} * h}$$

Como último paso se analiza la resistencia térmica propia de la convección natural en el exterior del contenedor.

$$R_{ext}(side) = \frac{1}{2 * \pi * \left(\frac{\phi}{2} + e_{ace} + e_{ais}\right) * h * h_{ext\_side}}$$

$$Gr_{ext\_side} = \frac{\left(9,81 * \left(\frac{1}{T_{amb} + 273}\right) * (T_{side} - T_{amb})\right) * Lc_{ext\_side}^3}{v_{air}^2} \rightarrow \text{numero de Grashof}$$

$$Ra_{ext\_side} = Gr_{ext\_side} * Pr_{ext} \rightarrow \text{numero de Rayleigh}$$

$$Nu_{ext\_side} = \left(0,825 + \frac{0,387 * Ra_{ext\_side}^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr_{ext}}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2 \rightarrow \text{numero de Nusselt}$$

$$h_{ext\_side} = \frac{Nu_{ext\_side} * k_{air}}{Lc_{ext\_side}} \rightarrow \text{coef. de TC por conveccion exterior}$$

Ahora es necesario determinar las magnitudes de potencia útil, tanto para el caso de calentamiento como para el caso de refrigeración. Para esto es necesario asumir los tiempos teóricos para alcanzar las temperaturas extremas en ambos casos, tomándose estos de 15 minutos y 10 minutos respectivamente.

$$Pot_{util} = masa * Cp \left(\frac{70^\circ - T_{amb}}{15 \text{ min} * 60 \frac{seg}{min}}\right) \rightarrow 2340,2 \text{ Watts}$$

$$Pot_{util} = masa * Cp \left( \frac{T_{amb} - 5^{\circ}}{10 \text{ min} * 60 \frac{\text{seg}}{\text{min}}} \right) \rightarrow 1053,06 \text{ Watts}$$

Definido esto es necesario realizar el análisis numérico con el fin de determinar las pérdidas totales y la potencia total necesaria para que los sistemas funcionen de la mejor manera.

Tabla 13. Capacidades de los subsistemas de intercambio de calor.

Potencias	Calentamiento	Enfriamiento
<i>Pot<sub>top</sub></i>	1,4 [watts]	0,3611 [watts]
<i>Pot<sub>botton</sub></i>	1,208 [watts]	0,285 [watts]
<i>Pot<sub>side</sub></i>	2,257 [watts]	0,5358 [watts]
<i>Pot<sub>loss</sub></i>	4,864 [watts]	1,182 [watts]
<i>Pot<sub>util</sub></i>	2340 [watts]	1053 [watts]
<i>Pot<sub>total</sub>(teorica)</i>	2345 [watts]	1054 [watts]
<i>Pot<sub>total</sub>(real)</i>	2500 [watts]	

## 7.2 SUBSISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN

**7.2.1 Selección del refrigerante.** Un buen refrigerante es aquel que tenga unas características físicas y termodinámicas acordes a nuestros requerimientos. Sin dejar de un lado el costo, la disposición en el mercado y los materiales de los componentes que entran en contacto con él.

Quizás las significativas de sus propiedades son; la temperatura crítica, esta debe estar por encima de la temperatura de condensación y la temperatura de congelación, que debe estar por debajo de la temperatura del evaporador a las

presiones respectivas. De igual manera el calor latente de evaporación debe ser elevado. Ahora entre sus propiedades físicas se deben resaltar; no inflamable ni toxico al contacto humano y miscible con el lubricante del compresor.

Después de tomar como base lo mencionado. El refrigerante R134a es el seleccionado para ser utilizado en el banco metrológico. Gracias a su buen comportamiento bajo las situaciones a presentarse y su fácil adquisición en el mercado.

La unidad condensadora seleccionada previamente se encuentra precargada, por tal motivo la compra de más refrigerante no es necesaria. Sin embargo el precio en el mercado de una libra de refrigerante es de 15,000 pesos dado el caso que se requiera un recambio o una realimentación del sistema.

**7.2.2 Selección de la unidad condensadora.** Conociendo los requerimientos del sistema y las especificaciones de funcionamiento, se selecciona la unidad condensadora adecuada.

Tabla 14. Requerimientos operacionales de la unidad condensadora.

<b>ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Potencia de enfriamiento requerida</b>	3700 BTU/h
<b>Tipo de refrigerante</b>	R134a
<b>Temperatura del fluido de trabajo</b>	5°C
<b>Temperatura del evaporador</b>	-5°C

Con base en la tabla anterior, se selecciona mediante la ayuda de un catálogo virtual, la unidad condensadora Tecumseh de referencia CAJ/TAJ4492YHR.

Figura 20. Unidad condensadora Tecumseh CAJ/TAJ4492YHR.



Fuente. TECUMSEH. Unidades condensadoras [online]. Ann Arbor (Michigan): 2013. [Citado 24 de Ago. de 2103]. Disponible en internet: <<http://www.tecumseh.com/es>>

Tabla 15. Especificaciones de la unidad seleccionada

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO	VALOR
<b>Fabricante</b>	Tecumseh
<b>Referencia</b>	CAJ/TAJ4492YHR
<b>Potencia nominal de funcionamiento</b>	3/4 HP
<b>Potencia de enfriamiento máxima *</b>	4940,76 BTU/h
<b>Refrigerante</b>	R134a
<b>Precargada</b>	SI
<b>Dimensiones</b>	650x500x460 mm
<b>Voltaje de alimentación</b>	110V – 60Hz
<b>Disponibilidad</b>	Inmediata
<b>Costo</b>	1'210.750

\*Medida a -5° en el evaporador

Fuente. Catálogo general 2013, compresores y unidades de condensación. TECUMSEH.

**7.2.3 Selección del elemento expansor.** Dado los requerimientos de capacidad de enfriamiento (3700 BTU/h), las presiones ( $P_{cond} = 128 [psi]$  y  $P_{evap} = 35,32 [psi]$ ) y temperaturas alcanzadas ( $T_{cond} = 35 [^{\circ}C]$  y  $T_{evap} = -5 [^{\circ}C]$ ), el subsistema de refrigeración pertenece a un rango de capacidad de enfriamiento bajo. Podemos usar un tubo capilar para generar la caída de presión en el refrigerante.

Existen muchos tipos de capilar, y Tecumseh proporciona un catálogo para poder seleccionar el adecuado de acuerdo a la potencia de la unidad condensadora (3/4 hp), siendo el seleccionado un tubo de 0,05 [in] de diámetro interior y 1,5 [m] de longitud. Con un precio aproximado de 5,000 pesos/metro.

Figura 21. Tubo capilar convencional.



Fuente. FAVRE. Tubos capilares [online]. Bilbao (España): 2009. [Citado 26 de Ago. de 2013]. Disponible en internet: < <http://www.favresl.com/index.html> >

**7.2.4 Diseño del evaporador.** Retirar calor del fluido de trabajo es un proceso complejo y delicado, y su funcionamiento depende de los elementos que componen el subsistema, de igual manera su capacidad, dado que esa está limitada por la capacidad máxima de los elementos individualmente.

Con esto en mente es necesario hallar la longitud necesaria y forma del evaporador, que se adapten de la mejor manera a los criterios geométricos y operacionales del banco. Seleccionada previamente la sección transversal de este y su material (Tubo de acero AISI 304 de ¼").

Este análisis se puede definir como un caso donde la transferencia de calor y la termodinámica tienen su parte.

La página web del fabricante de la unidad condensadora proporciona información geométrica y funcional que es necesaria. Tales como; las revoluciones y capacidad volumétrica del compresor. Partiendo de esto y de que existe una conservación de la masa del refrigerante en el sistema, es posible trasladar el análisis desde el compresor hasta la entrada al evaporador.

Dada la naturaleza de algunas ecuaciones, es preferible trabajar inicialmente en el sistema inglés y luego finalizar en el internacional.

Hallando en primera medida el flujo de refrigerante.

$$\dot{m} \left[ \frac{Lb}{s} \right] = \rho_{vapor} * Vol_{cilindro} * \eta_{vol} * \frac{RPM}{60} \rightarrow \text{flujo masico}$$

Dónde:

$$\rho_{vapor} = 0,0004363 \left[ \frac{Lb}{in^3} \right] \rightarrow \text{densidad del vapor a } -5^{\circ}C$$

$$Vol_{cilindro} = 1,581 [in^3] \rightarrow \text{Volumen del cilindro del compresor}$$

$$RPM = 3600 \rightarrow \text{Revoluciones por minuto del motor del compresor}$$

$$\eta_{vol} = 1 - \left( 0,008 * \left( \frac{P_d}{P_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \rightarrow \text{Factor total}$$

Este factor corrige efectos como las perdidas y la diferencia entre la densidad real del vapor dentro del compresor y la tomada para el análisis. Sus componentes corresponden a:

$$P_d = 96,57 \text{ [psi]} \rightarrow \text{Presion de descarga}$$

$$P_e = 35,32 \text{ [psi]} \rightarrow \text{Presion de evaporador}$$

$$n = \frac{C_p}{C_v} \rightarrow \text{Constante de gas (proceso politropico)}$$

Obteniendo de esta manera un flujo másico invariable y por lo tanto es posible trasladar el análisis al punto luego del elemento expensor. Tomando las condiciones de este punto es posible calcular una longitud del evaporador aproximada.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_{liq}} \left[ \frac{in^3}{s} \right] \rightarrow \text{Flujo volumetrico de refrigerante}$$

En este punto, es necesario hacer el cambio al sistema internacional, desde el sistema inglés.

$$\dot{V} = 0,00001454 \text{ [m}^3\text{]} \rightarrow \text{Flujo volumetrico de refrigerante}$$

Ahora es necesario tener en cuenta las dimensiones de la sección transversal y las propiedades térmicas del tubo previamente determinado. Correspondiente a un

tubo de acero AISI 304 de ¼". Sin embargo para continuar con el sistema de unidades internacional, los valores se tomaran en metros.

$$\phi_{ext} = 0,006365[m] \rightarrow \text{Diametro exterior del tubo}$$

$$\phi_{int} = 0,0043 [m] \rightarrow \text{Diametro interior del tubo}$$

$$e = 0,001033 [m] \rightarrow \text{Espesor de la pared del tubo}$$

$$k_{tubo} = 16,5 \left[ \frac{W}{(m * K)} \right] \rightarrow \text{Coef. de conductividad termica del AISI 304}$$

Ya con esto definido, se define el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo encontrado dentro del tubo. Y así determinar el coeficiente de transferencia de calor interno, para dar lugar finalmente al cálculo de la longitud total del tubo.

$$vel = \frac{\dot{V}}{\left(\frac{\phi_{int}^2}{4}\right)} \left[ \frac{m}{s} \right] \rightarrow \text{Velocidad del refrigerante.}$$

$$Re = \frac{\rho_{liq} * vel * \phi_{int}}{\mu} \rightarrow \text{Numero de Reynolds}$$

Dónde:

$$\mu \rightarrow \text{Viscosidad dinamica del refrigerante}$$

Puesto que el número de Reynolds es mayor a 4000, se puede afirmar que el flujo es del tipo turbulento y el número de Nusselt es determinado mediante la siguiente expresión.

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,3} \rightarrow \text{Numero de Nusselt}$$

Dónde:

$$Pr = 3,7 \rightarrow \text{Numero de Prandtl}$$

Luego de obtener el valor del número de Nusselt solo resta calcular el coeficiente de transferencia interior.

$$h_{int} = \frac{Nu * k}{\phi_{int}} \left[ \frac{W}{(m^2 * K)} \right] \rightarrow \text{Coeficiente de transferencia por conveccion interno}$$

Dónde:

$$k = 0,09023 \left[ \frac{W}{m * k} \right] \rightarrow \text{Conductividad termica del refrigerante}$$

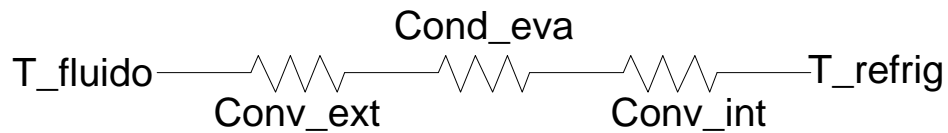
Determinado esto y con los datos obtenidos previamente correspondientes al calor total a retirar por la unidad condensadora y el coeficiente de transferencia por convección del fluido de trabajo.

$$Q = 1057 [W] \rightarrow \text{Calor a retirar por la unidad condensadora}$$

$$h_{ext} = 125,2 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] \rightarrow \text{Coef. de TC por conveccion del fluido de trabajo}$$

Para tener una mejor visión de la transferencia de calor entre el evaporador y el fluido. Es necesario el uso de la siguiente gráfica, que enseña el circuito de resistencias térmicas.

Figura. Resistencias térmicas en el evaporador



Fuente. Autor.

La siguiente ecuación de transferencia de calor expresa la transferencia de calor general, donde la única incógnita es la longitud del evaporador y mediante el paquete computacional EES® (Engineering Equation Solver) se soluciona.

Es necesario conocer que la tendencia de estos sistemas es que la diferencia de temperatura entre el fluido de trabajo y el refrigerante corresponda a 10°.

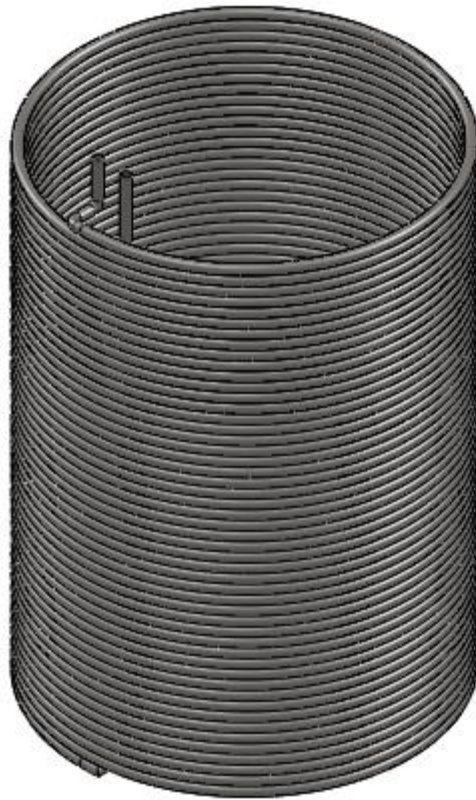
$$Q = \frac{\Delta T}{\left( \frac{1}{h_{int} * (\pi * \phi_{int} * L)} \right) + \left( \frac{\ln \left( \frac{\phi_{ext}}{\phi_{int}} \right)}{k_{tubo} * 2 * \pi * L} \right) + \left( \frac{1}{h_{ext} * (\pi * \phi_{ext} * L)} \right)}$$

Dónde:

$$L \cong 46,3 [m] \rightarrow \text{Longitud del evaporador}$$

Ya determinado este importante valor, es posible realizar un serpentín que se introduce en el contenedor del fluido de trabajo para que funcione como evaporador. Este elemento posee un valor de 110,000 pesos.

Figura 22. Evaporador.



Buscando una fácil manufactura y proceso de construcción es posible utilizar el mismo tipo de tubo usado en el evaporador en la tubería del sistema de refrigeración. Con la diferencia que es necesario comprar aislante circular para aislar correctamente esta y así evitar que haya un intercambio de calor con el ambiente no deseado. Para esta tubería es necesario 3 metros de tubo de aluminio de  $\frac{1}{4}$ " con un valor de 2000 pesos el metro.

### **7.3 SUBSISTEMA DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA ELÉCTRICA**

Basando los cálculos en las especificaciones mencionadas al finalizar la sección 5.1, obtenemos una potencia eléctrica de 2345 Watts para alcanzar una temperatura en el fluido de 70°C en un tiempo de 10 minutos.

Este método para proporcionar calor a un cuerpo o fluido, es muy utilizado en la industria. Consiste básicamente en hacer circular electricidad por un conductor, este gracias a su alta resistividad impide que el libre flujo de electrones haciéndolos perder energía, que es liberada en forma de calor hacia el entorno.

**7.3.1 Diseño de la resistencia eléctrica.** Los fabricantes de resistencias eléctricas proporcionan estas en muchas formas y tamaños, facilitando el diseño acorde a los requerimientos del equipo.

Buscando como objetivo una resistencia que pueda ser incorporada en el marco estructural sin mayores dificultades. La resistencia eléctrica diseñada posee una forma tubular de 300mm de longitud. Sin embargo lo más significativo de esta es su camisa protectora, que consiste en un tubo de 1" de acero AISI 304. Protegiéndola así de la corrosión producto del contacto con el propilenglicol.

Para mayor uniformidad se establece ubicar dos resistencias eléctricas, cada una con capacidad de 1250 watts con un precio individual de 50,000 pesos. Cumpliendo así con los requerimientos para alcanzar las temperaturas deseadas.

Los fabricantes de resistencias eléctricas proporcionan el producto terminado, de tal forma que no es necesaria la compra de ningún tipo de tubería inoxidable.

## 8. DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE CONTROL.

La automatización de un proceso es algo que se viene presentando desde mucho antes de la aparición de la era digital. Quizás no de la misma complejidad ni eficiencia, pero el ser humano ha realizado tareas con ayuda de diferentes objetos como correas y palancas por mucho tiempo. Todo esto con los objetivos de obtener un mayor aprovechamiento de la energía, perfeccionamiento del proceso, seguridad de los operarios, etc.

Es por ello que la implementación de un control retroalimentado es necesaria, dado que se necesita de un perfecto control sobre la temperatura del fluido sin demandar grandes cantidades de energía.

### 8.1 SELECCIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

Para desarrollar el diseño es necesario tener unos parámetros de operación previamente determinados; tensión de la red (110VCA), frecuencia (60Hz).

**8.1.1 Selección del controlador.** Conocido como el cerebro del banco metrológico por su función. Debe cumplir unos requisitos que caracterizan este proyecto. Algunos de los más importantes son:

- ✓ Controlador PID para el calentamiento por resistencia eléctrica y ON-OFF para la refrigeración por compresión.
  
- ✓ Entrada para RTD (Detector de Temperatura Resistivo) de tres líneas.

Por esto se seleccionó un controlador OMROM E5CN-H que además de cumplir con las especificaciones mencionadas tiene también dos alarmas tipo relé, una salida tipo relé y conexión USB para toma de datos.

Este elemento posee un valor aproximado de 750.000 pesos. Además de ellos posee una interfaz humano-máquina que facilita su funcionamiento.

Figura 23. Controlador OMROM E5CN-H de uso general.



Fuente. OMROM INDUSTRIAL AUTOMATION. General Purpose Controller OMROM E5CN-H. Kyoto (Japan): 2007. [Citado 10 de Ene. de 2014]. Disponible en internet: < <http://www.ia.omron.com/> >

Su programación aunque sencilla, es mas fácil siguiendo los pasos expresados en su manual (disponible en el link de la anterior imagen y necesario para su programación). Cabe resaltar que la propiedad de Auto-tuning calcula las constantes de un control PID de forma automática.

**8.1.2 Selección del sensor.** Un buen funcionamiento bajo todo el rango y fácil implementación en la estructura del banco, son quizás las características adicionales que ubican al RTD de la familia PT como la mejor opción. Puesto que son generalmente mas lineales, estables, y precisos. Por tal razón son utilizados constantemente en aplicaciones de metrología.

Se conocen tres tipos principalmente PT100, PT500 y PT1000. Los números que acompañan la familia, indican que a 0° C tienen una resistencia de 100, 500 y 1000  $\Omega$  respectivamente.

Las RTD PT500 Y PT1000 poseen gracias a su fabricación una leve ventaja en la sensibilidad frente a la PT100, pero desafortunadamente las primeras no son muy comunes en el mercado y las otras no permiten su aplicación a sistemas con controladores de otros fabricantes.

Definido este parámetro y con la ayuda de la guía de selección de la empresa OMEGA, donde es necesario tener unos criterios de selección tales como:

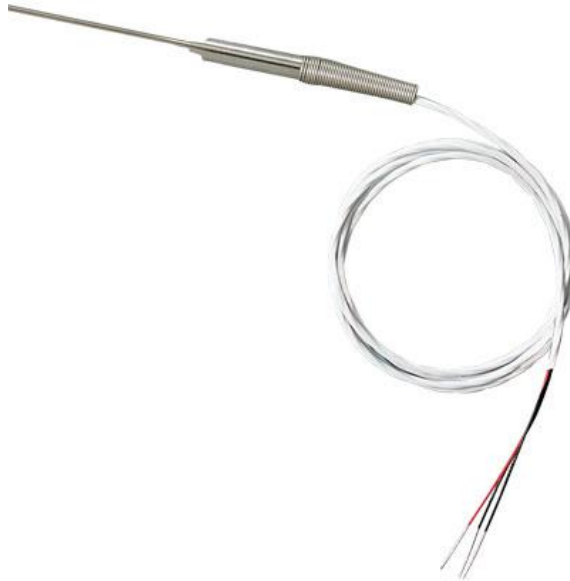
- ✓ Número de hilos de conexión.
- ✓ Aplicaciones generales.
- ✓ Tipo de sensor (inmersión, contacto, etc).
- ✓ Forma del sensor.

Con base esto, las opciones viables se ven reducidas. Puesto que el sensor seleccionado debe poseer un cuerpo alargado y de tipo inmersión para poder introducirlo en el fluido de trabajo. De igual forma es recomendable usar uno de tres hilos ya que la mayoría de controladores poseen facilidad de conexión para estos.

De forma específica un RTD PT100, marca OMEGA, serie PRTF-10,-11, de tres (3) líneas; es el seleccionado para ser usado en este banco, ya que poseen la

capacidad de percibir cambios de 0,1°C en rangos entre -100°C ~200°C. con un precio de 70,000 pesos.

Figura 24. RTD OMEGA tipo PT100



Fuente. OMEGA. RTD tipo PT100 [online]. Stamford: 2003. [Citado 8 de Oct. de 2013]. Disponible en internet: < <http://www.omega.com/>>.

**8.1.3 Selección de los elementos de estado sólido.** Funcionan principalmente como pre actuadores y son fundamentales a la hora de agregar o retirar calor, pues estos son los que permiten a los subsistemas encargados de esto encontrarse encendidos o apagados. De forma general se han de seleccionar relés de estado sólido. Pero diferentes según su propósito.

**8.1.3.1 Relé de estado sólido como pre actuador del subsistema de refrigeración por compresión.** Para su dimensionamiento es necesario tener en cuenta el consumo de la unidad condensadora, calculado a continuación:

$$Pot = \frac{3}{4} [hp] \rightarrow 559,27 [Watts] \rightarrow potencia\ unidad\ condensadora$$

$$V = 110 \text{ [volts]} \rightarrow \text{voltaje de funcionamiento}$$

$$I = \frac{pot}{V} \text{ [Amp]} \rightarrow \left( \frac{559,27}{120} \right) \cong 4,66 \text{ [Amp]} \rightarrow \text{intensidad en la linea del compresor}$$

Pero en el mercado este rango no es encontrado, por lo tanto se seleccionan dos relés de 20 Amperios que se instalan en serie en la línea de alimentación de energía eléctrica del compresor, garantizando el funcionamiento ON-OFF.

Para este propósito se pueden usar relés marca Schneider, referencia SSRDP8S20A1. Con un costo aproximado de 75.000 pesos cada uno.

**8.1.3.2 Relé de estado sólido como pre actuador del subsistema de calentamiento por resistencia eléctrica.** De igual es necesario un análisis matemático para dimensionar la capacidad del relé a utilizar para realizar el control PID.

$$pot = 2500 \text{ [Watts]} \rightarrow \text{potencia de la resistencia electrica}$$

$$V = 110 \text{ [Volts]} \rightarrow \text{voltaje de la linea}$$

$$I = \frac{pot}{V} \text{ [Amp]} \rightarrow \frac{2500}{110} \cong 20,8 \text{ [Amp]} \rightarrow \text{intensidad en la linea de la resistencia}$$

Obteniendo así aproximadamente 21 Amperios como corriente de funcionamiento, pero en el mercado este rango no es encontrado, por lo tanto se selecciona un relé de 30 Amperios que se instala en la línea de alimentación de energía eléctrica de la resistencia, garantizando así el control PID.

Igualmente, la marca Schneider proporciona entre sus productos un relé que se adapta por completo a nuestros requerimientos. Su referencia es SSRDP8S30A1 y tiene capacidad para 30 Amperios. Posee un costo de 80.000 pesos.

En la web del fabricante es posible acceder a los manuales de usuario y documentación necesaria sobre estos elementos.

**8.1.4 Selección de los elementos de seguridad.** Aunque la probabilidad es baja, el banco debe estar protegido contra sobre tensiones y cortocircuitos. Para tal propósito se seleccionaron dos componentes específicamente.

**8.1.4.1 Fusible.** Generalmente las resistencias al aumentar su temperatura pierde capacidad resistiva. Causando con esto variaciones en la intensidad a través de esta, es necesario instalar un fusible como elemento protector, cuidando así la integridad de los demás elementos eléctricos del banco, especialmente el controlador.

Dado que el controlador tiene un tope máximo de sobresaltos de corriente de tres (3) Amperios, es necesario instalar un fusible por debajo de este rango; seleccionando de esta forma un fusible de 2,5 Amperios y así el fusible se dañaría antes de dañarse el controlador.

Este fusible tiene un precio aproximado de 5,000 pesos en el mercado regional.

**8.1.4.2 Disyuntores.** Es el primer componente entre la fuente de energía y todos los elementos eléctricos del banco, cuenta con dos propósitos principalmente. Proteger el banco contra cualquier cambio drástico en la tensión y como interruptor operacional del banco.

Su dimensionamiento depende de la intensidad total manejada en el banco, siendo esta y el producto con un factor de seguridad de 1,2.

$$I_{total} = (I_{unidad} + I_{resistencia} + I_{motor}) * Factor$$

Siendo la única faltante por calcular la corriente que pasa por el motor de agitación.

$$pot = \frac{2}{5} [hp] = 294,2 [Watts] \rightarrow potencia del motor$$

$$V = 120 [Volts] \rightarrow voltaje de la linea$$

$$I = \frac{294,2}{110} = 2,68 [Amp]$$

Definida esta intensidad eléctrica, podemos hallar la total del sistema.

$$I_{total} \cong (4,66 + 20,8 + 2,68) * 1,2 \cong 34 [Amp]$$

Con esta información, se selecciona un disyuntor común con capacidad para 40 Amperios con un costo de 35,000 pesos.

Dado que la capacidad del disyuntor previamente seleccionado es muy superior a la corriente que pasa por la unidad condensadora, es necesario usar otro de estos elementos junto a esta, previniendo así futuros daños al subsistema de refrigeración por compresión.

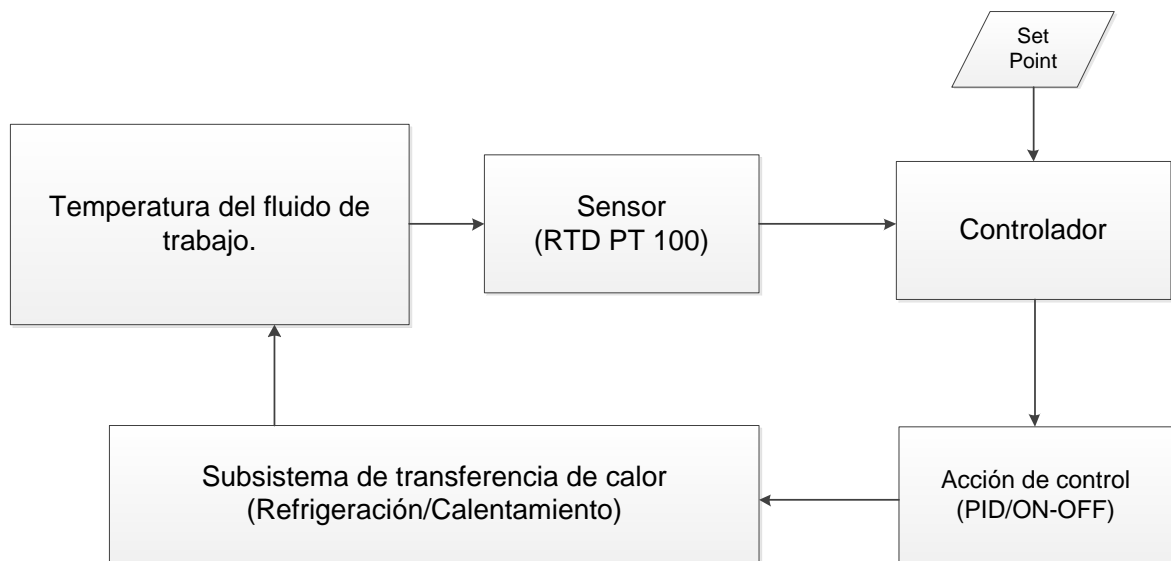
Por ello, se selecciona un disyuntor de cinco (5) Amperios, con un costo de 20,000 pesos.

## 8.2 DIAGRAMAS DEL SUBSISTEMA DE CONTROL

Es necesario el uso de diagramas que faciliten ya sea una mejor comprensión o incluso una futura implementación.

**8.2.1 Diagrama de control.** La esquematización del subsistema de control, proporciona una idea del correcto orden y secuencia de cada uno de sus elementos.

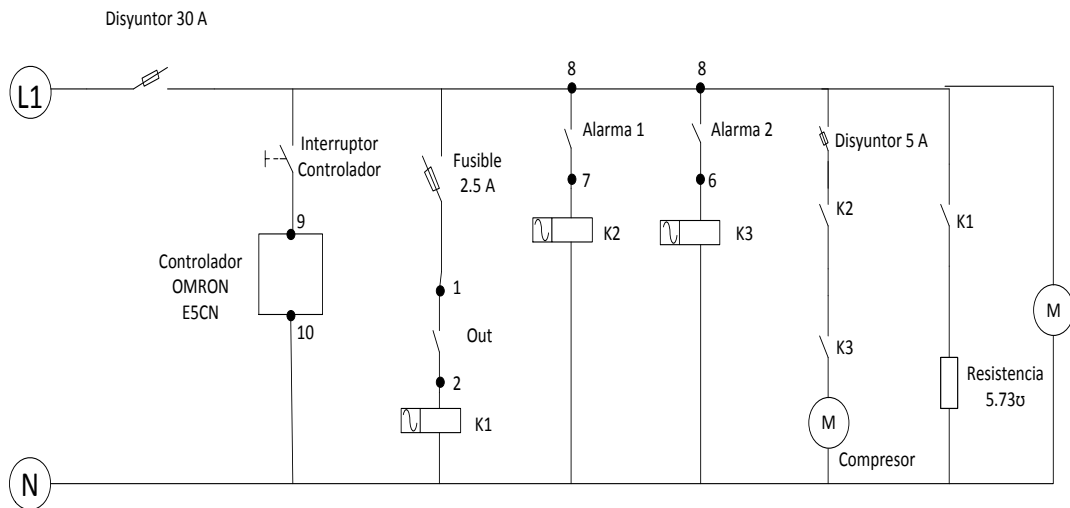
Figura 25. Diagrama del subsistema de control.



Hasta este punto el proceso de diseño del sistema de control ha tenido solo una ruta, sin embargo dada la diferencia funcional entre los subsistemas de transferencia de calor, es necesario diseñar un control PID para el calentamiento por resistencia eléctrica y un control ON-OFF para el enfriamiento por compresión. Siendo el primero tratado a continuación.

**6.2.2 Diagrama de potencia.** Después de seleccionar los componentes a utilizar, es necesario conocer donde tendrán lugar dentro del subsistema de control. Por ello el uso del siguiente diagrama es totalmente necesario.

Figura 26. Diagrama de potencia.

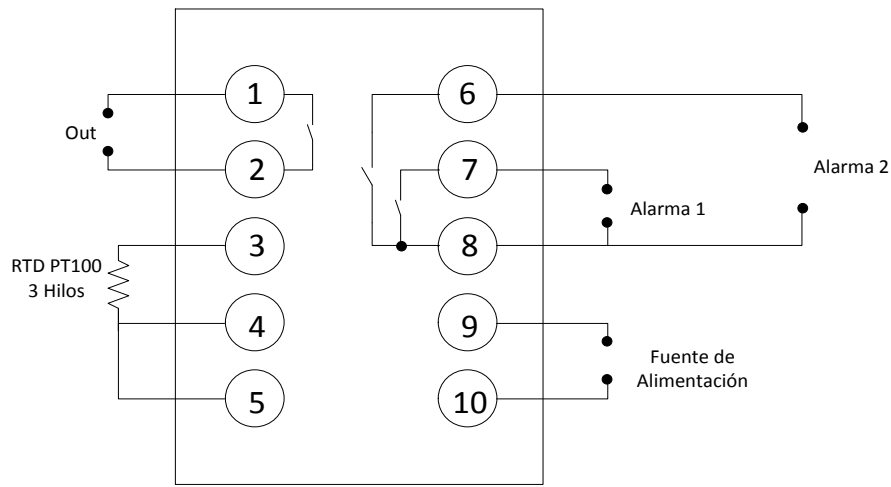


Donde la nomenclatura obedece al siguiente orden.

Tabla 16. Nomenclatura de elementos de control.

Elemento	Cantidad	Referencia	Nomenclatura
Disyuntor 30 A	1		Disyuntor 30 A
Disyuntor 5 A			Disyuntor 5 A
Relé de 30 A	2	SSRDP8S30A1 Schneider	K1
Relé de 20 A	1	SSRDP8S20A1 Schneider	K2,K3
Fusible 2.5 A	1		Fusible 2.5 A

Figura 27. Conexiones del controlador.



### 8.3 DISEÑO Y ANÁLISIS DEL CONTROLADOR

La definición de las constantes del controlador y su configuración están precedidas de pasos matemáticos y lógicos que a continuación tienen lugar.

**8.3.1 Análisis matemático.** Consiste en definir mediante expresiones aritméticas el comportamiento del sistema a controlar en función del tiempo.

✓ **Balance de energías.** Un balance de energías proporciona el comportamiento de la variación de la temperatura del fluido de trabajo, producto de la transferencia de calor de este con el entorno y con los subsistemas de transferencia de calor (Refrigeración por compresión y calentamiento por resistencia eléctrica).

$$Q_{total}(t) = m * C_p * \frac{dT(t)}{dt} + Q_{perdidas}(t)$$

$$Q_{perdidas}(t) = \frac{T(t) - T_o}{K_{top}} + \frac{T(t) - T_o}{K_{botton}} + \frac{T(t) - T_o}{K_{side}}$$

Donde,  $m$  es la masa del volumen de fluido de trabajo contenido,  $C_p$  es el calor específico del fluido de trabajo, los factores  $K_{top}$ ,  $K_{botton}$  y  $K_{side}$ , pertenecen a las pérdidas analizadas en la sección 5.1.

Después de obtener la expresión general, con todas sus constantes. Es necesario realizar una transformada de Laplace para seguir con un análisis de frecuencia, como primer paso hacia la realización del diseño.

✓ **Comportamiento en la frecuencia.** Ya definido el comportamiento de la variable a controlar en el tiempo es necesario saber su comportamiento en la frecuencia.

Esto es posible, mediante el método de la transformada de Laplace, que transforma los sistemas del rango del tiempo al rango de la frecuencia. Para así poder desarrollar una función de transferencia (\*).

$$Q_{total}(s) = m * C_p * s * T(s) + \frac{T(s)}{K_{top}} + \frac{T(s)}{K_{down}} + \frac{T(s)}{K_{side}}$$

$$G(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{1}{m * C_p * s + \frac{1}{K_{top}} + \frac{1}{K_{down}} + \frac{1}{K_{side}}}$$

---

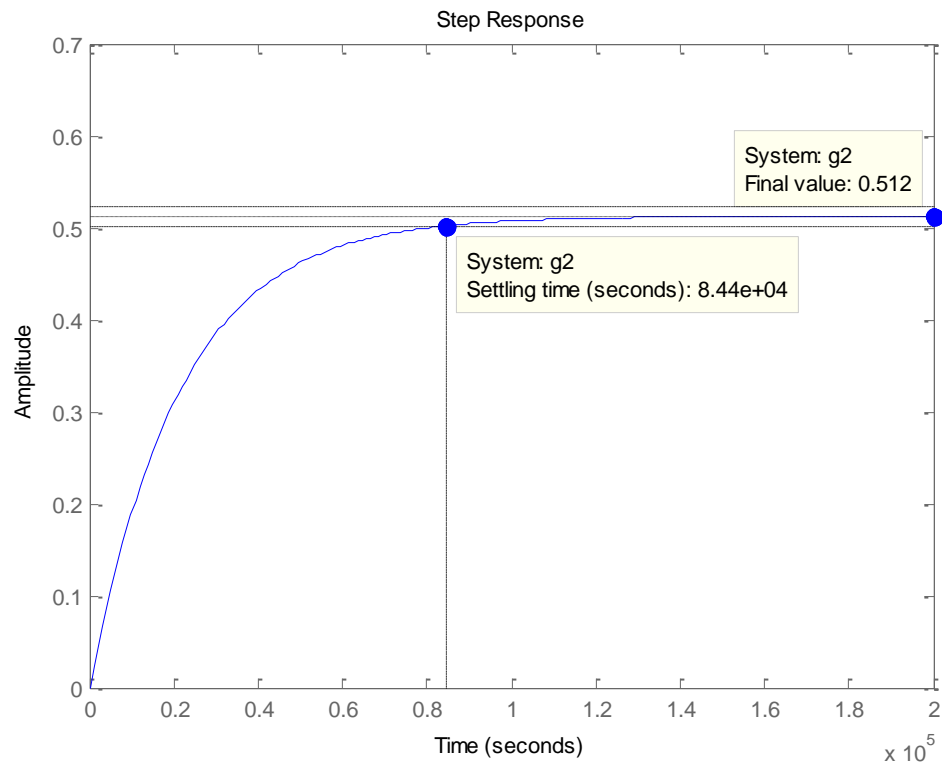
(\*) La función de transferencia indica la relación en función de la frecuencia entre la entrada y la salida del sistema (Potencia y temperatura respectivamente).

Reemplazando en esta los valores conocidos se obtiene.

$$G(s) = \frac{1}{42122.8 * s + 1.9523}$$

Ya con esta función de transferencia, se realiza el análisis en estado transitorio, esto con ayuda de la herramienta computacional MATLAB.

Figura 28. Respuesta transitoria de la función de transferencia.



Fuente. Autor.

En la anterior grafica se observa la respuesta transitoria del sistema ante una entrada escalón unitario (Dada en Watts). El sistema a lazo abierto presenta una

ganancia de 0.512 C y un tiempo de establecimiento de 8,44e04 segundos, equivalente a 23,4 horas.

Este comportamiento excede por mucho la flexibilidad presente en este tipo de proyectos, confirmando la necesidad de un sistema de lazo cerrado.

**8.3.2 Sistema de control.** Para la implementación del control de lazo cerrado, se decide utilizar un controlador de temperatura industrial. Además, para suministrar calor al sistema se incluirá una resistencia térmica alimentada a 120 V AC, y con una disipación de potencia equivalente a la generada eléctricamente.

**8.3.2.1. Subsistema de control PID para calentamiento por resistencia eléctrica.** Dentro de este sistema la acción de control estará dada por la activación periódica de un relé durante un tiempo  $\alpha$ . El periodo de activación es  $T_m$ . El controlador industrial nos permitirá variar el tiempo de activación, traducándose en una variación del voltaje efectivo aplicado a la resistencia.

La ecuación que describe el comportamiento del voltaje AC con una amplitud máxima de 170 Volts y una frecuencia de 60 Hz se muestra a continuación:

$$V(t) = 170 * \text{Sin}(377t)$$

Para el cálculo del voltaje efectivo se utilizan las siguientes expresiones:

$$\alpha(t) = \frac{u(t) * T_m}{100}$$

$$V_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_m} * \int_0^{\frac{u(t)*T_m}{100}} V(t)^2 dt}$$

$$V_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_m} * 14450 * \left[ \frac{u(t) * T_m}{100} - \frac{\text{Sin}(754 * \frac{u(t) * T_m}{100})}{754} \right]}$$

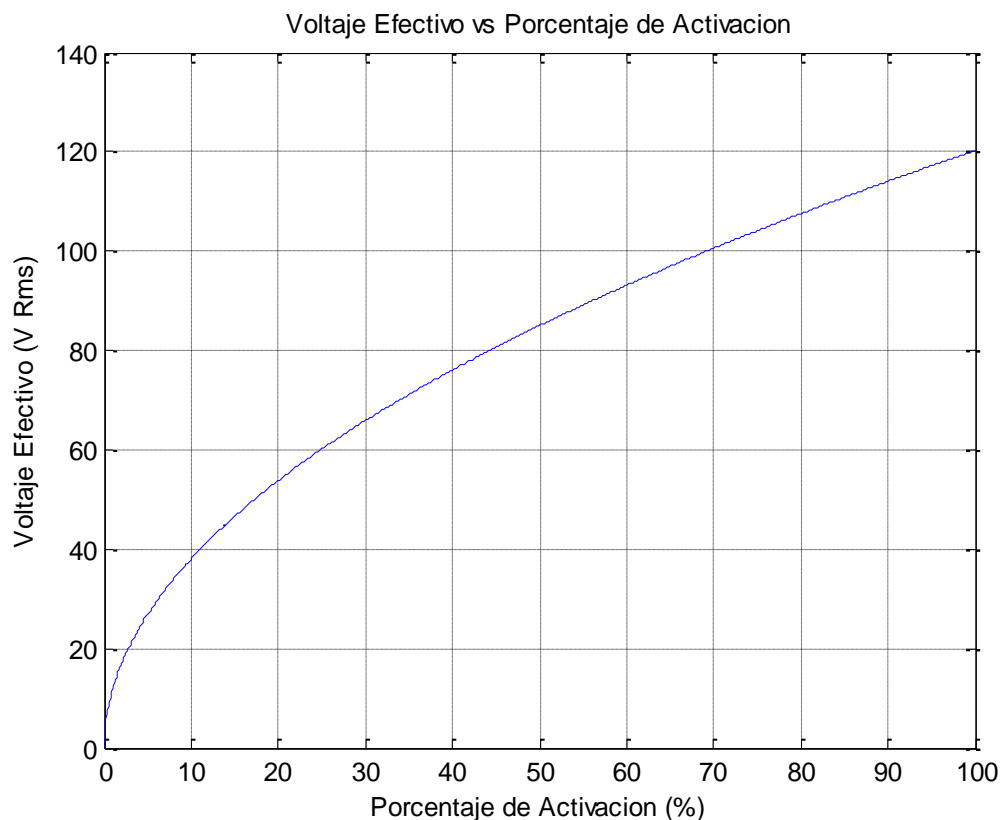
Donde  $u(t)$  es el porcentaje de activación con respecto al periodo  $T_m$ , tomado como 40 segundos.

El porcentaje de activación hace referencia a la cantidad de tiempo que el relé está activado. De tal manera que un porcentaje del 100% significa básicamente que el relé está activado 40 segundos y cuando este porcentaje sea del 0% el relé permanecerá abierto, impidiendo el paso de corriente hacia el actuador.

Con la anterior expresión matemática, se puede determinar el valor del voltaje efectivo para cada uno de los diferentes porcentajes de activación, comprendidos en un rango desde 0V-120V.

La siguiente gráfica presenta al análisis previamente mencionado, de esta manera es posible comprobar la veracidad del análisis.

Figura 29. Relación entre voltaje efectivo y porcentaje de activación.



Ya definido el voltaje efectivo, es posible determinar la potencia disipada por este a partir de la siguiente expresión.

$$P(t) = \frac{V_{rms}(t)^2}{R}$$

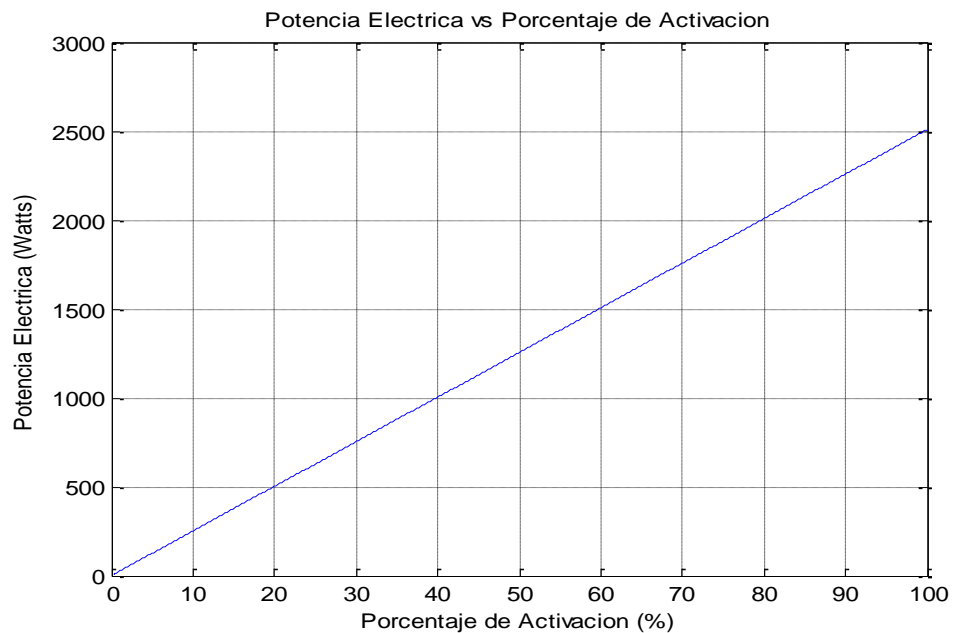
$$P(t) = \frac{\frac{1}{T_m} * 14450 * \left[ \frac{u(t) * T_m}{100} - \frac{\sin(754 * \frac{u(t) * T_m}{100})}{754} \right]}{R}$$

Dado que  $T_m=40$  s y  $R=5,76$  Ohms, determinados a partir del balance de energía, donde se halla la potencia necesaria para un caso ideal y de allí se despeja el valor de la resistencia:

$$P(t) = 62.717 * \left[ u(t) * 0.4 - \frac{\sin(301,6 * u(t))}{754} \right]$$

Definida la relación entre la potencia y el porcentaje de activación, se puede realizar una gráfica para su análisis.

Figura 30. Relación entre la potencia disipada y el porcentaje de activación.

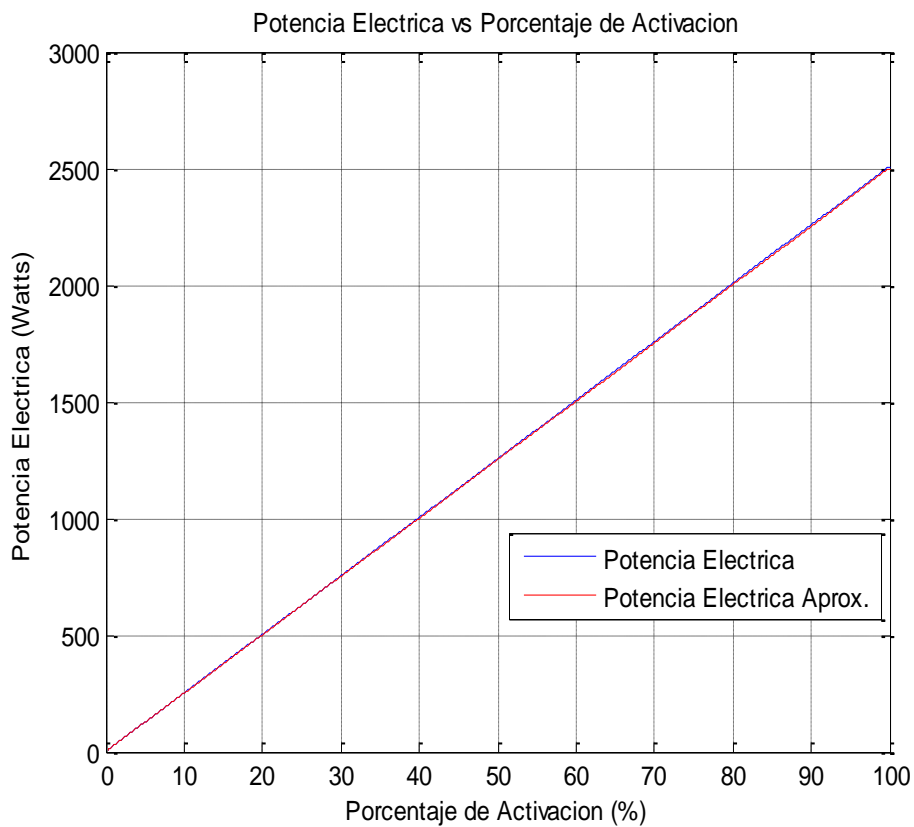


Al analizar el comportamiento de la potencia en la gráfica anterior, se observa una tendencia, que puede ser aproximada a una ecuación lineal que tenga una pendiente similar para simplificar las ecuaciones y finalmente el modelo matemático para el análisis en frecuencia.

$$P_{aprox}(t) = 25 * u(t)$$

La comprobación de esta expresión se realiza nuevamente mediante un gráfico. Donde se pueden observar las dos ecuaciones anteriores superpuestas y así determinar la validez de la aproximación.

Figura 31. Relación entre la potencia asumida y el porcentaje de activación.



Finalmente, para obtener el modelo total del sistema, incluyendo balance de masas y potencia eléctrica, se afirma lo siguiente que:

$$P_{aprox}(t) = Q_{total}(t)$$

$$P_{aprox}(s) = 25 * U(s) = m * Cp * s * T(s) + \frac{T(s)}{K_{top}} + \frac{T(s)}{K_{down}} + \frac{T(s)}{K_{side}}$$

$$G2(s) = \frac{T(s)}{U(s)} = \frac{25}{m * Cp * s + \frac{1}{K_{top}} + \frac{1}{K_{down}} + \frac{1}{K_{side}}}$$

$$G2(s) = \frac{25}{42122.8 * s + 1.9523}$$

Donde G2(s) es la nueva función de transferencia que describe la relación entre la entrada y salida del sistema, siendo estas el calor agregado o retirado y la temperatura del fluido de trabajo respectivamente (\*).

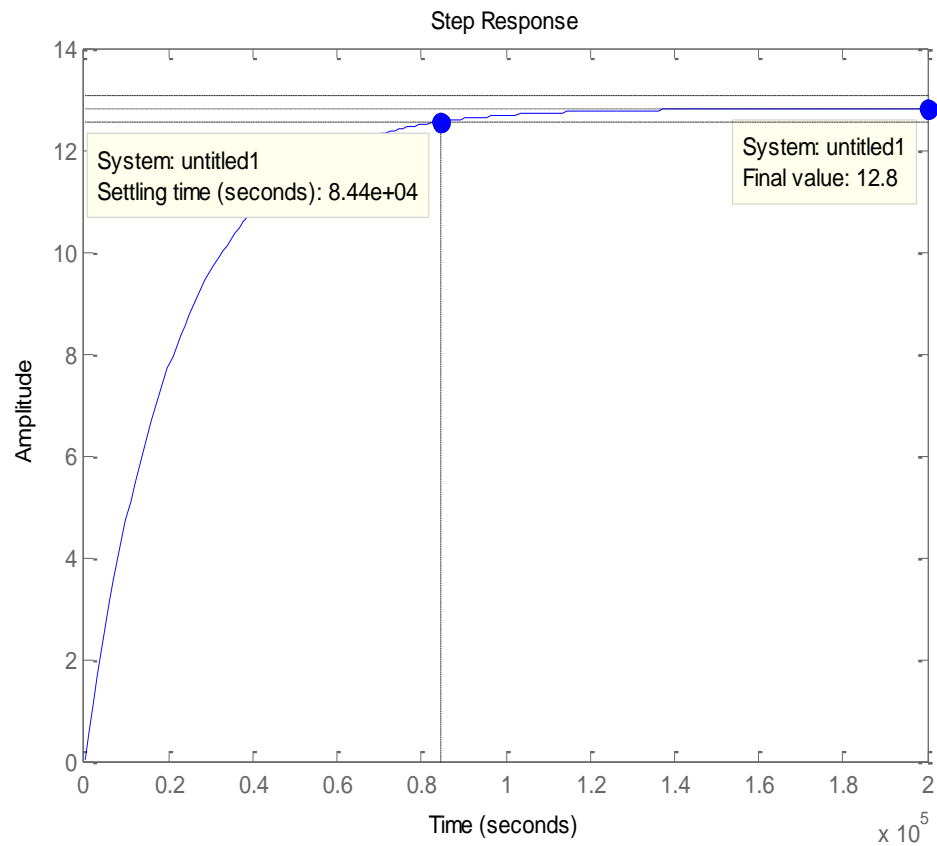
Con esta información es posible realizar un nuevo análisis de la respuesta en estado transitorio del sistema para la nueva función de transferencia, esto se hace con el fin de hallar valores de interés como el tiempo de establecimiento y la ganancia del sistema.

---

(\*) De igual forma los otros valores expresados anteriormente obedecen a magnitudes presentadas al inicio de este capítulo, por tal motivo no se enuncian nuevamente, solo reemplaza su valor en la ecuación y se simplifica.

Para facilitar el análisis y comprobación de la función de transferencia hallada, se grafica su comportamiento frente a una entrada de escalón unitario.

Figura 32. Análisis de la nueva función de transferencia con entrada de escalón unitario



El nuevo sistema a lazo abierto mantiene un tiempo de establecimiento de  $8,44e04$  segundos, equivalente a 23,4 horas. Además presenta una ganancia de 12,8 C.

Si hacemos la equivalencia de 1% de activación a potencia, obtenemos que es igual a 25 Watts. Utilizando el modelo anterior, con una ganancia de 0,512 al

multiplicarlo por la potencia, el resultado es 12,8 C. Con esto demostramos que la naturaleza del sistema no ha sido modificada con la inclusión de las ecuaciones eléctricas.

✓ **Diseño del controlador.** Para este diseño, se hace uso de la herramienta de sintonización de lazos en MatLab llamada *RLTOOL*. Inicialmente se realiza un Auto-Tuning para determinar la posición aproximada del cero del controlador. En la siguiente etapa se ajustan los valores encontrados, para cumplir con los requerimientos de diseño.

Arquitectura PID Clásica:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp * \left[ 1 + \frac{1}{Ti * s} + Td * s \right]$$

Donde E(s) es la diferencia entre el valor de referencia y la variable de proceso. Comúnmente conocida como el error del sistema y el objetivo es llevarla lo mas cercano a cero.

✓ **Resultados Auto-Tuning**

El compensador sintonizado (PI) (\*) presenta un tiempo de establecimiento alto, incluso mayor al tiempo en lazo abierto, pero garantizando alcanzar el punto de referencia (10 C para este caso). Sin embargo la respuesta transitoria presenta

---

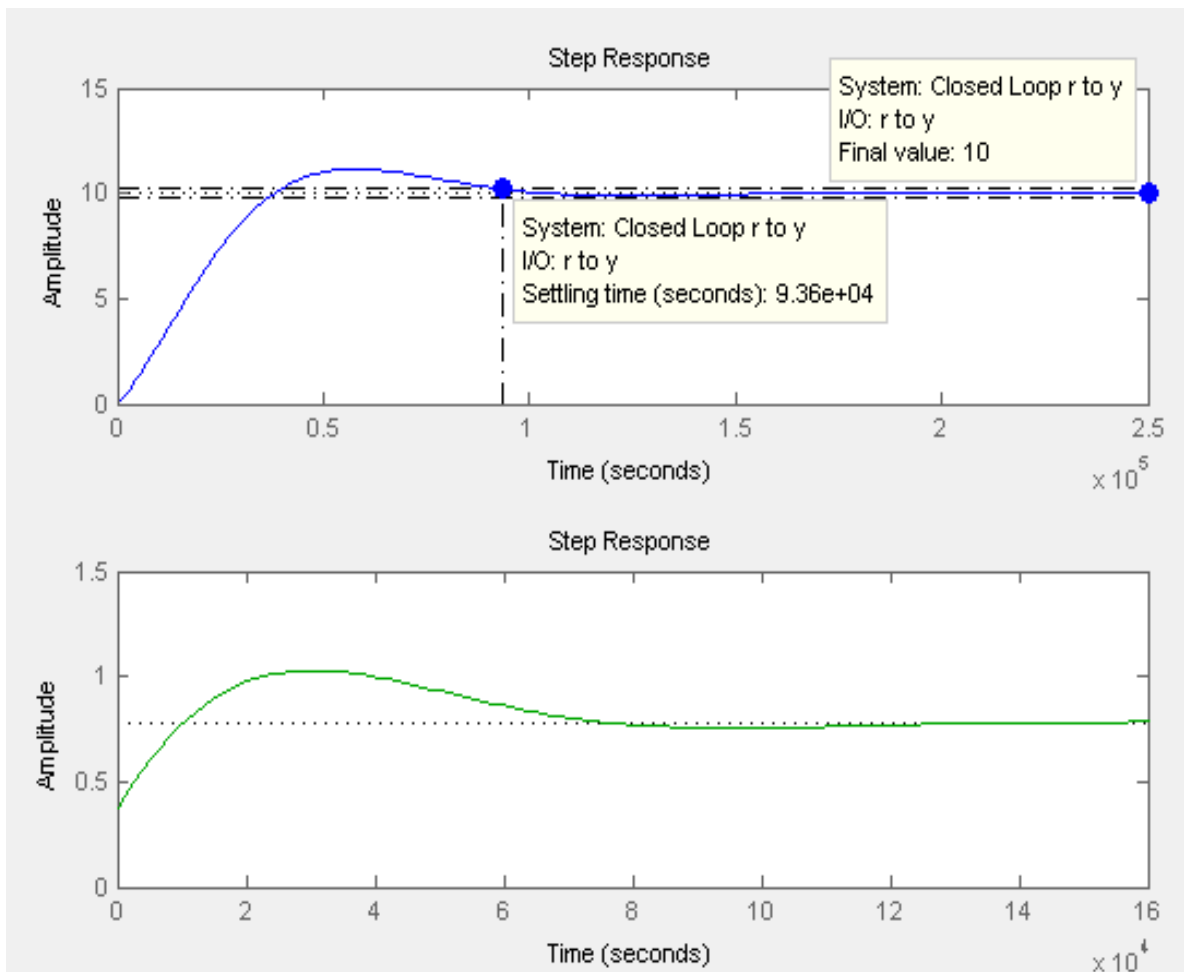
(\*) Gracias a la inercia que presentan generalmente los sistemas de control, es necesario optar por un sistema PI en lugar de un PID. Y así obtener un menor tiempo de establecimiento.

sobrepaso, situación no ideal para los sistemas de temperatura, debido a la inercia térmica presente en los mismos.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{0.036953 * (s + 0.000157)}{s}$$

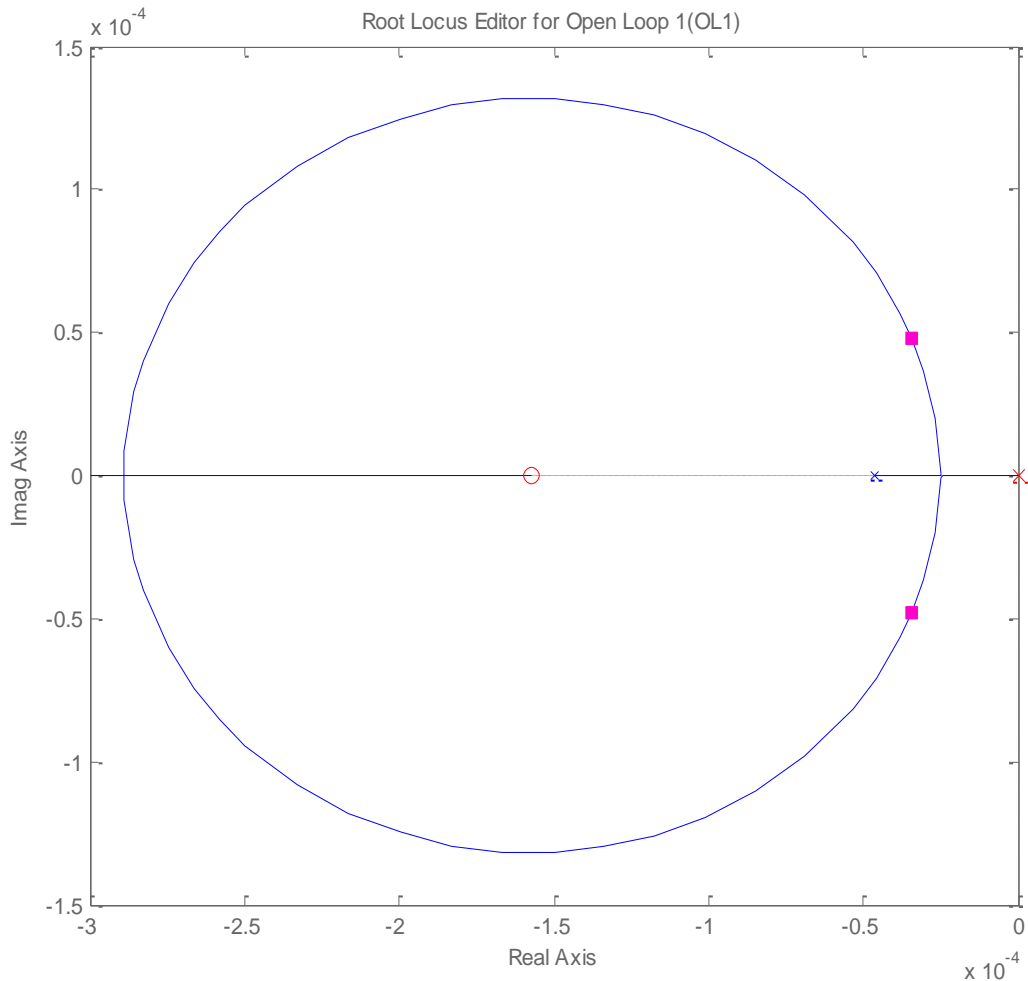
También se obtuvo una respuesta transitoria del sistema a lazo cerrado con el comando RTOOL del paquete de software MATLAB.

Figura 33. Respuesta transitoria de la variable del proceso y acción de control.



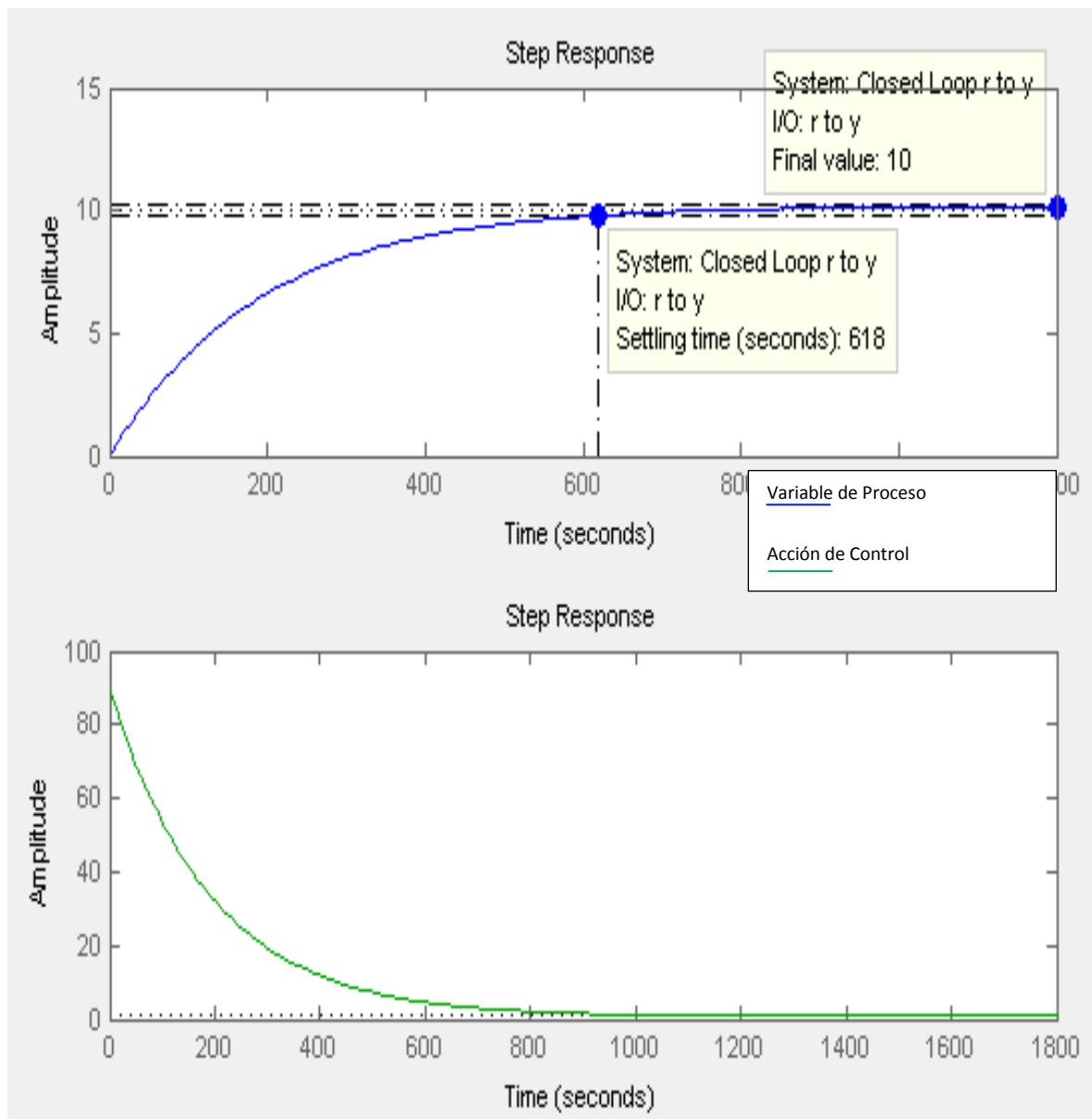
También es posible obtener el diagrama de polos y ceros del sistema en lazo cerrado.

Figura 34. Diagrama de polos y ceros en lazo cerrado.



✓ **Ajuste de las constantes.** Después se ajustó el valor de la ganancia con el fin de cumplir con el criterio de diseño de tiempo de establecimiento menor a 1000 segundos y que no existiera sobrepaso, manteniendo el cero determinado en el Auto-Tuning. Obteniendo así los siguientes resultados con el comando RTOOL.

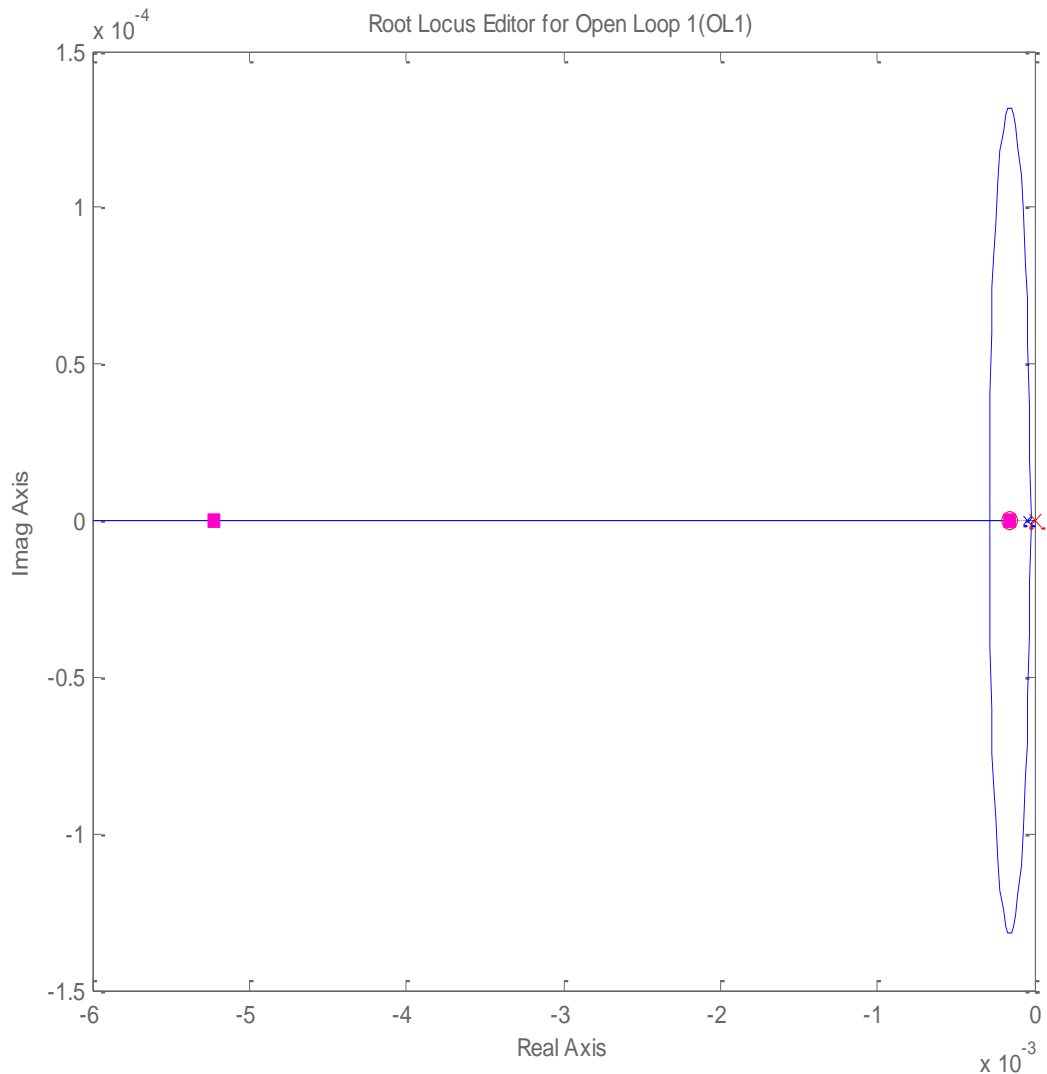
Figura 35. Respuesta transitoria modificada a la variable de proceso y acción de control.



Después de la modificación de las constantes es posible observar que el sistema tiende a no sobrepasar el límite impuesto 10 unidades por encima del valor inicial. Algo muy importante a la hora de obtener una estabilidad en menor tiempo.

De igual forma el diagrama de polos y cero sufrió modificaciones, que al continuación son visibles en la gráfica.

Figura 36. Diagrama de polos y ceros modificado.

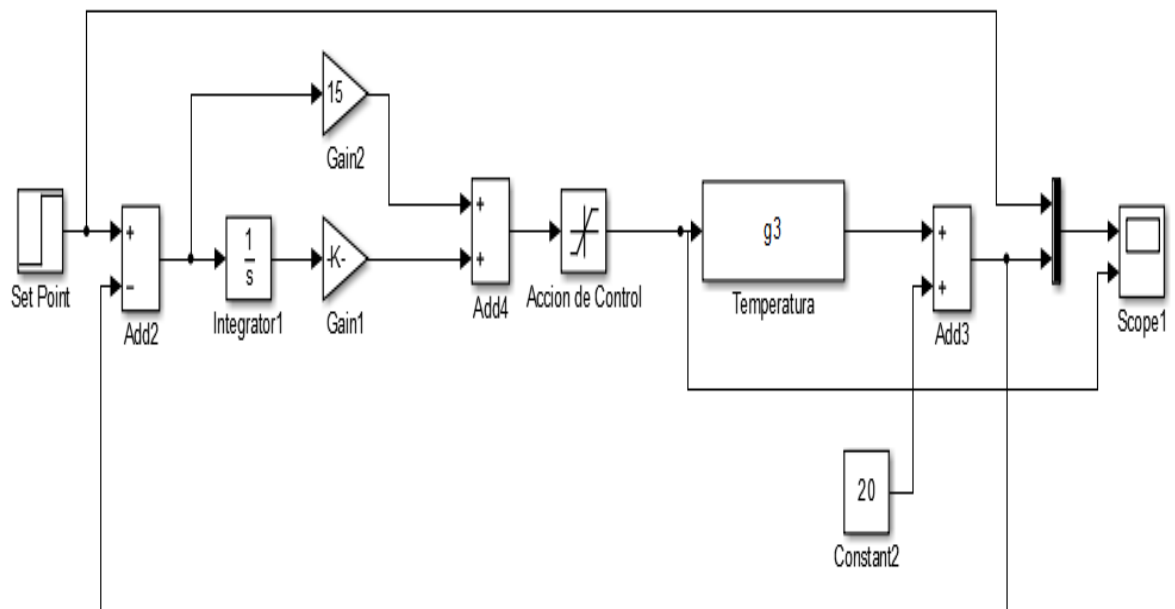


✓ **Validación del controlador.** Para esta etapa, el modelo del sistema y el controlador son implementados en SIMULINK de MATLAB. En este diagrama de bloques es importante incluir el saturador de la acción de control pues el máximo valor que ésta presenta es de 100. Nuevamente se realiza un ajuste de acuerdo al

comportamiento en los diferentes puntos de operación para cumplir con un tiempo de establecimiento menor a 1000 segundos.

En la siguiente grafica se encuentra el diagrama de bloques creado en SMULINK. De tal manera que este simule el comportamiento del equipo, y de esta manera comprobar la veracidad de lo calculado previamente.

Figura 37. Diagrama de bloques del sistema.

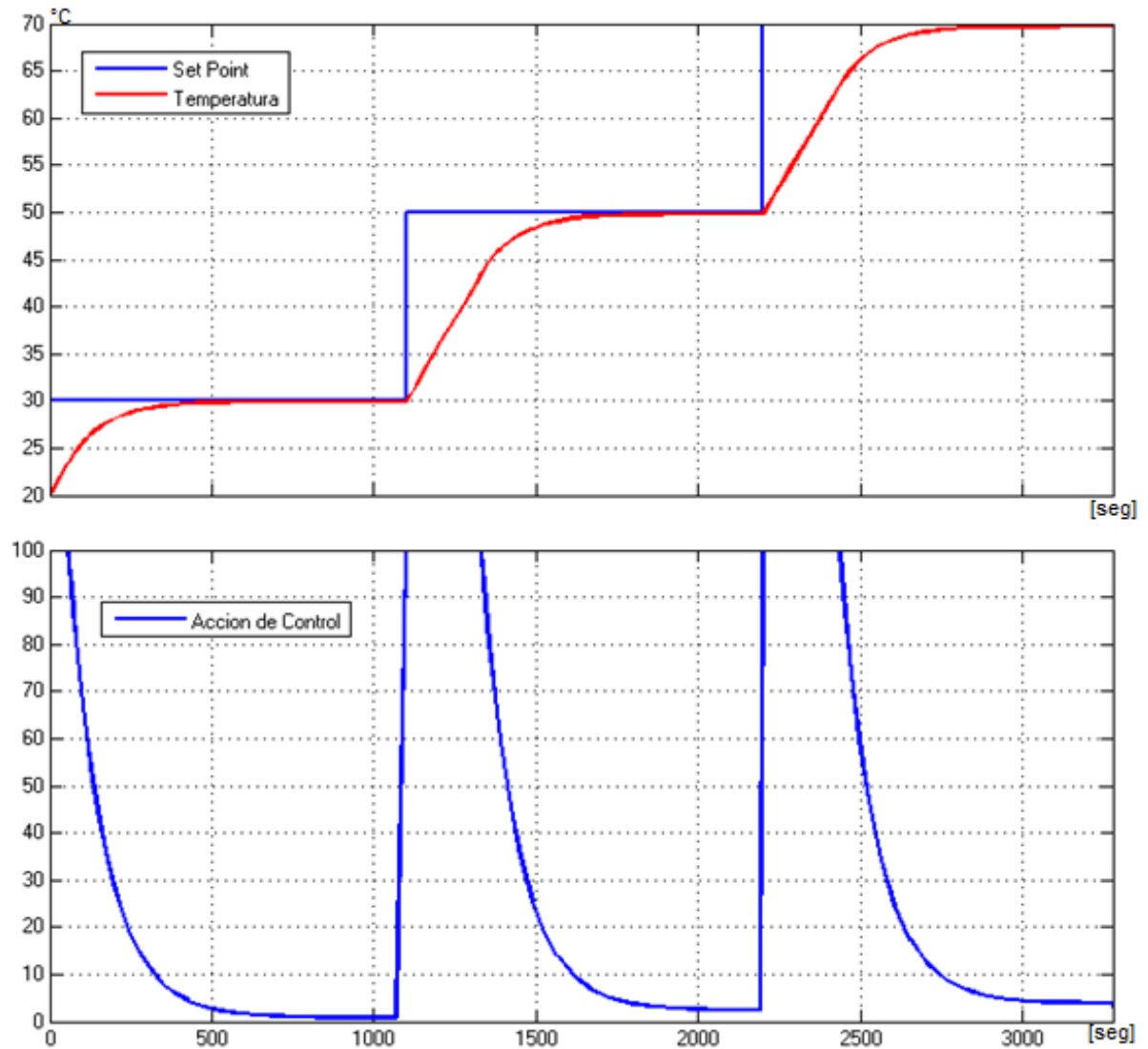


Buscando ajustar el comportamiento del sistema a uno mejor, se procedió a cambiar la función de transferencia, hasta encontrar unas nuevas constantes cercanas a las anteriores que proporcionen un mejor resultado (este en un proceso iterativo). Obteniendo finalmente.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 15 + \frac{0.000157}{s}$$

Y con esta función de transferencia se obtiene el siguiente comportamiento. Para tres valores de set point diferentes.

Figura 38. Respuesta transitoria del comportamiento de la temperatura del fluido y la acción de control únicamente proporcional.



Las constantes que se hallaron fueron las siguientes.

$$Kp = 15$$

$$Ti = \frac{15}{0.000157} = 95540 \text{ segundos}$$

$$T_d = 0 \text{ segundos}$$

En ellas podemos observar que la parte derivativa del control se anuló para un mejor funcionamiento.

En los controladores industriales la constante de tiempo integral máxima es de 3240 segundos. Por lo tanto nuevamente debe realizarse un ajuste.

✓ **Controlador final.** Se implementó un controlador proporcional con una ganancia  $K_p$  de 15. Cabe aclarar que al ser un controlador proporcional se presenta un error en estado estable, que para este caso es de 0.4 %, error que es permisible para este sistema.

Sin embargo, es muy probable que al implementar la planta en físico, presente un error en estado estable más grande, pues no se está asegurando que llegue al punto de consigna.

Teniendo en cuenta la limitante del controlador industrial, y para solucionar la problemática anterior, se escoge el máximo tiempo integrativo (3240 s) y se empieza a sintonizar un controlador bajo esta premisa.

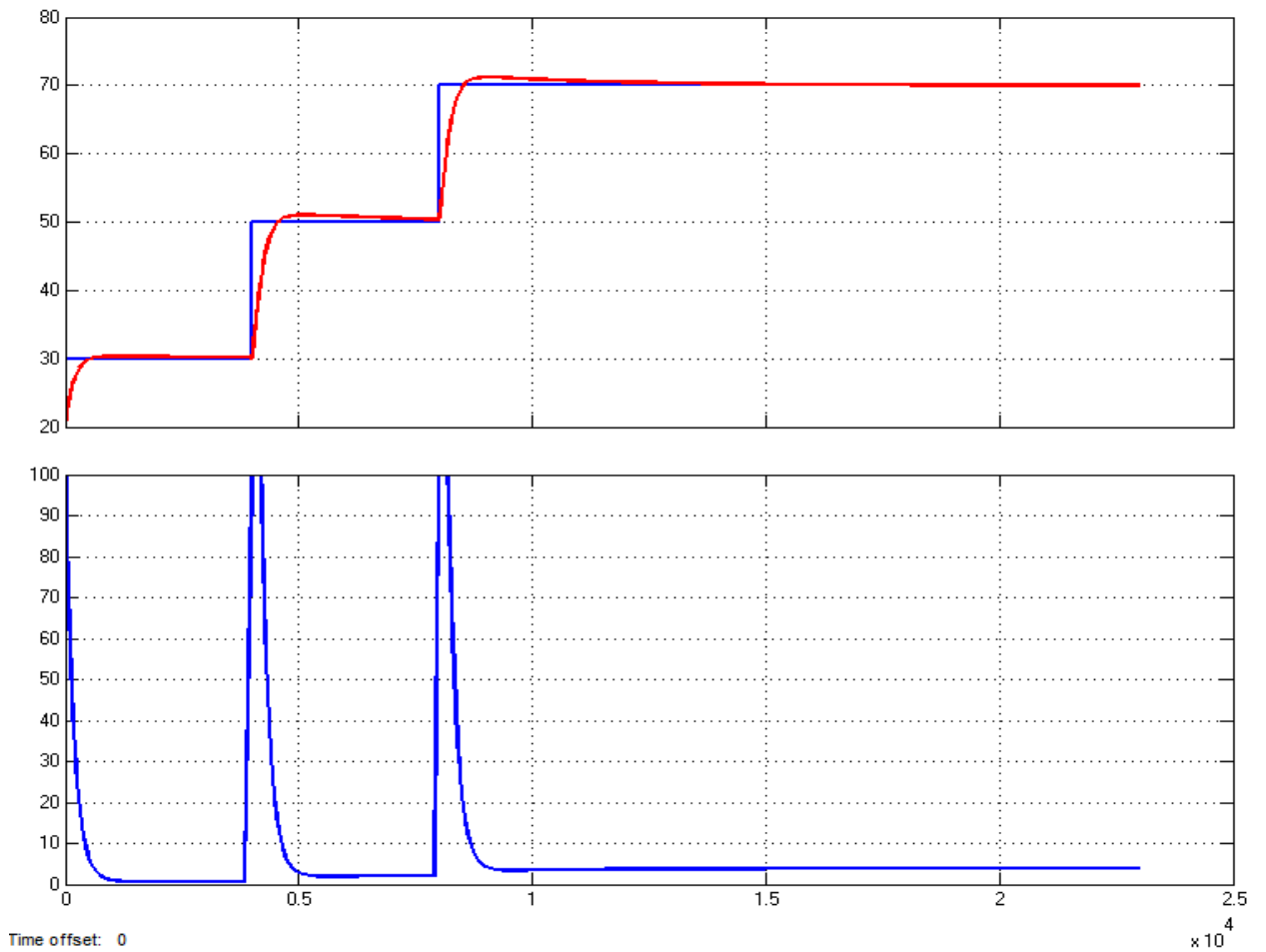
La sintonización realizada arroja los siguientes resultados:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 15 * \left[ 1 + \frac{1}{3240 * s} \right]$$

La respuesta transitoria de este sistema presenta un leve sobrepaso menor al 2% y un tiempo de establecimiento menor a 1000 segundos. En comparación con el controlador proporcional, este controlador PI presenta sobrepaso, pero se garantiza que la temperatura llegue al valor deseado.

Obteniendo con este las siguientes graficas del comportamiento transitorio de la variable del sistema y la acción de control.

Figura 39. Respuesta transitoria del comportamiento de la temperatura del fluido y la acción de control proporcional - integral.



✓ **Índices de eficiencia de la simulación.** La energía total de una señal esta definida como:

$$\int_{t_1}^{t_2} |x(t)|^2 dx$$

Tabla 17. Índices de eficiencia del controlador

PARÁMETRO	CONTROLADOR P	CONTROLADOR PI	SIGNIFICADO
<b>Variable del proceso</b>	Error de 0.4 %	0%	
<b>Sobrepaso</b>	0	1.4%	
<b>Tiempo de establecimiento</b>	335 s	400 s	
<b>Acción de control</b>	Máximo 100%	Máximo 100%	
$J_1 = \frac{T_{final}}{N} \sum_{k=0}^N e(k)^2$	9.89e+05	9.8e+05	La energía total del error en la respuesta transitoria del controlador
$J_2 = \frac{T_{final}}{N} \sum_{k=0}^N u(k)^2$	7.77e+07	6.73e+07	La energía total de la acción de control utilizada en el proceso (Simulación)
$J_3 = \frac{T_{final}}{N} \sum_{k=0}^N (u(k) - u(k-1))^2$	4.97e+06	4.83e+06	La energía total de la razón de cambio de la acción de control durante el proceso

De acuerdo con estos criterios, es posible decir, que entre menores sean estos índices, mejor será la eficiencia del controlador pues se estaría utilizando menor energía.

**8.3.2.2 Subsistema de control ON-OFF para refrigeración por compresión.** Para reducir la temperatura dentro del fluido, el sistema cuenta con una unidad condensadora, la cual debe ser accionada por medio de un control ON-OFF. Para esta aplicación se usarán las activaciones por alarma que posee el controlador industrial.

La alarma 1 deberá activarse cuando la temperatura del fluido este por debajo de 25° C, para garantizar que la unidad no sea encendida a temperaturas altas. La alarma 2 se activará cuando el operador introduzca la temperatura deseada. Además, la alarma 2 se desactiva cuando el sistema pierde calor y se alcanza el set point y se activara cuando la temperatura aumente 3°C, permitiendo que la unidad condensadora tenga el tiempo suficiente para que las presiones a la entrada y salida del compresor se igualen, es decir,

**8.3.3 Configuración del controlador.** Después de definido el comportamiento deseado del controlador bajo los parámetros estipulados, es necesario seguir una serie de pasos para configurar este. Para ello es necesario el uso del manual del usuario, disponible en la web e incluido en la documentación al comprar el controlador.

✓ **Configuración tipo de sensor.** El sensor para esta aplicación es una RTD PT100. Para seleccionar este sensor dentro del controlador ver manual del usuario, Pág. 49.

✓ **Configuración control PID.** Los parámetros a tener en cuenta en esta configuración son la banda proporcional ( $BP=6.67$ ), el periodo de control ( $T_m=40$  s) y el modo de operación inverso. Ver manual del usuario, Pág. 51, 52, 53 y 66.

✓ **Configuración control ON-OFF.** La alarma 1 debe configurarse como tipo 9, con  $x=25$ . Ver manual del usuario, Pág. 67.

La alarma 2 debe configurarse como tipo 2, con  $x=3$ . Anexo 1, Pág. 67. Además debe configurarse la histéresis de la alarma 2 con un valor de 3. Ver manual del usuario, Pág. 90.

✓ **Configuración del cableado.** Las precauciones de cableado para el controlador se pueden ver en el manual del usuario, Pág. 30.

**8.3.4 Simulación.** El computador es fundamental en este proceso. El siguiente diagrama de bloques con la simulación fue utilizado en SIMULINK para poder observar las gráficas mostradas anteriormente.

Figura 40. Diagrama de bloques de controlador PI

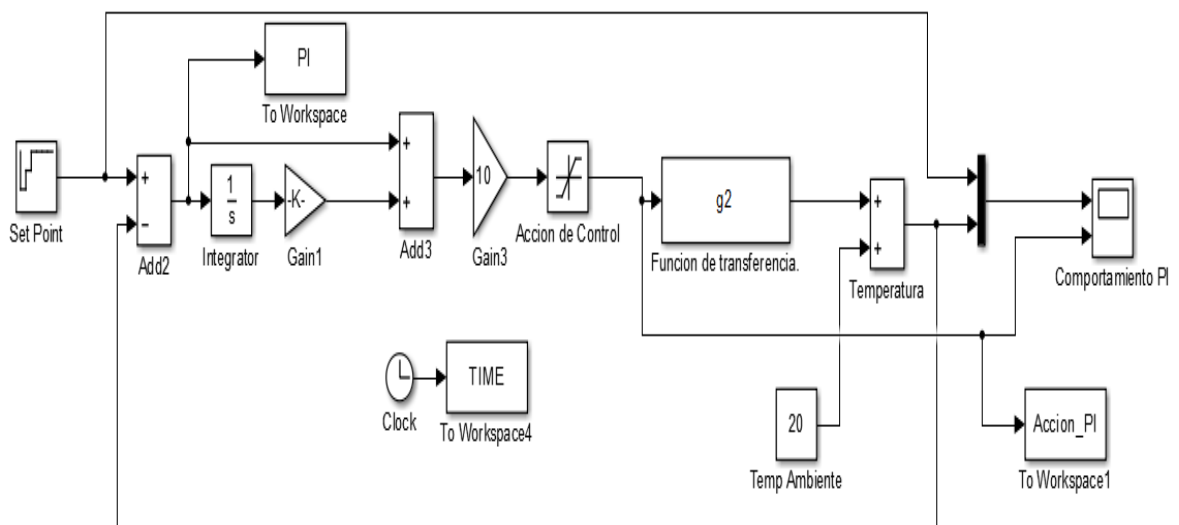
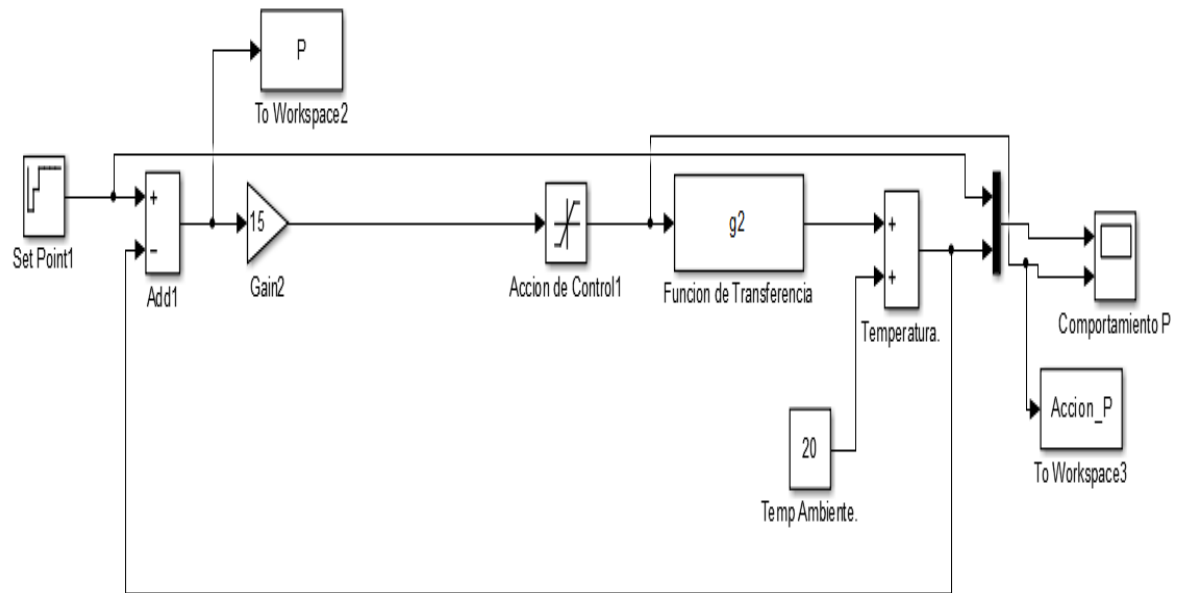


Figura 41. Diagrama de bloques de controlador P



Donde en cada caso el valor de  $g2$  es la función de transferencia  $G(s)$  que describe el comportamiento del sistema.

## **9. PROCESO DE CALIBRACIÓN DE UN SENSOR DE TEMPERATURA POR COMPARACIÓN**

Son varios los factores influyentes a la hora de realizar un buen proceso de calibración, si bien el banco es fundamental, las capacidades del operador, las condiciones ambientales de trabajo y la correcta secuencia de las tareas o procesos, juegan su papel y por tal motivo no deben dejarse a un lado.

De igual forma, la sección 5 de la norma ISO/IEC 17025 del 2005. Enuncia de manera clara los lineamientos necesarios para realizar prácticas de laboratorio, junto al correcto manejo de los datos obtenidos. Todo esto para realizar conclusiones, observaciones y recomendaciones acertadas.

También FLUKE Calibration en su documento titulado “Como calibrar una RTD o un sensor de temperatura con resistencia de platino (PRT)” sirve como apoyo fundamental para establecer el procedimiento de calibración básico y general.

### **9.1 CONDICIÓN AMBIENTAL**

Trabajar bajo el entorno adecuado juega un papel importante hacia la realización de la correcta calibración, dado que el volumen de fluido está sujeto a un intercambio de calor con el exterior (pese al aislamiento del contenedor) y es necesario establecer unas condiciones de trabajo.

De igual forma la condición ambiental va de la mano con el dimensionamiento de los sistemas de intercambio de calor, pues influye en la determinación de las capacidades totales tanto del sistema de refrigeración por compresión como del sistema de calentamiento por resistencia eléctrica.

Basado en esto y el confort del operador, se establece una temperatura de trabajo entre (20°C – 25°C), sin corrientes de aire y una humedad relativa entre (50% - 70%).

Mantener la temperatura en este punto, influye en el comportamiento de la temperatura del banco, ayudando a que sea más efectivo su control.

## **9.2 PRECAUCIONES E INDICACIONES**

Las indicaciones extras son necesarias en todo momento, de no seguirlas se corre el riesgo de no realizar un procedimiento adecuado o en el peor de los casos, sufrir un accidente.

- ✓ Es necesario que la temperatura del banco se encuentre en una temperatura fija dentro del rango establecido cuando este se encienda.
- ✓ Se inicia realizando la comparación de la temperatura mas cercana a la temperatura inicial del fluido, a partir de ahí se aumenta o se disminuye respectivamente para realizar las siguientes mediciones.
- ✓ Para facilitar que el fluido de trabajo alcance la temperatura ambiente nuevamente, se enciende el motor de agitación únicamente.
- ✓ Es posible cambiar de refrigeración por compresión a calentamiento por resistencia eléctrica, sin embargo no se recomienda realizarlo en el sentido contrario. Para ello se recomienda dejar encendido el sistema de agitación hasta que la temperatura del fluido caiga a un valor muy cercano a la temperatura ambiente (aproximadamente 2°C mayor que la temperatura ambiente).

### 9.3 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Un proceso repetitivo, donde de obviarse algún paso se corre el riesgo de realizar una calibración incorrecta.

- a) Inicialmente se debe asegurar que el banco contenga suficiente fluido de trabajo, que no este presentando fugas, conexiones eléctricas dañadas, tubería rota, etc. Buscando la seguridad del operador y la integridad del banco.
- b) Encender el sistema de agitación, esperar aproximadamente un minuto e introducir el sensor a calibrar, por la ranura correspondiente.
- c) Encender el banco, la pantalla muestra la actual temperatura del fluido de trabajo, entonces se toma la temperatura arrojada por el sensor a calibrar como primer punto de comparación.
- d) Tres minutos después de realizar la primera medición, se introduce un nuevo valor de temperatura y se realiza la comparación de señal entre los sensores, de este modo hasta completar cinco mediciones de temperatura en ese punto.
- e) Introducir el nuevo valor de temperatura (se recomienda cinco grados de diferencia entre los puntos), el sistema de intercambio de calor respectivo inicia su funcionamiento agregando o retirando calor del fluido.
- f) Cuando la temperatura en el fluido es uniforme se toma una nueva medición de la temperatura arrojada por el sensor a calibrar, junto a la temperatura arrojada por el sensor del banco.

g) Realizamos el procedimiento (d) nuevamente.

h) Realizamos el procedimiento (e) nuevamente.

Estos procedimientos se repiten tomando un mínimo de 5 puntos diferentes. (Si se desea realizar una comparación en un punto donde se necesite cambiar los sistemas de intercambio de calor, se recomienda leer la sección 6.2 PRECAUCIONES E INDICACIONES)

El apagado del banco se realiza en el siguiente orden.

✓ Apagar los sistemas de intercambio de calor.

✓ Apagar el sistema de agitación.

✓ Desconectar el banco.

✓ Extraer el sensor a calibrar.

#### **9.4 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

La exposición de los resultados del proceso de calibración debe ser clara, sencilla y breve, sin dejar espacio a las dudas del proceso o del comportamiento de los elementos.

En la siguiente página se encuentra la plantilla utilizada para presentar los resultados del proceso. Y toda la información necesaria.



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
 División de Mantenimiento Tecnológico  
 calibración de sensor de temperatura mediante baño isotérmico

Registro No.

Día \_\_\_\_\_ Mes \_\_\_\_\_ Año \_\_\_\_\_

Equipo a calibrar:	
Equipo utilizado:	
Método de calibración:	Temperatura ambiente:
Persona encargada:	Humedad relativa:

Valor deseado	Valor máx.	Valor medio	Valor min.

Observaciones:

Recomendaciones:

Conclusión:

## 10. OBSERVACIONES

- ✓ Dado el análisis realizado en el Capítulo 5, es necesario enfatizar que la variación de la temperatura en el tiempo para la determinación de la potencia necesaria se tomó como lineal. Establecido el controlador dentro del banco, se produce un cambio en este comportamiento, esto trae consigo un aumento significativo del tiempo requerido para que el fluido de trabajo alcance la temperatura deseada.
  
- ✓ Con el objetivo de buscar un bajo costo de producción, el modelo final difiere en muchas cosas del presentado en el plan de este proyecto.
  
- ✓ Dado que el controlador puede ser puramente proporcional o proporcional-integral, es necesario observar detalladamente el funcionamiento de estos en el el modelo físico, y así establecer cuál de ellos aproxima mas la temperatura del fluido a la deseada.
  
- ✓ Algunos de los elementos usados en el banco no tienen lugar dentro de cuerpo de este documento pero si en los planos dado que su principio de diseño solo esta basado en la comodidad del operador o estética del equipo, tal como; la lámina de madera que se usa como soporte de los elementos del subsistema de control.
  
- ✓ La tubería y elemento expansor no fueron incluidos dentro de los planos del banco, ya que para que trayectoria esta a libre albedrio de quien construya este equipo. Sin embargo sus características y especificaciones se encuentran en el capítulo 5.

✓ Dado el ruido presentado e imposible de anular en el sistema de control, es posible que el sistema no llegue a la temperatura exacta introducida como set point.

## 11. CONCLUSIONES

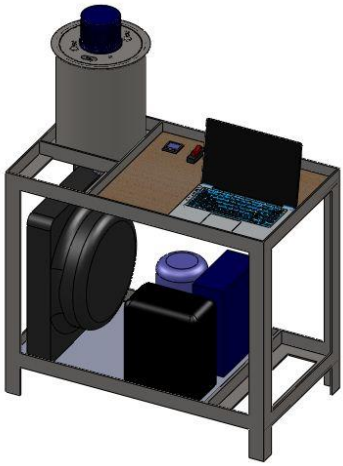

- ✓ La correcta realización de un diseño mecánico completo, debe tener como principal fundamento el seguimiento de las diferentes normas encontradas en la industria sobre los diferentes ámbitos contenidos dentro del proyecto.
  
- ✓ Gracias al surgimiento de una gran cantidad de empresas dedicadas a prestar servicios o proporcionar un producto, es posible encontrar muchos de los componentes del banco previamente fabricados. Facilitando en gran medida su diseño y posterior elaboración.
  
- ✓ Aunque la estructura del control PID es usar tres constantes, en sistemas térmicos es común usar solo las dos primeras de ellas PI e incluso en algunos casos solo la primera, todo esto con el objetivo de alcanzar menores tiempos de establecimiento con el menor error posible.
  
- ✓ El desarrollo de este proyecto no es posible sin la correcta unión y aplicación de conocimientos en las diferentes ramas de la Ingeniería Mecánica. Tales como; transferencia de calor y masa, termodinámica, procesos de manufactura y ciencia de materiales.
  
- ✓ La realización del diseño detallado permitió el fortalecimiento y la adquisición de nuevos conocimientos tales como la metrología. De igual forma se logró la inclusión de diversos sistemas dentro de un equipo, de tal manera que todos trabajen bajo una como un único conjunto.
  
- ✓ Un proceso de verificación metrológica debe cumplir con requisitos previos y poseer un orden establecido. Pues estos buscan no solo evitar accidentes sino

errores que alteren la toma de decisiones futuras. Con esto en mente se estableció un procedimiento basado en la norma NTC-ISO 17025 y documentación proporcionada por los fabricantes de bancos similares.

✓ La correcta presentación de la información es importante a la hora de tomar correctas decisiones, esto tuvo un alto grado de importancia a la hora de establecer un formato para presentar los resultados de la verificación metrológica. Evitando confusiones al tener información innecesaria.

✓ Buscando determinar la viabilidad del proyecto de acuerdo a una visión de costo monetario, se realiza en la siguiente hoja una comparación entre el banco metrológico diseñado en este documento y uno con similares características encontrado en el mercado.

Tabla 18. Análisis de viabilidad del proyecto

BAÑO ISOTERMICO		FLUKE CALIBRATION 7008
		
Subsistema estructural		Características: • Intervalo de -5° C a 110 ° C. • Estabilidad de $\pm 0.0007$ ° C a 25° C. • Profundidad 331 mm (13 pulgadas).
<b>Propilenglicol</b>	178000	
<b>AISI 304</b>	276000	Precio aproximado: 8'000.000
<b>Marco</b>	100000	
<b>Contenedor</b>	35000	
<b>Tapa contendor</b>	30000	
<b>Aislante</b>	11000	
Subsistema de agitación		
<b>Motor + hélice</b>	150000	
<b>Cubierta hélice</b>	15000	
<b>Acople hélice</b>	5000	
Subsistema de intercambio de calor		
<b>Unidad condensadora</b>	1210750	
<b>Tubo capilar</b>	5000	
<b>Evaporador + tubería</b>	120000	
<b>Resistencias eléctricas</b>	100000	
Subsistema de control		
<b>Controlador</b>	750000	
<b>RTD PT 100</b>	70000	
<b>Relés 20 Amp</b>	150000	
<b>Relé 30 Amp</b>	80000	
<b>Fusible</b>	5000	
<b>Disyuntores</b>	40000	
<b>Subtotal</b>	3350750	
<b>Documentación y gastos extras</b>	666150	
<b>Total</b>	3'996.900	

## 12.RECOMENDACIONES

✓ Aunque el diseño del controlador se ha realizado, en el mercado son muchos los controladores disponibles y para su configuración es necesario tener en cuenta los criterios del fabricante. Como ejemplo se realiza el ejemplo con un controlador OMRON, sin embargo es posible que al construir el banco existan nuevos controladores entonces se recomienda usar las constantes del control PID y la configuración del controlador se realice de acuerdo a las indicaciones del fabricante.

✓ Buscando prolongar la vida útil del fluido de trabajo, se recomienda mantener sellado el contenedor, evitando que polvo y agentes externos tengan contacto caigan dentro de este.

## BIBLIOGRAFÍA

- ✓ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. NTC-ISO/IEC 17025. Bogotá D.C: El Instituto, 2005. 35 p.
  
- ✓ ÇENGEL, Yunes A y BOLES, Michael A. Termodinámica. Traducido por Virgilio Gonzales y Sergio M. Sarmiento. 6 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2009. p 289 – 290,301-309
  
- ✓ ISOTHERMAL TECHNOLOGY LTD. Isothermal Baths [online]. Merseyside (England): 2010. [citado el 10 de Febrero, 2013]. Disponible en internet <<http://www.isotech.co.uk/>>
  
- ✓ FLUKE CALIBRATION. Calibration procedure [online]. Eindhoven (Netherlands): 2013. [citado el 2 de Mayo, 2013]. Disponible en internet <<http://eu.flukecal.com/>>
  
- ✓ TECNICAS DE CONTROL METROLOGICO. Curso online - Caracterización de medios isotérmicos y calibración de temperatura. Módulo 1 – Conceptos generales de calibración. Zaragoza: 2010.
  
- ✓ STOECKER, Wilbert F. Industrial Refrigeration Handbook. 1ed. Illinois: McGraw-Hill, 1998. p 172 -175.
  
- ✓ GIESECKE, Frederick E, et al. Dibujo Técnico con Graficas de Ingeniería. 14 ed. México D.F.: Pearson, 2013. p 6-7. ISBN 978-607-32-1353-0.

- ✓ OGATA. Katsuhiko. Traducido por Raquel Dormido Canto y Sebastián Dormido Canto. 5 ed. Madrid: Pearson, 2010. 895 p.
  
- ✓ WIKIPEDIA. Medición [online]. San Francisco (California): 2014. [citado 20 Ene. 2014]. Disponible en Internet <<http://es.wikipedia.org/wiki/Medicion>>.
  
- ✓ ISOTECHNA. Baño isotérmicos [online]. Colchester (Vermont): 2012. [citado 14 de Jun. 2013]. Disponible en internet <<http://www.isotechna.com/>>
  
- ✓ LIBROSINGENIERIA. Métodos de calibración de sensores de temperatura [online]. Madrid: 2010. [citado 21 de Mar. 2013]. Disponible en internet <<http://www.librosingenieria.com/>>
  
- ✓ GRUPO LOS RESISTORES. Control PID [online]. México D.F: 2008. [citado 10 Feb del 2013]. Disponible en internet: <<http://grupolosresistores.blogspot.com/2012/12/controlador-pid.html>>
  
- ✓ ASCONSTRUCTORAS. Termolon [online]. Medellín: 2009. [citado 10 Nov del 2013]. Disponible en internet: <<http://www.aconstructoras.com>>
  
- ✓ TECUMSEH. Unidades condensadoras [online]. Ann Arbor (Michigan): 2013. [citado 24 de Ago. de 2103]. Disponible en internet: <<http://www.tecumseh.com/es>>
  
- ✓ FAVRE. Tubos capilares [online]. Bilbao (España): 2009. [Citado 26 de Ago. de 2013]. Disponible en internet: < <http://www.favresl.com/index.html> >

- ✓ CENTRO NACIONAL PARA EL DESARROLLO DEL ACERO INOXIDABLE. Manual del Técnico especializado en acero inoxidable. México D.F: El Instituto. 17p.
  
- ✓ OMROM INDUSTRIAL AUTOMATION. General Purpose Controller OMROM E5CN-H. Kyoto (Japan): 2007. [citado 10 de Ene. de 2014]. Disponible en internet: < <http://www.ia.omron.com/>>
  
- ✓ OMEGA. RTD tipo PT100 [online]. Stamford: 2003. [Citado 8 de Oct. de 2013]. Disponible en internet: < <http://www.omega.com/>>.
  
- ✓ SCHNEIDER ELECTRIC. Relé Schneider SSRDP8S30A1. Paris: 2014. [Citado 13 de Ene. de 2014]. Página web: < <http://schneider.thomasnet.com/item/ssr-relays/din-mount-srs/ssrdp8s30a1>>
  
- ✓ SCHNEIDER ELECTRIC. Relé Schneider SSRDP8S20A1. Paris: 2014. [Citado 13 de Ene. de 2014]. Página web: < <http://schneider.thomasnet.com/item/ssr-relays/din-mount-srs/ssrdp8s20a1>>
  
- ✓ RIERA LERIN, I; SESÉ CASTEL J y SANTAMARÍA SERNA, F. Aplicación tecnológica de la agitación en la industria químico-farmacéutica, Aspectos teóricos. En: Industria Farmacéutica. Mayo – Junio, 2007. no 133, p 86 – 98.

## **ANEXOS**

## ANEXO A. MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL BANCO METROLÓGICO.

El mantenimiento preventivo de un banco metrológico, indica la puesta a punto de todos los subsistemas que lo integran. Por tal motivo debe tomarse como una tarea delicada, dejando previamente estipulado que quien la realiza es personal calificado.

Esta demostrado que la mayoría de las fallas presentadas en un equipo, es la consecuencia de la agrupación de condiciones desfavorables. Que de igual forma son la consecuencia del estado bajo el cual el sistema viene funcionando, como; mala lubricación, poca limpieza, entorno negativo y mal manejo por parte del operador. Con esto es mente es posible establecer que unas correctas técnicas de manejo junto a un cuidadoso proceso de observación, son el primer paso hacia la aplicación de un correcto mantenimiento preventivo.

Es posible de antemano conocer dicho estado bajo el cual el equipo esta trabajando, ya sea mediante la observación directa o la indirecta.

Tabla 19. Condiciones desfavorables para el funcionamiento del equipo.

<b>Condiciones desfavorables de observación directa.</b>	<b>Condiciones desfavorables de observación indirecta.</b>
*Suciedad y polvo en el entorno	*Cambios significativos en el tiempo de respuesta de los diversos sistemas.
*Vibración	* Cambios significativos en la relación entre la potencia consumida y la potencia ofrecida.
*Ruido	
*Fugas	
*Cortocircuito o chispa en sistemas eléctricos y electrónicos	

Fuente. Autor.

De igual manera, esto no proporciona un completo mantenimiento. Por tal motivo es necesario en muchas ocasiones desmontar el equipo para acceder brindar un proceso con mayor profundidad.

**Desmontaje del banco metrológico.** Dado que este equipo no trabaja continuamente. El proceso de mantenimiento preventivo puede realizarse cada 12 meses. Y para ello es necesario realizar unos pasos previos que aseguran la integridad del equipo y el personal. Tales procedimientos son:

- ✓ Desconectar y alejar el equipo de toda fuente de alimentación eléctrica.
- ✓ Extraer el fluido de trabajo del recipiente principal.
- ✓ Retirar las tapas y protecciones del sistema eléctrico y electrónico.
- ✓ Desmontar el subsistema de agitación, el recipiente principal y los elementos sumergidos en este, de tal manera que se pueda acceder fácilmente al sistema de control y la unidad condensadora.

Luego de realizado el desmontaje es necesario realizar el mantenimiento de las partes que sufren un mayor deterioramiento y examinar el estado de las partes que no tienen este inconveniente para determinar si es necesario mantenerlas.

**Proceso de mantenimiento preventivo.** Las tareas que componen esta actividad son tan variadas como los elementos del banco, para algunas de ellas es necesario remover piezas, revisarlas, mantenerlas y volver a ubicarlas dentro del equipo.

- ✓ Mantenimiento de los elementos sumergidos en el fluido de trabajo; ya que están constantemente sumergidos en una sustancia acuosa, es posible que se adhieran a estas partículas que impidan su buen funcionamiento, por tal motivo es necesario limpiarlos y especialmente en el caso del sensor del banco es necesario

que sea enviado a calibrar nuevamente. Con el fin de asegurar un funcionamiento correcto en el futuro.

- ✓ Limpieza del recipiente de fluido de trabajo; después de ser vaciado y desmontado del banco es necesario limpiarlo con elementos solubles en agua, removiendo así impurezas asentadas generalmente en el fondo de este.
- ✓ Mantenimiento de sistema electrónico; dado su delicadeza, es necesario que su limpieza sea en seco. Cuidando de no dañar conexiones ni elementos (es aconsejable usar una pistola de aire para remover polvo e impurezas).
- ✓ Mantenimiento de sistema eléctrico; este proceso es similar al anterior, con la diferencia que se recomienda revisar todas las conexiones eléctricas, buscando deterioramiento y peligros de corto circuito.
- ✓ Mantenimiento de la unidad condensadora; las pautas de su mantenimiento son estipuladas en el manual del fabricante y es recomendable tomarlas en cuenta.
- ✓ Cambio de fluido de trabajo; ya sea por contaminación o degradamiento, es recomendado renovarlo para así obtener mejores resultados en futuras calibraciones.

## **ANEXO B. PLANOS**

**(Planos encontrados en documento PDF anexo)**