

DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO CILINDRO – ÉMBOLO PARA LA
MEDICIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES Y PROCESOS TERMODINÁMICOS
CLÁSICOS CON CARÁCTER ACADÉMICO

CAROLINA MIRA HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Físico

Asesor:

Luis Santiago Paris Londoño
Ingeniero Mecánico

ESCUELA DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD EAFIT
MEDELLÍN
2011

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este trabajo de grado significa estar más cerca de convertirme en Ingeniera Física. Y es este el momento propicio para agradecer a las muchas personas que contribuyeron en este proceso. El camino por perseguir lo que se quiere está lleno de obstáculos, pero su compañía sirvió de soporte para superarlos.

Gracias a mis papás y mis hermanas, su apoyo y amor incondicional me dan energías para lograr lo que creo imposible.

Gracias al asesor del trabajo de grado Luis Santiago Paris Londoño por todas sus enseñanzas y amistad durante estos años. Este es un paso más para materializar las ideas que compartimos sobre la termodinámica, la formación en ingeniería y temas afines.

Gracias a Alejandro Ruiz, José Miguel Correa, Sebastián Toro, William Machado y Edilson Guerra por su alto compromiso con este proyecto y aportes acertados. También, agradezco al personal del Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad EAFIT por su permanente y amable disposición a colaborar.

Gracias a mis amigos por su apoyo en la iniciativa de estudiar un segundo pregrado, aunque no siempre les pareciera práctica esta decisión. Muchas gracias a mis compañeros de Ingeniería Física, me alegra haber compartido esta experiencia con ustedes.

Gracias a los docentes del programa de Ingeniería Física, realizan su trabajo con seriedad y responsabilidad. Agradezco especialmente a Juan Manuel Jaramillo, quien despertó en mí el interés por el pregrado. También, manifiesto mi gratitud al actual jefe del programa y a los anteriores por su actitud diligente y comprensión.

Gracias a la Universidad EAFIT y a Desarrollo de Empleados por su colaboración para culminar mis estudios de Ingeniería Física. Además, agradezco al Departamento de Ingeniería Mecánica por incentivar mi continua formación profesional y permitirme el espacio necesario para desarrollar las actividades que esto implica.

TABLA DE CONTENIDO

	pág
TABLA DE CONTENIDO	4
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	9
INTRODUCCIÓN	10
1. ASPECTOS GENERALES	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1. Objetivo General	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
1.3. JUSTIFICACIÓN	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA	16
2.1.1. Sistemas termodinámicos	16
2.1.2. Estado, equilibrio termodinámico y postulado de estado	17
2.1.3. Procesos termodinámicos y cuasi-equilibrio	18
2.1.4. Temperatura	19
2.1.5. Presión	20
2.2. FORMAS DE ENERGÍA Y CONSERVACIÓN DE ENERGÍA	20
2.2.1. Energía como propiedad	21
2.2.2. Energía en tránsito: Calor y Trabajo	22
2.2.3. Primera ley de la termodinámica	23
2.3. PROPIEDADES DE SUSTANCIAS PURAS Y CAMBIOS DE FASE	23
2.3.1. Cambio de fase líquido - vapor	24
2.3.2. Relación entre presión y temperatura de saturación	26
2.3.3. Propiedades de mezclas saturadas	27
3. ESTADO DEL ARTE	30
3.1. ELEMENTOS DE SENSADO	30

3.1.1.	Temperatura	31
3.1.2.	Presión	32
3.1.3.	Desplazamiento	33
3.2.	ELEMENTOS DE ACTUACIÓN	34
3.2.1.	Calentamiento	34
3.2.2.	Enfriamiento	37
4.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO CILINDRO – ÉMBOLO	39
4.1.	REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	39
4.2.	SELECCIÓN DE LAS SUSTANCIAS DE TRABAJO	42
4.2.1.	Requerimientos para las sustancias de trabajo	42
4.2.2.	Evaluación de las posibles sustancias de trabajo	43
4.2.3.	Otras sustancias de trabajo	45
4.3.	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LOS ELEMENTOS	45
4.3.1.	Material para el cilindro	46
4.3.2.	Sistema de calentamiento	47
4.3.3.	Sistema de enfriamiento	47
4.4.	DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS	47
4.4.1.	Cilindro	48
4.4.2.	Vástago	49
4.4.3.	Sellos y sus alojamientos	51
4.4.4.	Resistencias de calentamiento	52
4.5.	DETALLES DEL DISEÑO	52
4.5.1.	Cilindro	53
4.5.2.	Émbolo	53
4.5.3.	Múltiple para la toma de señales	54
4.5.4.	Montaje resistencias	55
5.	INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO	57
5.1.	SENSORES	57
5.1.1.	Temperatura	57
5.1.2.	Presión	58

5.1.3.	Desplazamiento	59
5.2.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	60
5.2.1.	Tarjeta de adquisición de datos	60
5.2.2.	Circuito para la amplificación de la señal de temperatura	61
5.2.3.	Circuito para el encendido y apagado de las resistencias	63
5.3.	APLICACIÓN EN LABVIEW PARA EL MONITOREO	64
6.	MODELAMIENTO DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS EJECUTADOS	68
6.1.	PROCESOS TERMODINÁMICOS EJECUTADOS	68
6.1.1.	Calentamiento inicial	68
6.1.2.	Expansión a presión constante	71
6.1.3.	Calentamiento a volumen constante	77
6.2.	ESTIMACIÓN TEÓRICA DE PARÁMETROS	78
6.2.1.	Capacidad calorífica del contenedor	79
6.2.2.	Coefficiente de transferencia de calor por convección	79
7.	RESULTADOS	84
7.1.	CALENTAMIENTO INICIAL	84
7.2.	EXPANSIÓN A PRESIÓN CONSTANTE	85
7.3.	CALENTAMIENTO A VOLUMEN CONSTANTE	88
	CONCLUSIONES	90
	RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	93
	BIBLIOGRAFÍA	95
	ANEXO A: FICHA TÉCNICA DISPOSITIVO CILINDRO – ÉMBOLO	97
	ANEXO B: MANUAL INSTRUCTIVO DEL DISPOSITIVO CILINDRO–ÉMBOLO	100
	ANEXO C: CIRCUITO ELECTRÓNICO	103
	ANEXO D: INFORMACIÓN TÉCNICA TARJETA ADQUISICIÓN DE DATOS	105
	ANEXO E: GUÍA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL CON EL DISPOSITIVO	113
	ANEXO F: PLANOS TÉCNICOS DEL DISPOSITIVO	119

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1 Diagrama Temperatura - Volumen para el agua	26
Figura 2 Curva de presión de saturación para el agua	27
Figura 3 Rango de aplicación de diferentes sensores de longitud	33
Figura 4 Entalpía durante el cambio de fase para el agua y el etanol ($p = 85\text{kPa}$)	45
Figura 5 Nomenclatura de las dimensiones básicas	48
Figura 6 Cilindro neumático utilizado	53
Figura 7 Detalle diseño del émbolo	54
Figura 8 Múltiple para la toma de señales	55
Figura 9 Cilindro con resistencias de calentamiento acopladas	55
Figura 10 Curva característica del termopar	58
Figura 11 Sistema para el sensado de posición del émbolo	59
Figura 12 Sistema de monitoreo y control	60
Figura 13 Circuito amplificador lineal no inversor	62
Figura 14 Curva calibración sensor de temperatura	63
Figura 15 Circuito para la activación de las resistencias	64
Figura 16 Panel frontal de la aplicación para el monitoreo y registro	65
Figura 17 Diagrama de bloques para lectura de señales analógicas	65
Figura 18 Diagrama de bloques para la determinación del volumen	66
Figura 19 Diagrama de bloques para activar las resistencias	66
Figura 20 Diagrama de bloques para el almacenamiento de datos	67
Figura 21 Esquema del sistema en calentamiento inicial	69
Figura 22 Diagrama de cuerpo libre del émbolo	72
Figura 23 Esquema del sistema en expansión a presión constante	73
Figura 24 Esquema del sistema en calentamiento a volumen constante	78
Figura 25 Geometría simplificada para análisis de convección natural	80
Figura 26 Evolución de la temperatura durante el calentamiento inicial	85
Figura 27 Evolución del volumen durante prueba	86
Figura 28 Curva presión contra volumen para la prueba	87

Figura 29 Curva presión contra volumen para la prueba 88

Figura 30 Presión contra la temperatura durante el calentamiento a volumen constante 89

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1 Tipos de resistencias de calentamiento	35
Tabla 2 Dimensiones permisibles del dispositivo cilindro – émbolo	40
Tabla 3 Evaluación sustancia de trabajo (Impacto ambiental, Salud humana, Seguridad)	43
Tabla 4 Evaluación sustancia de trabajo (restricción consecución)	44
Tabla 5 Evaluación posibles materiales para el cilindro	46
Tabla 6 Propiedades mecánicas aleación de aluminio 1060	49
Tabla 7 Propiedades mecánicas acero 1045	50
Tabla 8 Dimensiones para alojamiento de los sellos	51
Tabla 9 Características técnicas transductor de presión	59
Tabla 10 Características para entradas analógicas de tarjeta de adquisición	61
Tabla 11 Masas y capacidades caloríficas partes del cilindro	79

INTRODUCCIÓN

Un dispositivo cilindro – émbolo es un contenedor cerrado con volumen variable, al cual se le puede transferir calor e imponer un trabajo mecánico. Se compone de dos partes básicas, el cilindro o camisa y el émbolo o pistón. La camisa es un cilindro hueco con una tapa en uno de sus extremos. El émbolo es un disco que se acopla al interior de la camisa y puede moverse libremente, permitiendo la variación del volumen.

En la termodinámica clásica se estudian distintas situaciones considerando una sustancia contenida en un dispositivo cilindro – émbolo, en unas condiciones específicas. Así, se modelan distintos procesos y ciclos, como pueden ser los procesos isotérmicos, adiabáticos, isobáricos, isocóricos, entre otros; o los ciclos de combustión interna o de vapor, entre otros. Estos ciclos y procesos, en aplicaciones técnicas industriales ocurren en máquinas térmicas que tienen un sistema de pistones y camisas en los que la sustancia de trabajo puede fluir hacia el interior y exterior del sistema.

Los conceptos y principios de la termodinámica clásica pueden resultar para los estudiantes y para la mayoría de los ingenieros un poco abstractos y lejanos; a pesar de la presencia permanente de estos en la cotidianidad (Laubuhn & Romberg, 2005). Con el desarrollo del dispositivo se pretende abrir un espacio en el que se pueda “jugar” y hacer exploración con estos conceptos de forma práctica. La idea es migrar desde el estudio magistral de la termodinámica, hacia la termodinámica experimental.

El presente trabajo comprende las distintas etapas del desarrollo del dispositivo cilindro – émbolo, como son: diseño mecánico, construcción y ensamble, implementación de la instrumentación, aplicación de un sistema de monitoreo y

pruebas de operación. El desarrollo del trabajo requiere la integración de conceptos de distintas áreas como son: termodinámica clásica, mecánica, electrónica, diseño técnico y manufactura. Es importante, resaltar que el énfasis del proyecto es en los aspectos termodinámicos y mecánicos del sistema. La instrumentación es simplemente una ayuda para la valoración de los procesos.

La estructura del documento es por capítulos, los cuales abordan secuencialmente aspectos para el desarrollo del dispositivo cilindro – émbolo. El primer capítulo cubre aspectos generales del proyecto como son el planteamiento del problema, los objetivos y la justificación. El segundo capítulo es una revisión del marco teórico pertinente para el trabajo de grado. Se incluye este capítulo para familiarizar al lector con los términos y conceptos básicos de la termodinámica clásica y enfatizar en las limitaciones de esta poderosa ciencia. El tercer capítulo es una exploración al estado del arte de la tecnología para la medición de presión, temperatura y volumen (desplazamiento). Los capítulos cuatro y cinco describen aspecto del diseño del dispositivo, el primero de ellos se enfoca en el diseño mecánico y el segundo en la instrumentación y monitoreo. El capítulo seis está dedicado al modelamiento de los procesos termodinámicos que se ejecutan en el dispositivo. El capítulo siete reporta los resultados obtenidos en las pruebas de operación del dispositivo cilindro – émbolo. Finalmente, se presentan las conclusiones extraídas de la ejecución del proyecto y se hacen algunas recomendaciones.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un dispositivo cilindro – émbolo es la manera más directa de representar un sistema cerrado. Es decir, un sistema en que la cantidad de masa permanece fija y ninguna masa cruza la frontera; pero la energía puede ingresar y salir a través de la frontera en forma de calor o trabajo (Potter & Scott, 2006), es decir mediante interacciones térmicas y/o no térmicas entre el interior del sistema y su medio ambiente. La frontera móvil, en este caso el émbolo, permite que el sistema pueda realizar trabajo mecánico sobre los alrededores o que los alrededores puedan realizar trabajo mecánico sobre el sistema.

Un sistema posee distintas propiedades o características físicas; las cuales pueden ser intensivas o extensivas. Un conjunto adecuado de propiedades medibles o estimables con valores específicos que describen por completo el sistema, definen el estado del sistema. La termodinámica clásica impone sobre los estados a estudiar la condición de equilibrio y homogeneidad, en la cual no hay potenciales desbalanceados que produzcan tendencia al cambio. Además, la termodinámica clásica, estudia sistemas “simples compresibles”, donde el único tipo de trabajo observado es el llamado “trabajo en la deformación de los límites del sistema”, es decir, hay ausencia de efectos magnéticos, eléctricos, gravitacionales, de movimiento acelerado y tensión superficial, etc (Cengel, 2009).

Un proceso es la sucesión de estados que experimenta un sistema termodinámico cuando cambia de un estado de equilibrio a otro. La termodinámica clásica estudia los procesos de cuasiequilibrio, en los cuales se considera que todo el tiempo el sistema permanece infinitesimalmente cerca del equilibrio. Estos deben ocurrir lo suficientemente lento como para que el sistema se ajuste internamente a los cambios (Cengel, 2009).

En el desarrollo del presente trabajo se diseña y construye un dispositivo cilindro – émbolo en el que se puedan ejecutar procesos y medir propiedades termodinámicas. Este equipo tiene fines académicos y se plantea su uso futuro como herramienta didáctica de apoyo al aprendizaje. Para realizar análisis bajo la óptica de la termodinámica clásica se deben cumplir las condiciones mencionadas anteriormente; sistemas “simples compresibles”, procesos de cuasiequilibrio y homogeneidad en las propiedades del sistema. Además, el dispositivo debería tener instrumentación y monitoreo. La manufactura y diseño de ambas partes, cilindro y pistón, debe permitir el fácil deslizamiento (poca fricción) entre las mismas y garantizar el sello mecánico.

La intención es desarrollar, con el dispositivo, distintos procesos: isobáricos (a presión constante) e isocóricos (a volumen constante). Esto implica que debe ser posible medir y controlar, o fijar, las variables de presión, temperatura y volumen. La presión se fija mediante cargas o pesas que se ubican en el émbolo, de esta manera la presión mínima de trabajo es la presión atmosférica más la presión ejercida por el peso del émbolo. El volumen se fija mediante topes, los cuales impiden el movimiento del cilindro.

Los requerimientos expuestos imponen exigencias, en cuanto a sensibilidad y capacidad de respuesta, sobre los instrumentos de medición, el sistema de control y el sistema de monitoreo. Estos requerimientos deben ser establecidos y cuantificados en la etapa de diseño del dispositivo.

La medición de propiedades con alta calidad tiene exigencias que superan el alcance de este proyecto en cuanto a instrumentos de medición y complejidad de los montajes. (Goodwin, Marsh, & Wakehan, 2003) y (Weir & de Loos, 2005). Sin embargo, debe tenerse presente que el fin del dispositivo es académico y por lo

tanto no se pretende hacer mediciones de propiedades con estándares certificados.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Diseñar y construir un dispositivo cilindro – émbolo con instrumentación, monitoreo y control que permita la medición de algunas propiedades y procesos termodinámicos clásicos y se convierta en una herramienta de apoyo al aprendizaje.

1.2.2. Objetivos específicos

- Establecer las sustancias de trabajo y los procesos termodinámicos de estudio, para definir los requerimientos mecánicos, de instrumentación y control del dispositivo.
- Modelar analíticamente los procesos termodinámicos que se van a estudiar, analizando la evolución y los procesos de transferencia de calor.
- Diseñar el dispositivo, seleccionar los elementos de instrumentación y control y obtener planos de detalle para la construcción.
- Realizar la manufactura y ensamble de las partes mecánicas del dispositivo cilindro – émbolo e implementar la instrumentación.
- Diseñar e implementar un sistema de monitoreo y control del dispositivo.
- Diseñar una actividad experimental y didáctica con el dispositivo que permita el estudio de los conceptos básicos de la termodinámica clásica modelados. Además, hacer el plan de ensayos para el montaje de algunos de los procesos termodinámicos modelados
- Realizar los ensayos y obtener datos experimentales con el dispositivo instrumentado de algunos de los procesos termodinámicos tratados para

valorar la concordancia con los modelos analíticos y hacer las conclusiones y ajustes pertinentes.

- Redactar un manual de usuario y mantenimiento básico del dispositivo.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La propuesta del proyecto surge de una necesidad de carácter académico de disponer de equipos, que permitan un acercamiento experimental a los conceptos clásicos de la asignatura de termodinámica. Las condiciones tecnológicas actuales permiten que estos dispositivos tengan instrumentos de medición y control, que facilitan su automatización e inclusive su operación a distancia por medio de redes de datos.

Se propone desarrollar un dispositivo cilindro – émbolo en el cual se puedan controlar y medir variables como la temperatura, la presión y el volumen. Un dispositivo de este tipo permite observar y evaluar procesos isobáricos e isocóricos.

El desarrollo del proyecto requiere de formulación de modelos físicos, modelado matemático, diseño mecánico de dispositivos e implementación de instrumentos de medición y control. Por lo anterior, es pertinente como trabajo de grado del programa de Ingeniería Física.

2. MARCO TEÓRICO

La termodinámica es una rama de la ciencia que estudia la energía y sus transformaciones, las interacciones térmicas (calor) y no térmicas (trabajo) y las relaciones entre las propiedades de las sustancias, bajo las condiciones de equilibrio y de homogeneidad. Su nombre viene de dos vocablos griegos, “therme” asociado con el calor y “dynamis” asociado con el movimiento, el cual está relacionado con los primeros intentos de convertir el calor en trabajo mecánico (Cengel, 2009). La termodinámica clásica es considerada, también, como una rama de la física dedicada a la descripción macroscópica de los estados de equilibrio (Callen, 1985).

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA

La termodinámica, al igual que muchas otras ciencias, utiliza un lenguaje propio, relacionado con sus conceptos básicos. A continuación, se pretende hacer una corta descripción de estos conceptos para facilitar la lectura del documento y la comprensión de los aspectos fundamentales del presente proyecto.

2.1.1. Sistemas termodinámicos

A la cantidad de materia o región del espacio estudiada por la termodinámica se le denomina sistema. El sistema está separado de los alrededores (materia o región del espacio fuera del sistema) por una superficie real o imaginaria llamada frontera, la cual puede ser fija o móvil. (Cengel, 2009)

Los sistemas se clasifican de acuerdo con las interacciones que presentan con los alrededores. Estas interacciones consisten básicamente en intercambios de masa, trabajo y calor. Los sistemas que intercambian masa con los alrededores se denominan abiertos en oposición a los sistemas sin intercambio de masa,

llamados sistemas cerrados. Tanto los sistemas cerrados como los sistemas abiertos pueden presentar intercambios de trabajo y calor con los alrededores. Los sistemas que no tienen ningún tipo de intercambio con los alrededores se denominan aislados (Potter & Scott, 2006).

Un dispositivo cilindro – émbolo es la manera más directa de representar un sistema cerrado con una frontera móvil, puesto que es un contenedor cerrado con volumen variable. Se compone de dos partes básicas, el cilindro o camisa y el émbolo o pistón. La camisa es un cilindro hueco con una tapa en uno de sus extremos. El émbolo es un disco que se acopla al interior de la camisa y puede moverse libremente, permitiendo la variación del volumen. La frontera móvil, en este caso el émbolo, permite que el sistema pueda realizar trabajo mecánico sobre los alrededores o que los alrededores puedan realizar trabajo mecánico sobre el sistema. Además, a través de la camisa se puede transferir calor desde o hacia los alrededores.

2.1.2. Estado, equilibrio termodinámico y postulado de estado

Los sistemas tienen propiedades o características. Estas propiedades pueden ser intensivas, independientes de la cantidad de masa, o extensivas, dependientes de la cantidad de masa. La masa en sí misma es una propiedad de los sistemas al igual que la presión, la temperatura y el volumen.

Un conjunto adecuado de propiedades medibles o estimables con valores específicos que describen por completo el sistema, definen el estado del sistema. La termodinámica trata los estados de equilibrio o en los cuales no hay potenciales desbalanceados. Lo anterior implica que para tener equilibrio termodinámico hay que tener:

- Equilibrio térmico: La temperatura del sistema es homogénea.

- Equilibrio mecánico: La presión del sistema es homogénea.
- Equilibrio químico: La composición química del sistema no cambia con el tiempo. No se presentan reacciones químicas.
- Equilibrio de fases: Las fases que componen el sistema alcanzan un nivel de equilibrio. (Cengel, 2009)

El estado del sistema está descrito por sus propiedades, sin embargo no es necesario especificar todas las propiedades para fijar el estado. El postulado de estado establece que: “El estado de un sistema con una sustancia pura simple compresible está completamente especificado por dos propiedades intensivas independientes, cuando está en equilibrio”. Es importante resaltar que un sistema simple compresible implica la ausencia de efectos eléctricos, magnéticos, gravitacionales, de movimiento y de tensión superficial. (Cengel, 2009)

2.1.3. Procesos termodinámicos y cuasi-equilibrio

Un proceso es un cambio del sistema de un estado de equilibrio a otro estado de equilibrio satisfaciendo alguna condición. La serie de estados por los que el sistema pasa durante el proceso se llaman la trayectoria del proceso. Un ciclo es un proceso en el cual los estados, inicial y final, del sistema coinciden; en este caso la trayectoria es cerrada.

Cuando la trayectoria del proceso es tal que el sistema se mantiene infinitesimalmente cerca del equilibrio, se dice que el proceso es de cuasi-equilibrio; los cambios ocurren de manera lenta permitiendo que el sistema se ajuste internamente. Los procesos de cuasi-equilibrio son una idealización y no ocurren en la realidad. Sin embargo, sirven como base para el modelamiento de procesos reales y en muchos casos el error es pequeño. (Cengel, 2009)

Los procesos termodinámicos se clasifican de acuerdo con la propiedad que permanece constante:

- Isotérmico: Proceso a temperatura constante.
- Isobárico: Proceso a presión constante.
- Isocórico o isométrico: Proceso a presión constante.
- Isoentrópico: Proceso a entropía constante.
- Politrópico: Proceso en el que el producto PV^n permanece constante.
- Adiabático: No hay transferencia de calor.

2.1.4. Temperatura

El significado científico de la temperatura tiene su origen en la termodinámica. La ley cero de la termodinámica establece que si dos sistemas están en equilibrio térmico y uno de ellos está en equilibrio térmico con uno tercer sistema, entonces los tres sistemas están en equilibrio térmico. Entonces, la temperatura es una propiedad que da información sobre el equilibrio térmico macroscópico. La segunda ley de la termodinámica establece la escala absoluta de temperatura. (Goodwin, Marsh, & Wakeham, 2003)

En el sistema SI, la escala termodinámica de temperatura usa la unidad de kelvin. Además, establece que la temperatura del punto triple del agua es 273.16K. La escala de temperatura Celsius y la escala de temperatura absoluta se relacionan así (Goodwin, Marsh, & Wakeham, 2003):

$$T(^{\circ}\text{C})=T(\text{K})-273.15 \quad (1)$$

Cualquier ecuación termodinámica puede ser utilizada como base para un termómetro. Sin embargo, los termómetros termodinámicos son difíciles de implementar y poco precisos en la práctica. Por lo anterior, se definió la Escala

Internacional de Temperatura (ITS: International Temperature Scale), basada en escalas de temperaturas empíricas. La ITS se actualiza aproximadamente cada 20 años, por lo cual se denota con el año: ITS-90. La ITS garantiza mayor precisión, pero no necesariamente exactitud termodinámica. (Goodwin, Marsh, & Wakeham, 2003)

2.1.5. Presión

La presión es una magnitud escalar que mide la fuerza por unidad de área normal a una superficie ejercida por un fluido. El término presión se utiliza al referirse a fluidos, es decir gases y líquidos.

Hay tres categorías para la medición de presión: presiones absolutas, presiones manométricas y presiones diferenciales. Cuando se mide presión absoluta se mide la diferencia entre la presión medida y el vacío completo. Cuando se mide presión manométrica se mide la diferencia entre la presión medida y la presión atmosférica. Cuando se miden presiones diferenciales se mide la diferencia entre dos presiones desconocidas. La unidad del SI para la presión es Pa (Pascal). (Higham & Paros, 2003)

2.2. FORMAS DE ENERGÍA Y CONSERVACIÓN DE ENERGÍA

El término energía proviene del griego “energeia” que significa eficacia o fuerza efectiva. El término fue acuñado técnicamente por Thomas Young (1773 – 1829) para abreviar la suma de la energía cinética, la energía potencial y la energía elástica en un sistema masa resorte. En el siglo XIX el término fue ampliado más allá de la mecánica para incluir la energía interna y la energía electromagnética (Müller, 2007). La energía se asocia comúnmente con la capacidad de actuar, transformar o poner en movimiento.

2.2.1. Energía como propiedad

La energía es una propiedad de los sistemas que puede presentarse de distintas formas como son: mecánica, eléctrica, interna (química, de configuración molecular, nuclear). La suma de todas las formas de energía constituye la energía total del sistema. La energía como propiedad puede ser contenida o almacenada en el sistema y solo depende del estado de la sustancia, es decir es independiente del proceso realizado.

La energía total puede dividirse también en formas macroscópicas de energía y formas microscópicas de energía. Las primeras son las formas de energía que tiene el sistema como un todo medidas respecto a un marco de referencia; la energía potencial gravitacional y cinética son formas macroscópicas de energía. Las formas microscópicas de energía del sistema son independientes del marco de referencia externo y están relacionadas con la estructura atómica y molecular y el grado de actividad molecular. La energía interna agrupa todas las formas microscópicas de energía. (Cengel, 2009)

En ausencia de efectos eléctricos, magnéticos y de tensión superficial la energía total se expresa como:

$$E = U + \frac{1}{2} mVel^2 + mgz \quad (2)$$

Expresada por unidad de masa:

$$e = u + \frac{1}{2} Vel^2 + gz \quad (3)$$

La entalpía es otra propiedad termodinámica, la cual está asociada con la energía interna. La entalpía resulta de la combinación de otras propiedades termodinámicas.

$$h = . + pv \quad (4)$$

2.2.2. Energía en tránsito: Calor y Trabajo

Los sistemas intercambian energía por mecanismos o formas de energía que no pueden ser almacenadas, que son reconocidas al cruzar la frontera del sistema y que no son propiedades del sistema y que además dependen del proceso realizado. Para un sistema cerrado estas interacciones de energía son la transferencia de calor (interacciones térmicas) y trabajo (interacciones no térmicas). Una interacción de energía entre dos sistemas es transferencia de calor solamente si es causada por una diferencia de temperatura entre los sistemas. Cualquier otro tipo de intercambio energético es considerado trabajo. (Cengel, 2009)

El trabajo es la transferencia de energía asociada con una fuerza actuando a lo largo de una distancia.

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (5)$$

En el caso del dispositivo cilindro - émbolo se presenta trabajo al tener una fuerza que desplaza el émbolo, este tipo de trabajo, en particular, se conoce como trabajo por deformación de los límites del sistema. La fuerza puede expresarse en términos de presión y el producto del área por el desplazamiento como el volumen.

$$W = \int pAd_s = \int pdV \quad (6)$$

2.2.3. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica es una expresión del principio de conservación de la cantidad de energía. Establece que el cambio de energía total neto para un sistema que experimenta un proceso es igual a la diferencia entre la energía neta que entra y la energía neta que sale del sistema. En el caso de un sistema cerrado los intercambios energéticos solo pueden darse por trabajo o transferencia de calor, y la primera ley de la termodinámica se expresaría como:

$$(Q_{entra} - Q_{sale}) + (W_{entra} - W_{sale}) = \Delta E_{sistema} \quad (7)$$

Existe una expresión alterna en la que se consideran los intercambios netos de calor y trabajo. En esta expresión se utiliza una convención en la que los flujos de calor que entran y los flujos de trabajo que salen del sistema se consideran con signo positivo; y los flujos de calor que salen del sistema y los flujos de trabajo que entran al sistema se consideran con signo negativo.

$$Q - W = \Delta E_{sistema} \quad (8)$$

2.3. PROPIEDADES DE SUSTANCIAS PURAS Y CAMBIOS DE FASE

Se considera sustancia pura a cualquier sustancia con composición química constante y homogénea. Una sustancia pura puede estar compuesta por varios elementos o compuestos químicos siempre que la mezcla sea homogénea. La mezcla de dos o más fases de una sustancia pura también es una sustancia pura siempre que la composición química de cada fase sea la misma.

Las sustancias puras existen en tres fases principales: sólido, líquido y gas. La fase es un arreglo molecular característico, homogéneo e identificable a lo largo de una región. La fase en la que la sustancia existe depende del nivel de energía.

2.3.1. Cambio de fase líquido - vapor

Parte de la termodinámica clásica trata normalmente las fases: líquida y vapor; y las mezclas en equilibrio de las mismas. A continuación, se describe el proceso de cambio de fase líquida a vapor para una sustancia a presión constante. Se considera inicialmente que se tiene una sustancia en fase líquida dentro de un dispositivo cilindro – émbolo en el cual el émbolo puede desplazarse libremente, lo anterior permite que la presión permanezca constante durante el proceso.

Al principio el líquido se encuentra comprimido o subenfriado, es decir, que no está a punto de vaporizarse. Al adicionar energía a la sustancia su temperatura comienza a aumentar y su volumen específico (volumen por unidad de masa) incrementa levemente. La temperatura aumenta hasta que comienza el cambio de fase, cuando se alcanza la temperatura de saturación. Es importante anotar que la temperatura a la que una sustancia cambia de fase depende de la presión absoluta a la que se encuentra la sustancia. Si la presión permanece constante el cambio de fase líquida a vapor ocurre a temperatura constante

La fase líquida de la sustancia a punto de vaporizarse se conoce como líquido saturado, y cualquier adición de energía ocasionaría que algunas moléculas cambien a fase vapor. En este punto si se adiciona más energía ésta se utiliza para evaporar la sustancia y no se manifiesta en cambios de temperatura. A la energía absorbida (o liberada) durante el cambio de fase se le conoce como calor latente (Cengel, Termodinámica, Sexta Edición, 2009).

Durante la evaporación las fases líquido y vapor coexisten en equilibrio, el émbolo se desplaza significativamente y el volumen ocupado por la mezcla crece constantemente. Se continúa adicionando energía hasta que el líquido se evapora completamente. Justo cuando se evapora la última porción de líquido se dice que el vapor está saturado y cualquier remoción de energía ocasionaría algo de condensación. (Cengel, Termodinámica, Sexta Edición, 2009).

Si se continúa adicionando energía la temperatura comienza a incrementar de nuevo y se dice que el vapor se encuentra sobrecalentado. En este estado el vapor no está a punto de condensarse. Se presentan cambios apreciables del volumen específico con la temperatura (Cengel, Termodinámica, Sexta Edición, 2009).

El proceso isobárico descrito previamente puede desarrollarse a distintas presiones. En cada caso el cambio de fase ocurrirá a una temperatura mayor en la medida en que la presión incremente. También con el incremento de presión los volúmenes específicos del líquido saturado y el vapor saturado serán más parecidos. Estos procesos se consignan en un diagrama T-v, como el mostrado en la Figura 1.

El punto en el que los volúmenes específicos del líquido saturado y el vapor saturado son iguales se conoce como el punto crítico. En el punto crítico los estados de líquido saturado y vapor saturado son idénticos. El punto crítico es un estado de las sustancias altamente inestable.

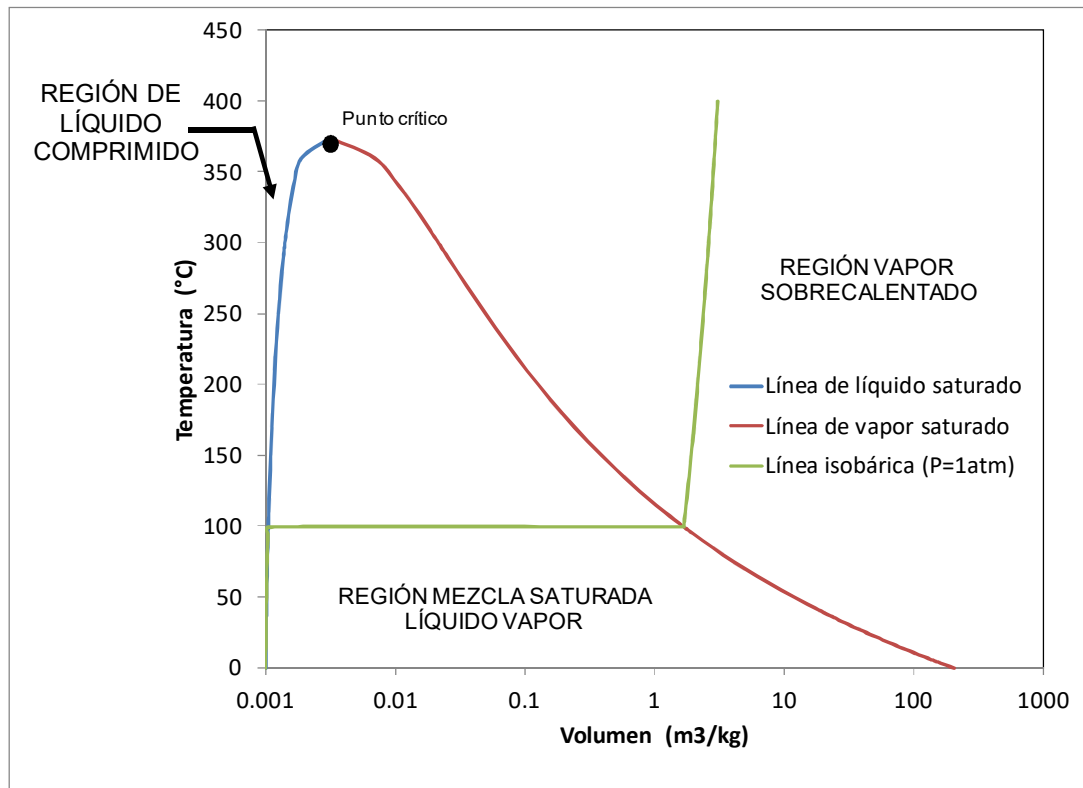


Figura 1 Diagrama Temperatura - Volumen para el agua

2.3.2. Relación entre presión y temperatura de saturación

Como se ha mencionado la presión y la temperatura son variables dependientes durante el cambio de fase. La relación entre estas variables se establece por la ecuación de Clapeyron (Cengel, Termodinámica, Sexta Edición, 2009).

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{sat} = \frac{1}{T} \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \quad (9)$$

La ecuación de Antoine describe la relación empírica entre la presión y la temperatura para sustancias puras. La ecuación de Antoine se deduce de la ecuación de Clapeyron. La ecuación de Antoine expresa que (Fischer, 2003):

$$\log_{10} p_{sat} = A - \frac{B}{C + T} \quad (10)$$

En esta expresión A, B y C son constantes que dependen de la sustancia. Los coeficientes usados comúnmente en la ecuación de Antoine requieren que la temperatura sea expresada en °C y el resultado para la presión de saturación se encuentra en mmHg.

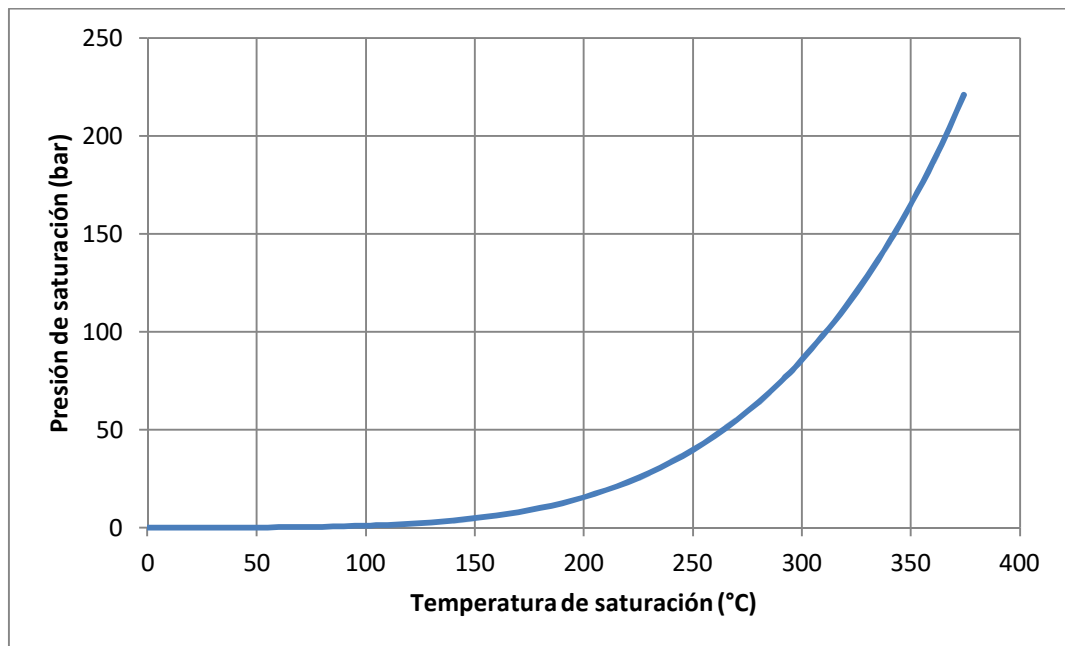


Figura 2 Curva de presión de saturación para el agua

En la Figura 2 se grafica el comportamiento de la presión de saturación con la temperatura para el agua.

2.3.3. Propiedades de mezclas saturadas

Las fases líquido y vapor coexisten en equilibrio durante el cambio de fase, y a este sistema compuesto por ambas fases se le llama mezcla saturada. Para estudiar la mezcla saturada es necesario conocer las proporciones de cada una

las fases, para esto se define una propiedad llamada calidad. La calidad es la fracción másica del vapor en la mezcla saturada (Potter & Scott, 2006).

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}} \quad (11)$$

La calidad solo se define para mezclas saturadas. La calidad es igual a 1 cuando se tiene vapor saturado y 0 cuando se tiene líquido saturado. En la mezcla cada una de las fases tiene sus propiedades, es decir, las que tendría en ausencia de la otra fase. Sin embargo, para estudiar el sistema como un todo homogéneo se definen unas propiedades para la mezcla, haciendo un promedio ponderado de las propiedades de cada una de las fases. Por ejemplo el volumen específico de la fase se encuentra como:

$$v = (1 - x)v_f + xv_g \quad (12)$$

NOMENCLATURA

A : Área del émbolo

E : Energía total del sistema.

e : Energía total específica.

\vec{F} : Fuerza

g : Aceleración de la gravedad.

h : Entalpía específica.

h_{fg} : Entalpía de vaporización. ($h_{fg} = h_g - h_f$)

m : Masa del sistema.

m_{total} : Masa total de la mezcla.

m_{vapor} : Masa de vapor en la mezcla

p : Presión

Q : Transferencia neta de calor.

\bar{s} : Desplazamiento

T : Temperatura.

U : Energía interna del sistema.

u : Energía interna específica.

Vel : Velocidad del sistema respecto a un marco de referencia fijo.

V : Volumen.

v : Volumen específico.

v_f : Volumen específico del líquido saturado.

v_g : Volumen específico del vapor saturado.

v_{fg} : Diferencia entre v_g y v_f . ($v_{fg} = v_g - v_f$).

x : Calidad de la mezcla saturada.

W : Trabajo

z : Elevación del sistema respecto a un marco de referencia fijo.

3. ESTADO DEL ARTE

El dispositivo cilindro – émbolo no representa, en sí mismo, una innovación científica. Es principalmente una aplicación de ingeniería, en la que se articulan un conjunto de elementos tecnológicos ya desarrollados y estudiados. Lo novedoso del proyecto radica en la utilización del dispositivo en ambientes académicos para favorecer la enseñanza. Aplicaciones como estas no son comunes en la literatura científica, por lo cual el estado del arte que se presenta se centra en la instrumentación y los actuadores que se pueden utilizar en el desarrollo del dispositivo cilindro – émbolo para la medición de propiedades y procesos termodinámicos.

El objetivo del dispositivo cilindro – émbolo es la medición de propiedades termodinámicas de sustancias contenidas en él y la evaluación de procesos termodinámicos. Las propiedades termodinámicas a medir son la presión, la temperatura y el volumen; otras propiedades se determinarán mediante alguna relación termodinámica apropiada. Para la evaluación de los procesos es importante conocer los flujos o interacciones de calor y trabajo durante el mismo, por lo cual los sub – sistemas de enfriamiento y calentamiento deben permitir estimar estas variables de manera directa o indirecta.

3.1. ELEMENTOS DE SENSADO

Como se ha mencionado anteriormente las propiedades que se medirán directamente son la presión, la temperatura y el volumen. Este último se estimará a partir del desplazamiento del émbolo. A continuación se presentan algunos aspectos relevantes de la medición de estas propiedades.

3.1.1. Temperatura

La temperatura puede medirse mediante diferentes técnicas. Las técnicas que utilizan efectos directos son:

- Termómetros de líquidos en vidrio. Expansión de líquidos por efecto de la temperatura
- Termómetros de dial llenos de líquido. Expansión de líquidos por efecto de la temperatura
- Termómetros llenos de gas. Expansión de gases por efecto de la temperatura.
- Termómetros de presión de vapor. Cambio de la presión de vapor de líquidos con la temperatura.
- Expansión de sólidos. Termómetros bimetalicos.

Técnicas de medición eléctricas:

- Termómetros de resistencia. Cambio de la resistividad con la temperatura en metales.
- Termistores. Cambio de la resistividad con la temperatura en semiconductores.
- Medición de temperatura a través de semiconductores.
- Termopares. Efecto termoeléctrico.
- Termómetros de radiación. (Hagart-Alexander, 2003)

Para la aplicación propuesta es importante hacer un registro de los datos de temperatura e implementar un sistema de control digital. Por lo anterior, las técnicas de medición eléctricas son las más adecuadas para implementar.

Los termopares entregan una salida de voltaje y su respuesta es aproximadamente lineal. Además, tienen un rango amplio de temperatura de trabajo. Las termopares tipo K son las más comunes, ya que tienen precios moderados y son razonablemente resistentes a la corrosión (Wheeler & Ganji, 2004)

Los detectores de temperatura por resistencias (RTD) son más precisos y estables. Además, pueden ser usados para medir la temperatura directamente, es decir, no necesitan una junta fría de referencia como las termopares (Wheeler & Ganji, 2004). Sin embargo, la sonda suele tener un tamaño mayor, y sus costos son altos.

Los termómetros de radiación requieren de exigentes procesos de calibración con las propiedades de las superficies para tener medidas acertadas. Los dispositivos basados en semiconductores suelen fabricarse encapsulados, y normalmente no pueden sumergirse en líquidos.

3.1.2. Presión

Existen tres métodos básicos para medir presión: principio hidrostático con un líquido como fluido manométrico, medición de la fuerza resultante en un área o medición del esfuerzo o deformación en un miembro elástico. Estos métodos dan lugar a distintos instrumentos para la medición de presión:

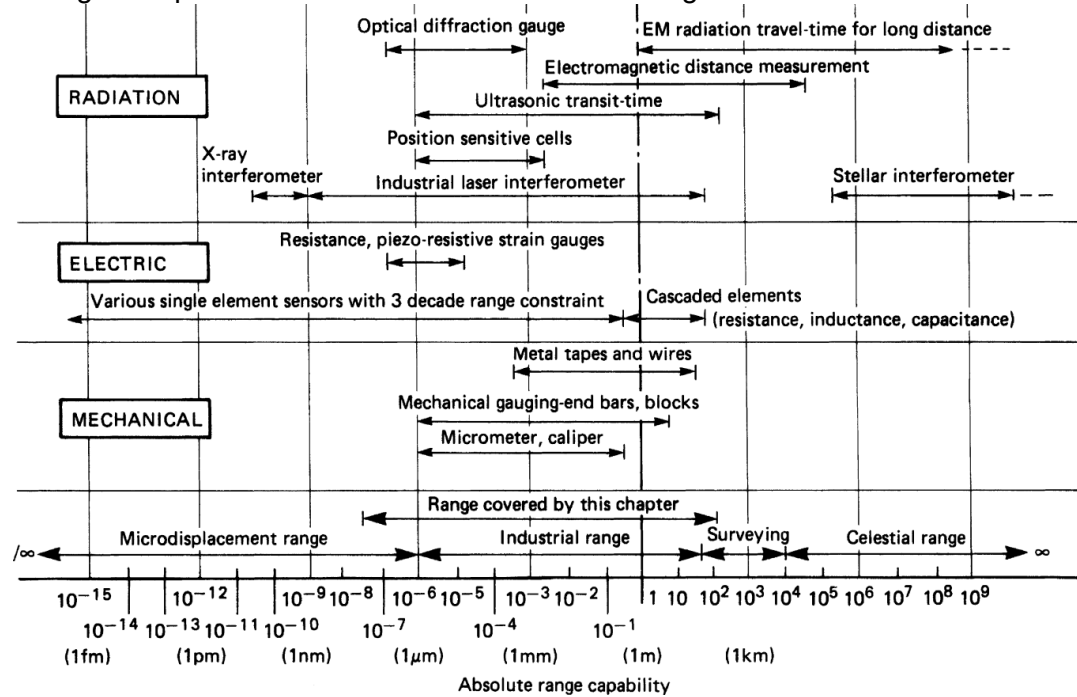
- Manómetros de mercurio.
- Manómetros de peso muerto.
- Sensores de presión piezoresistivos.
- Sensores de presión con galgas de deformación.
- Sensores de presión digitales de cristal de cuarzo. (Higham & Paros, 2003)

Nuevamente, los sensores a utilizar son aquellos que permitan obtener salidas digitales, para el caso de la presión son: sensores piezoresistivos, galgas de deformación y sensores digitales de cristal de cuarzo. Comercialmente, es común encontrar transductores de presión que utilizan el principio de las galgas de deformación o de los sensores piezoresistivos.

3.1.3. Desplazamiento

La unidad SI para la longitud es el m (metro). Hay dos categorías para la medición de la longitud: determinación del valor absoluto y determinación del cambio en la longitud o longitud relativa. De la medición de longitud se derivan otros parámetros como: área, volumen, ángulo, velocidad, aceleración, entre otros. En la figura 1 se presentan algunos instrumentos para la medición de desplazamiento con su rango de aplicación. (Sydenham, 2003)

Figura 3 Rango de aplicación de diferentes sensores de longitud



(Sydenham, 2003)

Para determinar la posición son de uso común los encoders, los cuales utilizan un disco con sectores blancos y negros para detectar la rotación. La precisión de los encoders depende, principalmente, del número de bits utilizados para representar cada posición (resolución de las marcas oscuras). Los encoders se utilizan típicamente para controlar posiciones angulares (Wheeler & Ganji, 2004). Sin embargo, pueden utilizarse para detectar desplazamiento lineales, si se utilizan bandas con sectores blancos y negros.

Para la aplicación propuesta los encoders representan una opción óptica – mecánica apropiada. La precisión requerida está alrededor de 1mm y las magnitudes de los desplazamientos son del orden de centímetros.

3.2. ELEMENTOS DE ACTUACIÓN

Los procesos a evaluar en el dispositivo cilindro – émbolo requieren de enfriamiento y calentamiento. La adición o remoción de calor debe ser ejecutada por dispositivos que permitan el control de temperatura y la determinación de la razón de transferencia de calor.



3.2.1. Calentamiento


Algunos principios físicos por los cuales se puede hacer un calentamiento son:

- Resistencia eléctrica
- Inducción eléctrica
- Microondas termoelectricidad.
- Reacciones químicas y combustión
- Radiación
- Flujo de fluidos calientes
- Fricción (Doebelin, 1995)

El calentamiento eléctrico es el más usado comúnmente, mediante resistencias eléctricas de calentamiento. Las resistencias se fabrican normalmente de alguna aleación de níquel-cromo. Las resistencias eléctricas se producen con distintas geometrías como: cartuchos, calentadores tubulares, anillos, discos, tira y bandas (Doebelin, 1995). En la figura se presentan algunos de ellos y sus características

Tabla 1 Tipos de resistencias de calentamiento

TIPO DE ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS
<p data-bbox="298 779 602 806">Calentadores tubulares</p> 	<p data-bbox="764 779 1052 806">Diámetro: 0.2 – 0.48in</p> <p data-bbox="764 831 1024 858">Longitud: hasta 15ft</p> <p data-bbox="764 884 1068 911">Potencia: hasta 7500W</p> <p data-bbox="764 936 1276 963">Temperatura de trabajo: 250°F – 750°F</p>
<p data-bbox="298 1325 435 1352">Cartuchos</p> 	<p data-bbox="764 1325 1029 1352">Diámetro: 0.25 – 1in</p> <p data-bbox="764 1377 1024 1404">Longitud: 1.5in – 3ft</p> <p data-bbox="764 1430 1057 1457">Potencia: 50 - 5000W</p> <p data-bbox="764 1482 1260 1509">Temperatura de trabajo: hasta 1600°F</p>

TIPO DE ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS
<p>Componentes para calentamiento: Tiras, anillos y discos</p> 	<p>Temperatura de trabajo: 250°F – 950°F</p> <p>Espesor: 0.38 in</p> <p>Tiras</p> <p>Ancho: 0.75 – 2.5in</p> <p>Longitud: 5 – 96in</p> <p>Potencia: 150 – 4500W</p> <p>Anillos</p> <p>Diámetro externo: 3 – 11in</p> <p>Potencia: 125 – 1800W</p> <p>Discos</p> <p>Diámetro: 2.3 – 3.3in</p> <p>Potencia: 150 – 600W</p>
<p>Banda y boquilla</p> 	<p>Diámetro: 1.3 – 20in</p> <p>Potencia: 500 – 500W</p> <p>Temperatura de trabajo: hasta 1500°F</p>

(Doebelin, 1995) y (CHROMALOX)

El calentamiento por inducción eléctrica y microondas tiene un amplio uso en aplicaciones industriales. Sin embargo, en ambientes experimentales a pequeña escala estos principios se utilizan menos, puesto que tienden a ser sobredimensionados y costos. (Doebelin, 1995)

3.2.2. Enfriamiento

Igual que para el calentamiento, existen diferentes principios físicos por los cuales se puede producir enfriamiento. A continuación, se listan algunos:

- Sistemas de refrigeración con compresión
- Gases licuados
- Termoelectricidad
- Hielo
- Reacciones químicas
- Flujo de fluidos fríos (Doebelin, 1995)

Los sistemas de refrigeración por compresión pueden resultar costos y complejos en una escala experimental. Igualmente, los gases licuados pueden presentar algunos problemas de manejo.

El uso del cambio de fase, como es el caso del hielo, puede limitar las temperaturas de enfriamiento, ya que los procesos de cambio de fases son isotérmicos. Las reacciones químicas también pueden tener problemas de control e implementación.

En la aplicación propuesta es importante controlar la temperatura y determinar el calor removido. De esta manera, los mecanismos más apropiados son la termoelectricidad, a través de celdas Peltier, y el flujo de fluidos fríos, a través de intercambiadores de calor; o una combinación de ambos principios.

Las celdas Peltier tienen potencias de enfriamiento bajas que pueden llegar hasta los 100W. Son placas fabricadas de semiconductores, en las cuales la aplicación de un voltaje provoca que en un lado de la placa se absorba calor (baja temperatura) y en el otro se libere calor (alta temperatura). Normalmente, son cuadradas o rectangulares con anchos en un rango de 8 - 40mm y espesores en un rango de 3 – 7 mm. Para su correcta operación es necesario garantizar la

disipación de calor en el lado de alta temperatura, para lo cual se utiliza normalmente un sistema de intercambio de calor con aletas y ventiladores.
(FUJITAKA)

4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO CILINDRO – ÉMBOLO

En esta sección se describe el proceso de diseño del dispositivo cilindro – émbolo. Como se ha mencionado, el dispositivo cilindro – émbolo consiste básicamente de un contenedor cilíndrico con una de sus tapas móviles. El diseño del dispositivo debe garantizar un buen sello, para que la sustancia contenida no pueda salir, inclusive cuando la presión se incrementa por efecto del calentamiento. Además, el dispositivo dispone de elementos para el calentamiento de la sustancia. También, tiene instrumentos de medición de temperatura, presión y volumen o desplazamiento del émbolo. Las variables medidas son monitoreadas y registradas por computador.

El dispositivo cilindro – émbolo tiene propósitos didácticos, por lo cual debe resultar transparente para sus usuarios, que son estudiantes. El hecho que su uso sea para la enseñanza libera en parte las exigencias en cuanto a precisión en la medición de las propiedades e incrementa la necesidad de evidenciar claramente el fenómeno.

4.1. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

El dispositivo cilindro – émbolo debe cumplir una serie de requerimientos de diseño relacionados con distintos aspectos de operación, mantenimiento e interacción con el usuario. A continuación, se describen estos requerimientos.

Geometría:

- El dispositivo debe ser portable por lo cual sus dimensiones deben ser tales que pueda ser transportado por una persona.
- El diámetro del cilindro debe ser tal que permita afectar la presión en el interior (en al menos 5psi) con cargas moderadas (menores a 20kgf).

- Es deseable tener un mecanismo para fijar la posición del émbolo y así fijar el volumen.
- Las dimensiones del dispositivo deben ajustarse a la siguiente tabla.

Tabla 2 Dimensiones permisibles del dispositivo cilindro – émbolo

Dimensión	Rango permisible
Altura	50 – 100 cm
Ancho	10 – 40 cm
Profundidad	10 – 40 cm
Diámetro del cilindro	3 – 8 cm

Materiales:

- El material del contenedor debe ser liviano y fácil de manufacturar.
- Debe existir compatibilidad química entre el material del contenedor y las sustancias de trabajo.
- Las sustancias de trabajo deben cumplir con los requerimientos especificados en la sección de selección de las mismas.

Energía:

- La alimentación eléctrica es a 120V de corriente alterna.
- Las pérdidas de calor deben ser bajas.
- Se debe disponer de un elemento para el calentamiento.
- Es deseable tener un elemento para el enfriamiento.
- La temperatura máxima de operación es 200°C.

Fuerza:

- Las presiones manométricas de operación están en un rango de -12.5psi a 100psi.
- Es deseable poder aplicar carga sobre el émbolo a través de masas o un resorte.

Masa:

- La masa no debe exceder los 10kg.

Condiciones ambientales de operación:

- La temperatura ambiente se encuentra entre 15°C y 35°C.
- La humedad relativa se encuentra entre el 20% y el 80%.

Monitoreo, control e instrumentación:

- Sensor de presión con una señal de salida eléctrica.
- Sensor de temperatura con una señal de salida eléctrica.
- Sensor de posición del émbolo con una señal de salida eléctrica.
- Es deseable tener un control de temperatura.
- El monitoreo debe hacerse por computador.
- Debe tener una interfaz de visualización y registro de los datos sensados durante las pruebas.

Ergonomía y operación:

- Debe tener una interfaz amigable con el usuario.

- El fenómeno físico debe resultar transparente para el usuario.
- Debe ser portátil.
- Debe ser fácil de armar y desarmar.
- Procesos a ejecutar: cambio de fase líquido – vapor a presión constante y a volumen constante.

Seguridad:

- Debe disponer de elementos de alarma que se activen por señales de presión.
- Es deseable que tenga una válvula de seguridad.

Manufactura:

- Procesos de mecanizado básicos como son: taladrado, torneado y fresado.

4.2. SELECCIÓN DE LAS SUSTANCIAS DE TRABAJO

Las sustancias de trabajo son las sustancias que se ingresan al dispositivo cilindro – émbolo para ejecutar los procesos y medir sus propiedades.

4.2.1. Requerimientos para las sustancias de trabajo

Las sustancias de trabajo deben cumplir con una serie de características las cuales se listan a continuación:

- No deben representar un riesgo para la salud humana.
- Deben ser de fácil consecución y no deben tener restricciones legales para su comercialización.
- Estar en fase líquida a condiciones estándar (20°C y 1atm)
- Bajo consumo de energía para el cambio de fase líquida a vapor.

- Temperatura de saturación menor a 180°C a 1atm de presión.
- Ser compatibles químicamente con el material del cilindro.
- Tener bajo impacto ambiental.
- Manipulación segura.
- Bajo costo.

4.2.2. Evaluación de las posibles sustancias de trabajo

Se selecciona un conjunto inicial de sustancias que son líquidas a condiciones normales y tienen puntos de ebullición adecuadas. A este conjunto se le evalúan las características de riesgo para la salud humana, impacto ambiental y manipulación segura. En la siguiente tabla se presentan las conclusiones de dicha evaluación:

Tabla 3 Evaluación sustancia de trabajo (Impacto ambiental, Salud humana, Seguridad)

SUSTANCIA	RIESGO
Freón 22 (R22)	Daño capa de ozono
Freón 11 (R11)	Daño capa de ozono
Freón 21 (R21)	Daño capa de ozono
Amoníaco	Riesgo para la salud humana
Pentano	Inflamable
Acetona	Inflamable
Metanol	Riesgo para la salud humana
Etanol	Inflamable
Heptano	Inflamable
Agua	Ninguno
Tolueno	Riesgo para la salud humana

Se eliminan del conjunto de posibles sustancias las que presenta riesgos para la salud humana y dañan la capa de ozono. El riesgo de inflamabilidad se puede controlar con una manipulación segura. Se hace una segunda evaluación sobre el conjunto restante de acuerdo con las restricciones para la consecución de las

sustancias. Las conclusiones de esta evaluación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4 Evaluación sustancia de trabajo (restricción consecución)

SUSTANCIA	RESTRICCIÓN
Pentano	Alto costo
Acetona	Comercialización restringida
Etanol	Costo dependiente de la pureza
Heptano	Alto costo
Agua	Ninguno

La segunda evaluación restringe el grupo de sustancias a agua y etanol. Debe aclararse que se pretende trabajar con alcohol etílico con una pureza del 96%, el cual puede conseguirse con relativa facilidad. La no utilización de una sustancia pura puede presentar cierto error en las propiedades determinadas, pero debe recordarse que el uso del dispositivo es didáctico y estos aspectos pueden servir para enriquecer la discusión académica.

En cuanto a consumo de energía para la evaporación el agua presenta desventajas dada su alta entalpía de vaporización. En este sentido resulta interesante utilizar otra sustancia, además del agua, para hacer comparaciones en cuanto a propiedades termodinámicas. En la Figura 4 se presenta el comportamiento de la entalpía con la temperatura, tanto para el agua como para el etanol, a 85kPa de presión durante el cambio de fase.

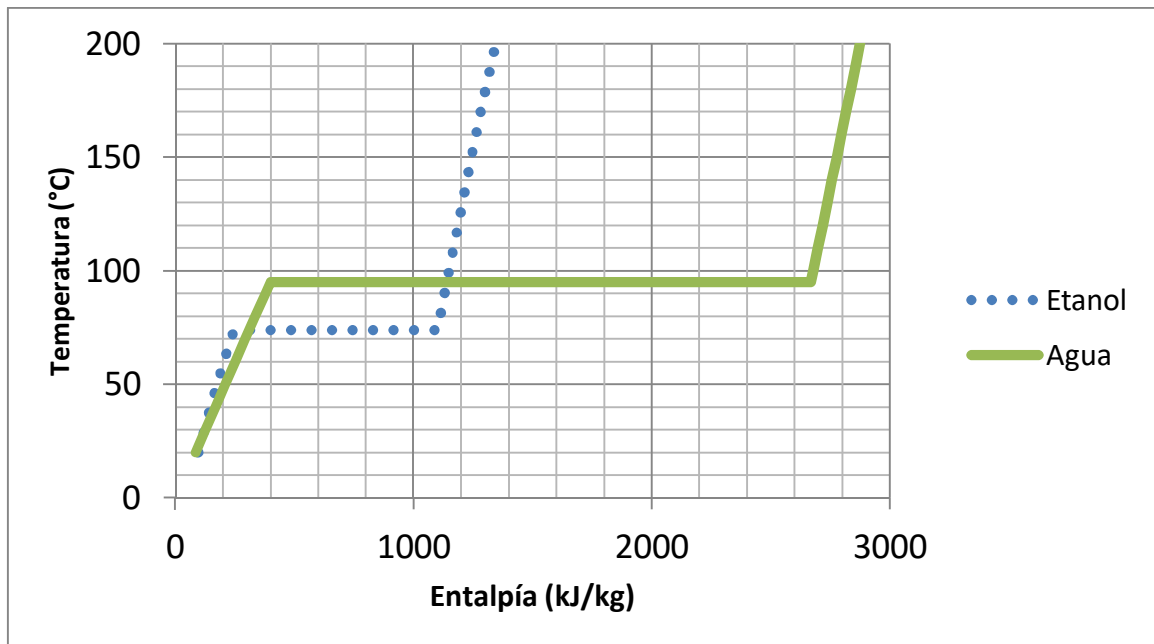


Figura 4 Entalpía durante el cambio de fase para el agua y el etanol ($p = 85\text{kPa}$)

4.2.3. Otras sustancias de trabajo

Es posible utilizar otras sustancias de trabajo para evaluar distintos fenómenos. Por ejemplo, se podría utilizar glicerina para analizar la expansión de la fase líquida con la temperatura. En este caso no se pretendería analizar el proceso de cambio de fase, dado el alto punto de ebullición de esta sustancia. También se pueden utilizar mezclas de líquidos con gases, como es el caso del agua con gas (dióxido de carbono) para evidenciar expansiones más dramáticas. La implementación de estas experiencias depende del impacto positivo que tengan en procesos de aprendizaje.

4.3. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LOS ELEMENTOS

A continuación, se describe el proceso de evaluación de alternativas de solución para distintos elementos del dispositivo cilindro – émbolo. En cada caso se exponen los criterios que llevaron a la decisión final de diseño.

4.3.1. Material para el cilindro

Los materiales que se consideraron para fabricar el cilindro fueron: acero inoxidable, latón y aleación de aluminio. Se consideró este conjunto inicial de materiales por su resistencia a la corrosión. No se consideraron polímeros porque se requiere de estabilidad dimensional a temperaturas superiores a 150°C. Además, a través del cilindro se difunde el calor, favoreciendo que la distribución de temperaturas sea homogénea, por lo cual es importante que el material tenga alta conductividad térmica. Para la selección del material del cilindro se tienen como criterios: baja densidad, alta difusividad térmica, bajo costo y alta compatibilidad química con las sustancias de trabajo.

En la Tabla 5 se resume el proceso de evaluación para la selección del material del contenedor. De este proceso se concluye que el material más apropiado, de acuerdo con los criterios, es una aleación de aluminio. El único aspecto desfavorable del uso de este material es la compatibilidad con la sustancia de trabajo. El agua estancada causa un proceso de erosión en el aluminio, este proceso debe prevenirse manteniendo el dispositivo seco (sin sustancia de trabajo), cuando se encuentre fuera de operación.

Tabla 5 Evaluación posibles materiales para el cilindro

MATERIAL		Aleación de Aluminio	Acero Inoxidable (304)	Bronce
DENSIDAD (g/cm ³)	Valor	2.70	8.00	8.80
	Puntaje	1.00	0.33	0.31
DIFUSIVIDAD TÉRMICA (m ² /s)	Valor	74.57E-06	4.05E-06	57.12E-06
	Puntaje	1.00	0.05	0.76
COMPATIBILIDAD CON LA SUSTANCIA DE TRABAJO	Valor	Media	Alta	Alta
	Puntaje	0.50	1.00	1.00
COSTO	Valor	Medio	Alto	Alto
	Puntaje	1	0.5	0.5
TOTAL		3.50	1.88	2.57

4.3.2. Sistema de calentamiento

Las opciones para el sistema de calentamiento consideradas en la presente aplicación son: resistencias eléctricas o flujo de fluidos calientes. Otras opciones como el calentamiento por microondas y la inducción eléctrica pueden resultar sobredimensionadas y tener un costo muy alto, como se menciona en el estado del arte. Las reacciones químicas se descartan porque podrían resultar difíciles de controlar y de determinar la energía consumida.

El calentamiento con resistencias eléctricas es seleccionado entre las dos opciones consideradas. La razón de esta decisión es la sencillez en el diseño y los requerimientos de portabilidad y alimentación eléctrica. Para disponer de fluidos calientes se requiere de un subsistema para su calentamiento y circulación.

4.3.3. Sistema de enfriamiento

Las opciones para el enfriamiento tenidas en cuenta son el uso de fluidos fríos, las celdas Peltier y el enfriamiento natural. El uso de fluidos fríos es descartado por la misma razón que se descarta el uso de fluidos para el calentamiento. Las celdas Peltier son una buena opción puesto que su principio de operación es eléctrico, pero tienen bajas potencias de enfriamiento. El enfriamiento por convección natural es pasivo, pero tarda mucho tiempo. Finalmente, se decide utilizar una combinación de enfriamiento natural y celdas Peltier. Sin embargo, en el desarrollo del proyecto se presentan dificultades de carácter geométrico para acoplar las celdas al cilindro y el enfriamiento es sólo por convección natural.

4.4. DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS

El proceso de cálculo de las dimensiones mínimas de algunos elementos del dispositivo es descrito en esta sección. La definición de las dimensiones mínimas de elementos mecánicos tiene en cuenta la seguridad del diseño en cuanto a

resistencia mecánica. También, se determina la potencia eléctrica mínima requerida en las resistencias de calentamiento. En la Figura 5 se presenta la nomenclatura utilizada en esta sección para las dimensiones básicas del dispositivo.

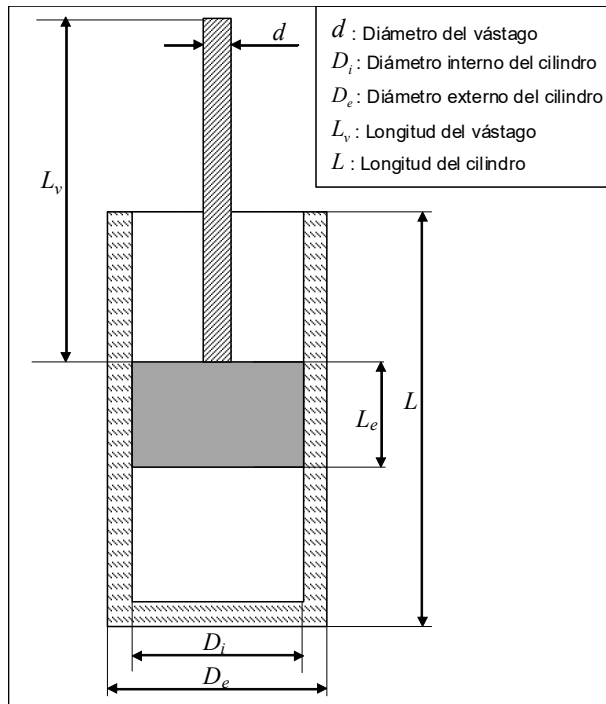


Figura 5 Nomenclatura de las dimensiones básicas

4.4.1. Cilindro

El espesor requerido para la pared del cilindro se determina mediante la siguiente ecuación (Annaratone, 2007):

$$e = \frac{pD_e}{2S_d + p} \quad (1)$$

El esfuerzo permisible se encuentra como:

$$S_d = \frac{S_y}{FS} \quad (2)$$

Para una aleación de aluminio 1060 se tienen las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 6 Propiedades mecánicas aleación de aluminio 1060

PROPIEDAD	VALOR
Modulo de elasticidad	68.9GPa
Esfuerzo de cedencia	17MPa
Coefficiente de Poisson	0.33

La presión máxima que debe soportar el cilindro, de acuerdo con los requerimientos de diseño, es 100psi (689.48kPa). Además, se utiliza un factor de seguridad de 2. Con los valores anteriores el espesor de la pared del cilindro debe ser de $0.039D_e$, o en términos del diámetro interno $0.036D_i$. El diámetro interno seleccionado para el cilindro es 63mm, para el cual el espesor mínimo es 2.27mm.

4.4.2. Vástago

El vástago es un elemento esbelto sometido a compresión, por lo cual el diámetro del mismo se determina utilizando el criterio de carga crítica de pandeo. El vástago se puede considerar como una columna con un extremo empotrado y el otro libre, por su condición de operación. Para este caso la carga crítica de pandeo es (Shigley & Mischke, 2002):

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L_v^2} \quad (3)$$

La carga admisible para el diseño debe ser menor a la carga crítica por razones de seguridad. La carga admisible se ve afectada por el factor de seguridad.

$$F_{adm} = \frac{F_{cr}}{FS} \quad (4)$$

La carga admisible está relacionada con la presión de diseño de la siguiente manera.

$$F_{adm} = \frac{\pi}{4} p D_i^2 \quad (5)$$

Además, la inercia para una sección circular es.

$$I = \frac{\pi}{64} d^4 \quad (6)$$

Combinando las expresiones anteriores se encuentra que el diámetro del vástago debe ser como mínimo:

$$d = \sqrt[4]{\frac{L_v D_i}{\pi} \left(\frac{128 p}{E} \right)} \quad (7)$$

El material del vástago es acero 1045, el cual tiene las propiedades mecánicas:

Tabla 7 Propiedades mecánicas acero 1045

PROPIEDAD	VALOR
Modulo de elasticidad	200GPa
Esfuerzo de cedencia	530MPa
Coeficiente de Poisson	0.33

La siguiente expresión para el diámetro del vástago en función del diámetro interno del cilindro y de la longitud del vástago se encuentra utilizando las

propiedades mecánicas del acero 1045 y considerando como presión de diseño 689.48kPa.

$$d = 0.0818\sqrt{D_i L} \quad (8)$$

La longitud del vástago es 500mm y el diámetro interno del cilindro es 63mm, con estos parámetros el diámetro mínimo del eje es 14.5mm.

4.4.3. Sellos y sus alojamientos

Los sellos para el émbolo son tipo o-ring y su material es viton® (marca registrada por DuPont Performance Elastomers L.L.C.). El viton® es un compuesto de caucho sintético y fluoroelastómero, el cual tiene un buen desempeño hasta 160°C (Argensold).

Los o-rings con sección transversal de 5.33mm son los recomendados para el sello mecánico y el diámetro interno del cilindro establecido por los requerimientos de diseño. Las dimensiones apropiadas para el alojamiento y la tolerancia diametral cuando se usa un o-ring con esta sección transversal se listan en la tabla (Parker, 2011).

Tabla 8 Dimensiones para alojamiento de los sellos

Dimensión	Valor (mm)
Profundidad del alojamiento	4.699 – 4.775
Ancho del alojamiento	7.137 - 7.264
Radio de la ranura	0.508 – 0.889
Tolerancia diametral	0.076 – 0.152

El diámetro interno del émbolo es 63mm para el cual la referencia Parker de o-ring más apropiada es la 2-329.

4.4.4. Resistencias de calentamiento

La potencia eléctrica requerida se determina garantizando que la temperatura de equilibrio sea por lo menos la temperatura máxima de operación. La temperatura de equilibrio es la temperatura en la cual la razón a la que se pierde calor se iguala a potencia eléctrica suministrada. Para valorar la razón máxima a la que se pierde calor se supone que el cilindro se encuentra desnudo o sin aislamiento.

$$\dot{Q}_{p,\max} = hA_s (T_{\max} - T_{\infty}) \quad (9)$$

El área superficial es el área externa del cilindro:

$$A_s = \pi D_i L \quad (10)$$

La potencia eléctrica requerida se estima con la condición de equilibrio térmico.

$$W_{elec} = \pi D_e L h (T_{\max} - T_{\infty}) \quad (11)$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección natural con gases se encuentran típicamente entre $2\text{W/m}^2\text{°C}$ y $25\text{W/m}^2\text{°C}$ (Cengel, Transferencia de calor y de masa, 2007). Para efectos de diseño se toma como coeficiente de convección es $25\text{W/m}^2\text{°C}$. La temperatura máxima de operación, de acuerdo con los requerimientos de diseño, es 200°C y la temperatura ambiente mínima es 15°C . La longitud del cilindro es 350mm , el diámetro interno 63mm y el espesor 2.85mm . Con los parámetros anteriores la potencia eléctrica mínima de diseño es 344W .

4.5. DETALLES DEL DISEÑO

Algunos detalles del diseño final del dispositivo se presentan a continuación.

4.5.1. Cilindro

En el desarrollo del proyecto se encuentra un actuador neumático completo con camisa en aluminio, que cumple con los requisitos de diseño del dispositivo. Se decide utilizar este cilindro puesto que ya ha sido rectificado y dispone de sus tapas, lo que facilita la manufactura y el montaje. También, se utiliza el vástago de este actuador neumático, puesto que acopla correctamente en una de las tapas. En la Figura 6 se presenta la modelación geométrica que se realizó del cilindro con sus tapas, mayores detalles se encuentran en los planos técnicos que se anexan.



Figura 6 Cilindro neumático utilizado

4.5.2. Émbolo

El émbolo se fabrica en duraluminio, tiene una longitud total de 60mm y su diámetro de 62.9mm garantiza el ajuste requerido para los sellos tipo o-ring. En el émbolo, se mecanizan los alojamientos para los sellos. Además, se hace un alojamiento para el vástago y una perforación roscada para acoplar un termo-pozo

para el sentido de temperatura. En la Figura 7 se muestra el diseño básico del émbolo.

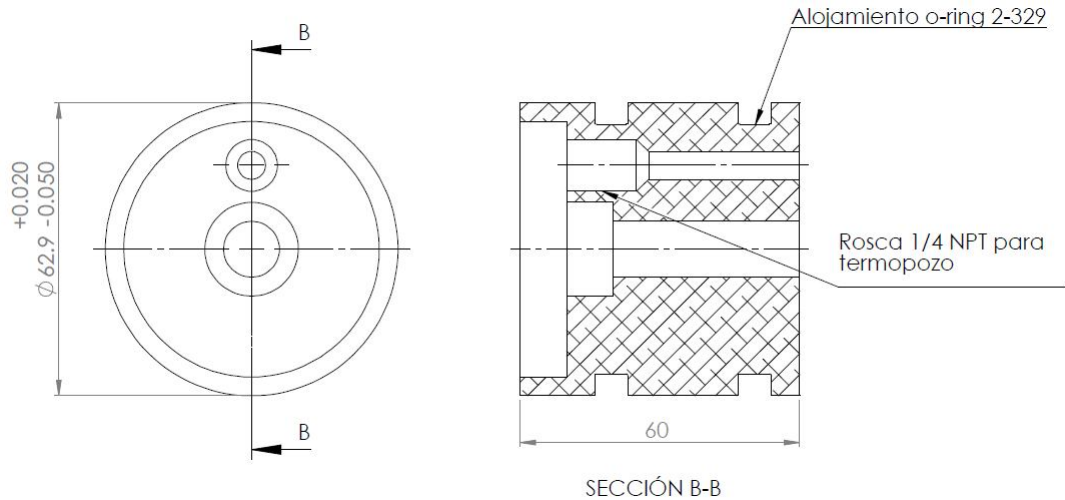


Figura 7 Detalle diseño del émbolo

4.5.3. Múltiple para la toma de señales

En la tapa inferior del cilindro se ensambla un múltiple para la adquisición de señales de presión y temperatura; y además para acoplar la válvula de carga del dispositivo. Este múltiple está conformado por accesorios estándar de rosca un 1/4" NPT: dos uniones en T, una unión en cruz, tres uniones rectas roscadas, un codo y un tapón. Al múltiple se acoplan un manómetro, un transductor de presión un termo-pozo y una válvula para la carga del sistema. En la Figura 8, se muestra una imagen del múltiple con los elementos acoplados.

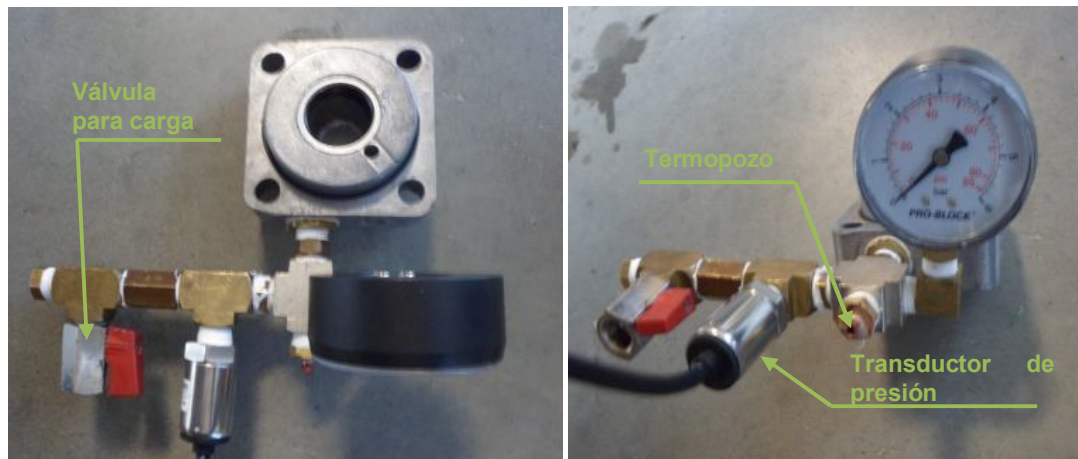


Figura 8 Múltiple para la toma de señales

4.5.4. Montaje resistencias

El calentamiento del dispositivo se realiza mediante cuatro resistencias planas sin recubrimiento que se ponen a lo largo del cilindro. Se calienta toda la pared del cilindro para garantizar homogeneidad en las temperaturas. Estas resistencias son presionadas hacia el cilindro mediante unos injertos de aluminio los cuales son ajustados por una abrazadera metálica. Lo anterior, se hace para favorecer la transferencia de calor hacia el cilindro y proteger las resistencias de calentamiento; ya que si estas no pueden disipar el calor que generan, su temperatura aumenta y podrían fundirse. En la Figura 9, se muestra una fotografía del cilindro con las resistencias de calentamiento acopladas.



Figura 9 Cilindro con resistencias de calentamiento acopladas

NOMENCLATURA

A_s : Área superficial.

d : Diámetro del vástago.

D_e : Diámetro externo del cilindro.

D_i : Diámetro interno del cilindro.

E : Módulo de Young del material

e : Espesor de pared del cilindro

F_{cr} : Carga crítica de pandeo.

F_{adm} : Carga admisible de compresión sobre el vástago.

FS : Factor de seguridad.

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

I : Momento de inercia o segundo momento de área.

L_v : Longitud del vástago.

p : Presión manométrica soportada por el cilindro.

$\dot{Q}_{p,max}$: Razón de pérdida de calor máxima

S_d : Esfuerzo permisible.

S_y : Esfuerzo de cedencia

T_{max} : Temperatura máxima de operación.

T_∞ : Temperatura ambiente.

5. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO

En esta sección se describe la forma como se instrumenta el dispositivo y se monitorean y registran los datos durante la operación. Primero se describen los sensores utilizados para la medición de la temperatura, la presión y el desplazamiento. Luego se presentan algunos detalles del sistema de adquisición de datos y de los circuitos electrónicos de amplificación requeridos. Finalmente, se describe la aplicación desarrollada en el software LabVIEW para el monitoreo y registro de los datos.

5.1. SENSORES

A continuación, se especifican algunos detalles de los instrumentos utilizados para la medición de la temperatura, la presión y la posición del émbolo.

5.1.1. Temperatura

La temperatura es sensada por termopares tipo K con la unión desnuda. Se utiliza este tipo de sensor por razones de costo y facilidad de implementación. Los termopares se fabrican a partir de alambre para termopar tipo K calibre 30 con recubrimiento de fibra de vidrio. Las características geométricas de los termopares facilitan su inserción en los termo-pozos acoplados al dispositivo cilindro – émbolo.

Los termopares operan bajo el efecto termoeléctrico y entregan una señal de voltaje del orden de mV. Esta señal de voltaje es proporcional a la diferencia entre temperatura de la junta y la temperatura de los terminales (temperatura ambiente). Se hace un proceso de caracterización del termopar utilizado en el que se le sumerge en medios con distinta temperatura y se mide la diferencia de potencial en los terminales de salida. Este proceso permite corroborar la linealidad en la respuesta y encontrar la ganancia. En la Figura 10, se presentan los resultados del proceso de caracterización del termopar.

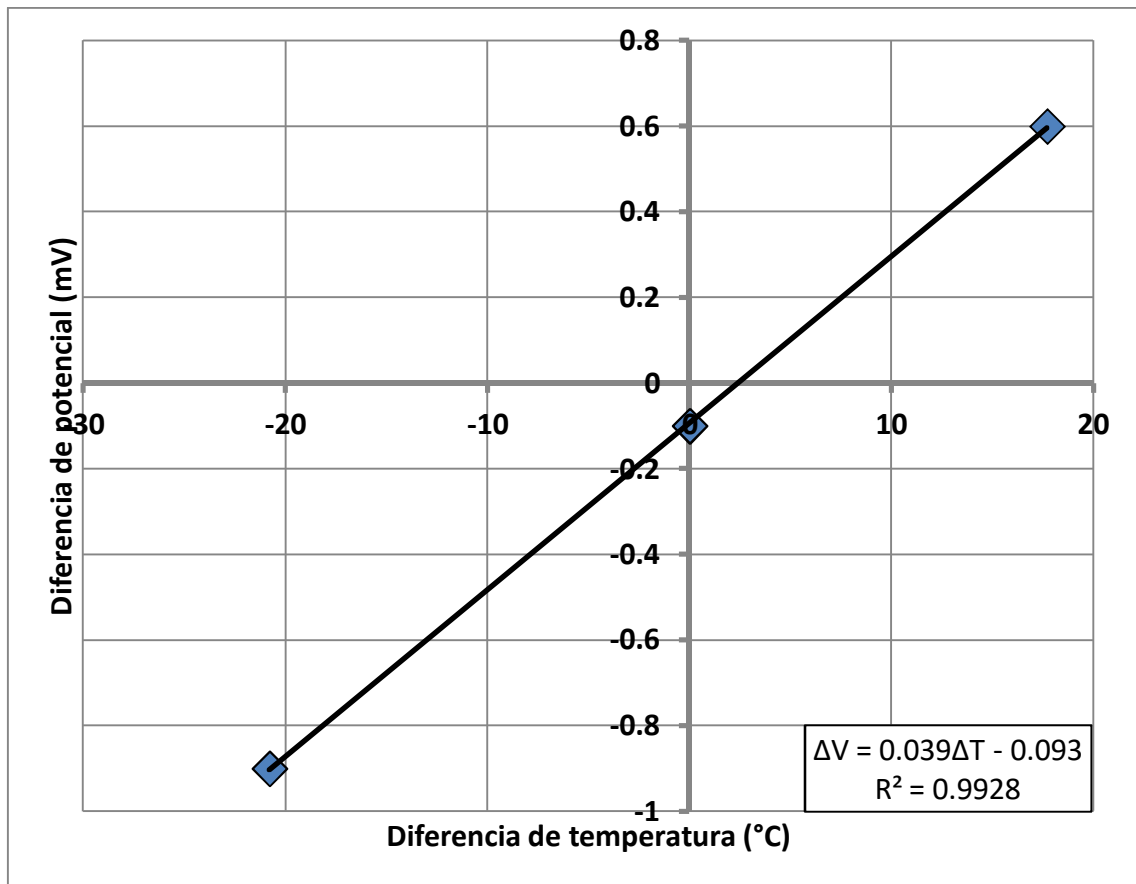


Figura 10 Curva característica del termopar

Se observa que la respuesta del termopar es lineal en el rango en que se caracteriza. Además, que la pendiente es $0.039\text{mV}/^\circ\text{C}$.

La señal del termopar, como se ha mencionado, es relativa a la temperatura en los terminales, por lo cual se requiere de un sensor de temperatura ambiente. El circuito integrado LM 35 se utiliza para este fin.

5.1.2. Presión

La presión es sensada por un transductor de presión que entrega una salida en voltaje ($0.5\text{-}4.5\text{V}$). El transductor mide presión manométrica, es fabricado por SSI Technologies y utiliza tecnología piezoresistiva. Se utiliza este sensor de presión puesto que su salida puede ingresarse fácilmente el sistema de adquisición de datos, además, el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad EAFIT dispone de

uno de estos sensores. En la Tabla 1, se presentan algunas características técnicas del sensor utilizado.

Tabla 9 Características técnicas transductor de presión

Rango de medida	0 – 30 psi
Señal de salida	0.5 – 4.5V
Precisión	+/- 1% de la escala plena
Rango de temperaturas	-40°C – 105°C
Alimentación	5V

(SSI Technologies, 2011)

5.1.3. Desplazamiento

El movimiento lineal del vástago se convierte en un movimiento rotacional, para medir el desplazamiento del vástago. El movimiento de rotación se monitorea con un encoder de 100 pulsos por vuelta. Al eje del encoder se acopla una polea en la cual se pone un o-ring, el cual actúa como banda de fricción. El sistema se fija de tal manera que la banda esté en contacto con el vástago. La salida del encoder es una señal digital.

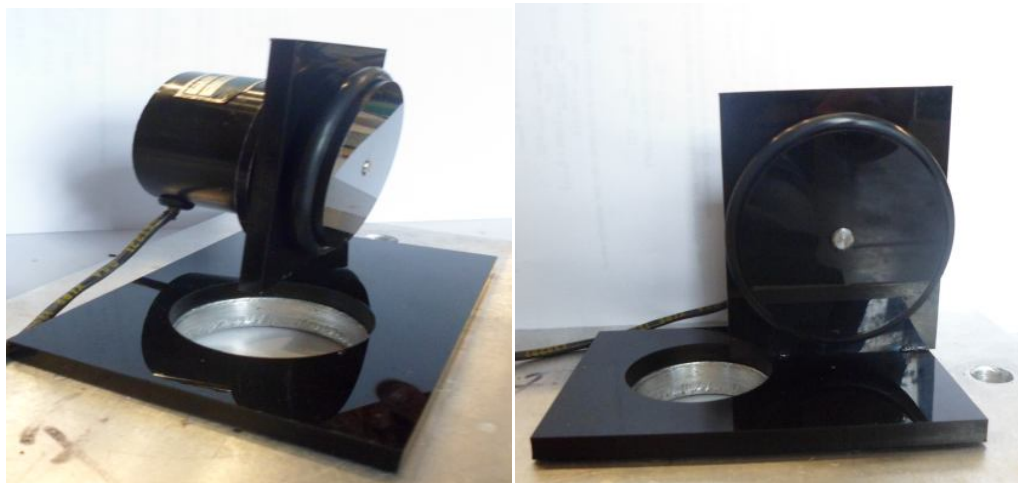


Figura 11 Sistema para el sensado de posición del émbolo

5.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los valores sensados por los instrumentos de medición descritos previamente son acondicionadas y transferidos al PC por medio de una tarjeta de adquisición de datos. A continuación, se exponen algunas características de la tarjeta de adquisición utilizada. También, se describen los circuitos de acondicionamiento utilizados para las señales que lo requieren. En la Figura 12, se muestra una imagen de la tarjeta de adquisición y los circuitos electrónicos.

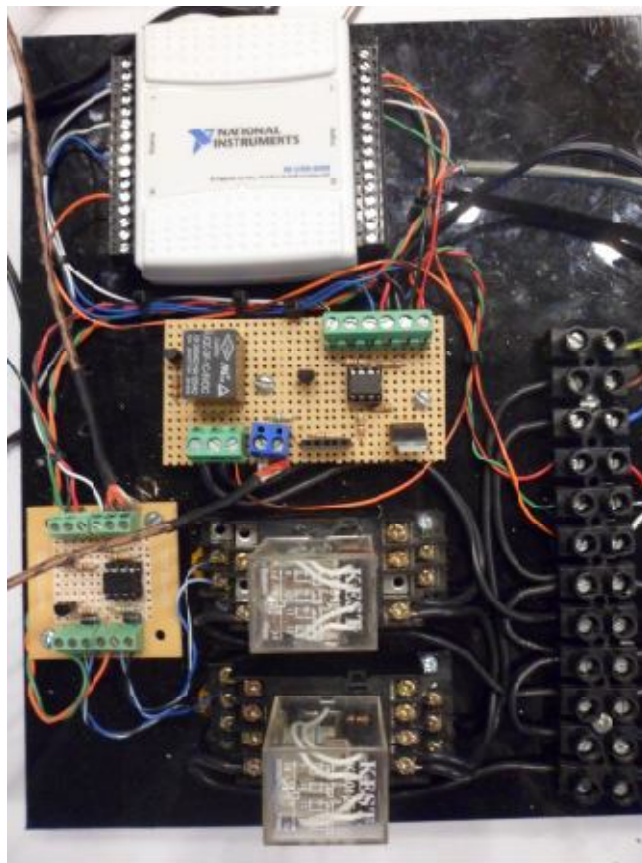


Figura 12 Sistema de monitoreo y control

5.2.1. Tarjeta de adquisición de datos

Una tarjeta de National Instruments es utilizada para la adquisición de datos. La referencia de la tarjeta utilizada es NI USB 6008. Las características principales de la tarjeta se listan a continuación:

- 8 entradas analógicas (12bits a 10kS/s).
- 2 salidas analógicas (12bits a 150S/s).
- 12 entradas/salidas digitales.
- 1 contador de 32 bits y 5MHz.
- Energizada por bus (USB).
- Disparo digital (Digital triggering).

Las características para las entradas analógicas son:

Tabla 10 Características para entradas analógicas de tarjeta de adquisición

Tipo de conversión	Aproximación sucesiva
Resolución	12bits para entradas diferenciales 11bits para entradas con una terminal.
Máxima velocidad de muestreo	10kS/s
Rango de entrada	+10V para entradas con una terminal ± 20 V(max) para entradas diferenciales
Voltaje de trabajo	+10V
Impedancia de entrada	144k Ω
Protección contra sobre tensiones	+35V

5.2.2. Circuito para la amplificación de la señal de temperatura

La señal del termopar es del orden de mV, por lo anterior esta señal debe ser amplificada antes de ingresar a la tarjeta de adquisición. Para amplificar la señal se utiliza un amplificador operacional LF353n. La configuración del circuito es la de un amplificador lineal no inversor, como el mostrado en la Figura 13.

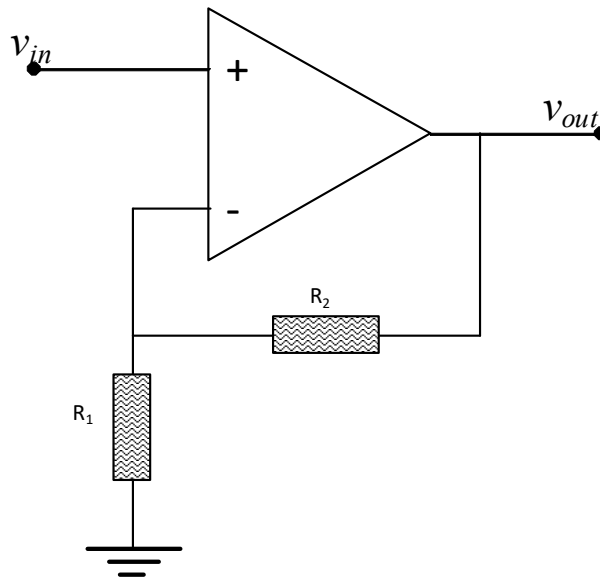


Figura 13 Circuito amplificador lineal no inversor

Para esta configuración la ganancia es:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

La máxima temperatura a medir es 200°C, para la cual, suponiendo una temperatura ambiente de 20°C, la señal del termopar es 6.7mV. El rango de las entradas analógicas de la tarjeta es hasta 10V, por lo cual se escoge un factor de amplificación de 1400. De esta manera, cuando la temperatura sea máxima, la salida del amplificador será 9.4V.

La resistencia R_1 del amplificador tiene un valor nominal 3.3Ω. La resistencia R_2 es variable y su valor se fija de manera que cumpla que:

$$R_2 = R_1(A_v - 1) \quad (2)$$

En el circuito, R_2 es un “trimmer” de 10kΩ y su valor es cercano a 4890Ω. El valor real de la resistencia R_1 es 3.5Ω.

Una vez montado el circuito de amplificación se realiza un proceso de calibración, el cual consiste en medir el voltaje a la salida del amplificador cuando se sumerge

la unión del termopar en medios a distintas temperaturas. En la Figura 14, se grafican los resultados del proceso de calibración.

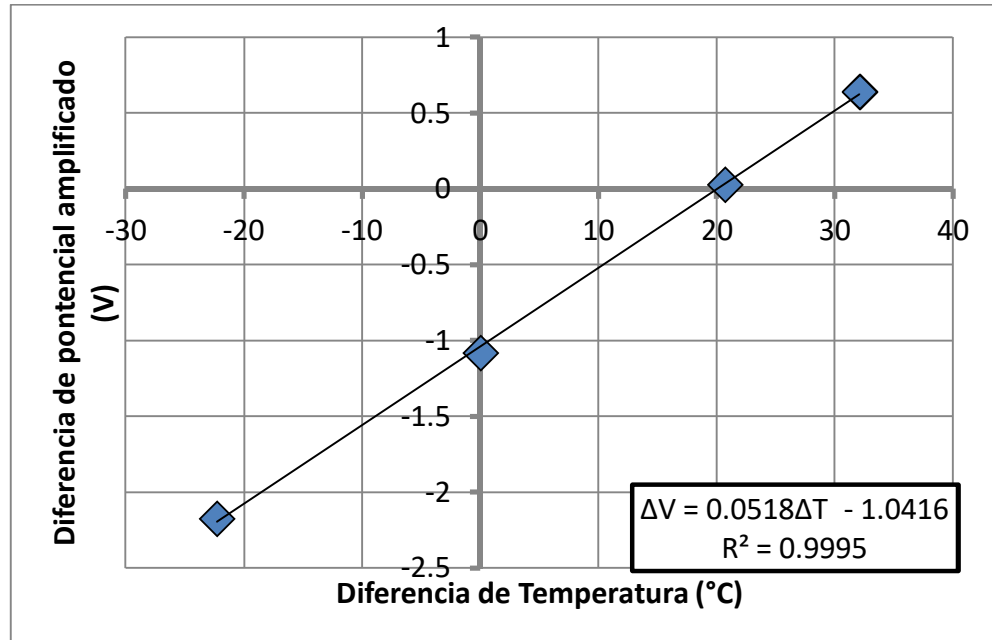


Figura 14 Curva calibración sensor de temperatura

Se observa que la respuesta del sensor es lineal y presenta un offset. La ecuación obtenida de la calibración es utilizada en la aplicación de monitoreo y registro para determinar la temperatura a partir del voltaje leído por la tarjeta.

5.2.3. Circuito para el encendido y apagado de las resistencias

Las resistencias se activan utilizando los puertos de salidas digitales de la tarjeta de adquisición de datos. Se utiliza un circuito de amplificación sencillo mediante un transistor con configuración de emisor común. La señal generada por la tarjeta se aplica en la base del transistor, así se activan los contactores que permiten el paso de corriente AC por las resistencias de calentamiento. En la Figura 15 se muestra el circuito para activar las resistencias de calentamiento.

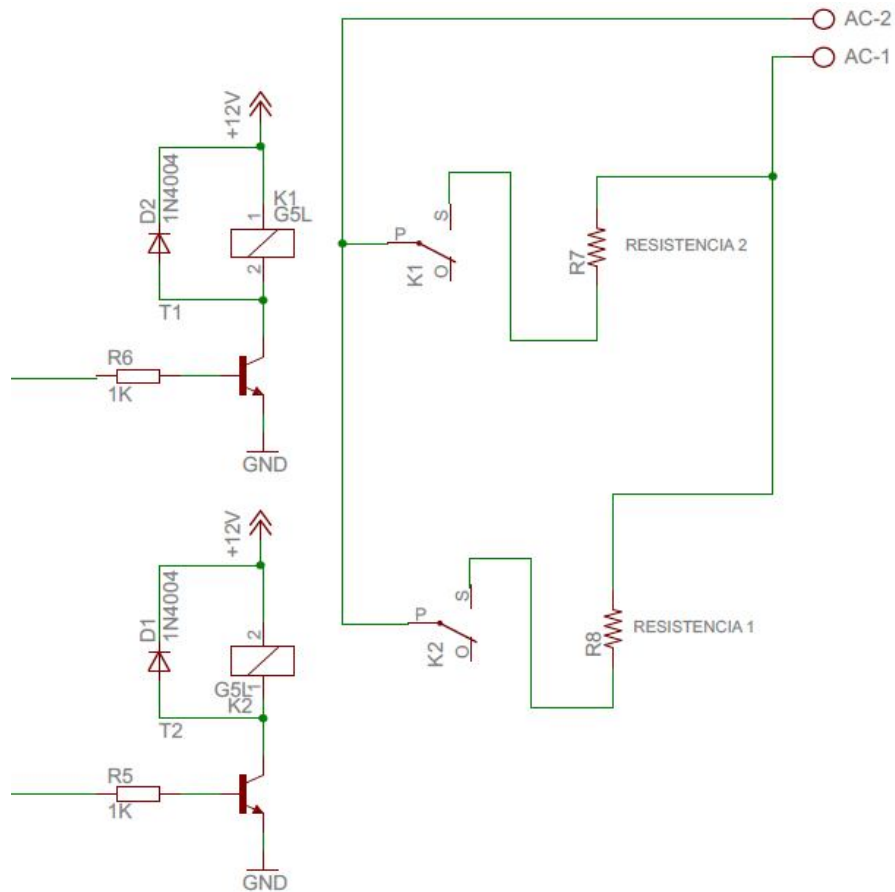


Figura 15 Circuito para la activación de las resistencias

5.3. APLICACIÓN EN LABVIEW PARA EL MONITOREO

Una aplicación en LabVIEW es utilizada para monitorear y controlar el dispositivo. Con esta aplicación se hace la lectura de los datos adquiridos por la tarjeta, los cuales son visualizados y registrados. Además, con la aplicación se activan las resistencias, haciendo uso de las salidas digitales de la tarjeta. En la Figura 16 se muestra una imagen del panel frontal de la aplicación de LabVIEW. En este panel se tienen tres botones, uno para detener la aplicación, otra para guardar los datos registrados durante la prueba y un tercer botón para reiniciar el valor del volumen en cero. También, se tienen dos interruptores para activar las resistencias de calentamiento. Además, se tienen indicadores de las distintas variables medidas y gráficas para la presión, el volumen y la temperatura.

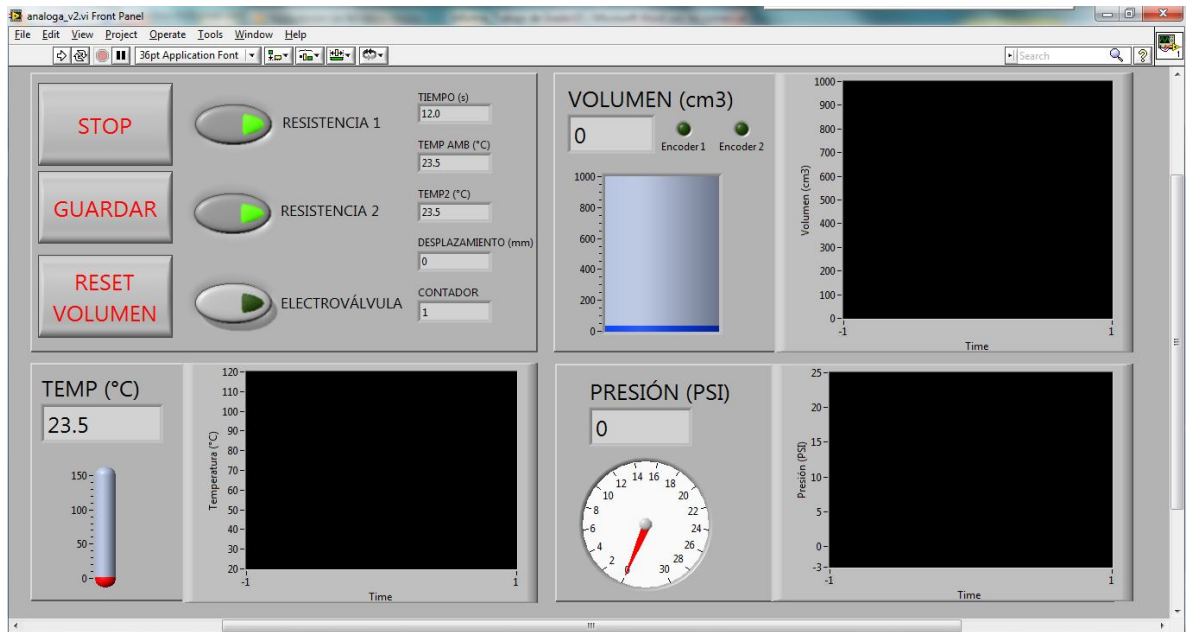


Figura 16 Panel frontal de la aplicación para el monitoreo y registro

En el diagrama de bloques se tiene un ciclo, dentro del cual se ejecutan todas las instrucciones y que solo finaliza cuando se activa el botón para detener la aplicación. Las señales analógicas (temperatura y presión) se leen secuencialmente, puesto que las características de la tarjeta no permiten leerlas de manera simultánea. Dentro de cada paso de la secuencia se aplican las fórmulas necesarias para traducir las señal de voltajes a las unidades de medida. La Figura 17 es una imagen del diagrama de bloques para la lectura de las señales analógicas.

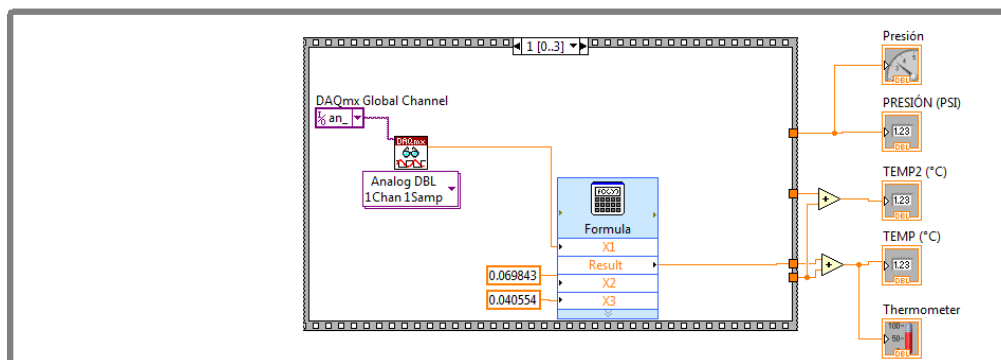


Figura 17 Diagrama de bloques para lectura de señales analógicas

El volumen se determina mediante el conteo de los cambios de estado de la señal del encoder, para llevar este conteo es necesario sumar uno a un valor acumulado cada vez que se detecte un flanco positivo en la señal digital. Para detectar el flanco es necesario comparar el estado actual de la señal con el anterior. Para almacenar el estado anterior se utiliza un "shift register". Un circuito lógico realiza la comparación entre el estado actual y anterior y si la salida del mismo es verdadera se adiciona uno al valor acumulado. Por medio de constantes del sistema se traduce el valor del conteo en el volumen ocupado por la sustancia. La Figura 18 es una imagen del diagrama de bloques para determinar el volumen.

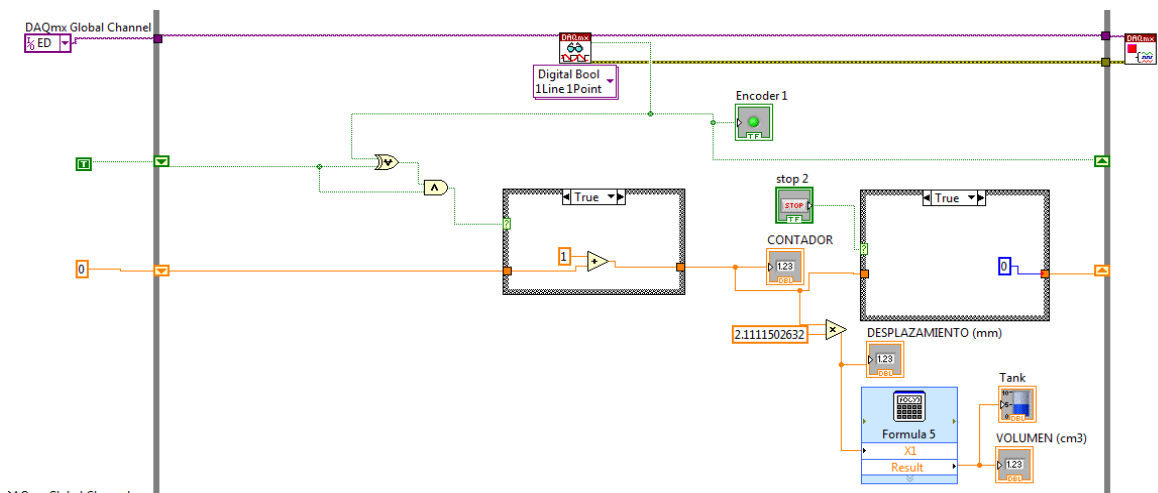


Figura 18 Diagrama de bloques para la determinación del volumen

Las resistencias eléctricas se activan, como se ha mencionado anteriormente, haciendo uso de las salidas digitales de la tarjeta. Simplemente se asigna al puerto de la tarjeta el valor lógico que tenga el interruptor que representa las resistencias en el panel frontal (Ver Figura 19)

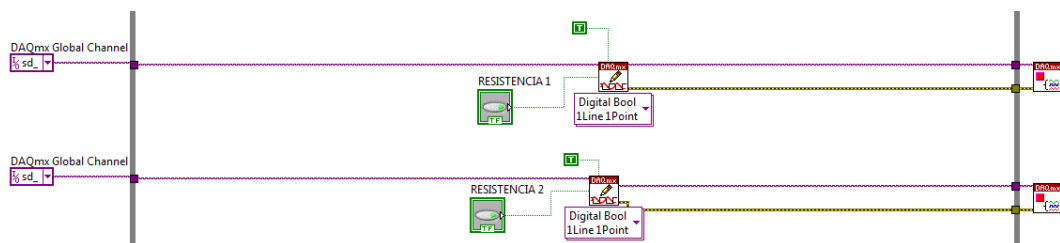


Figura 19 Diagrama de bloques para activar las resistencias

Los valores adquiridos de las variables sensadas se van anexando a arreglos, permitiendo su recolección. También, se tiene un arreglo en el que se almacena el tiempo. Estos arreglos son exportados a un archivo de Excel cuando se presiona el botón de guardar.

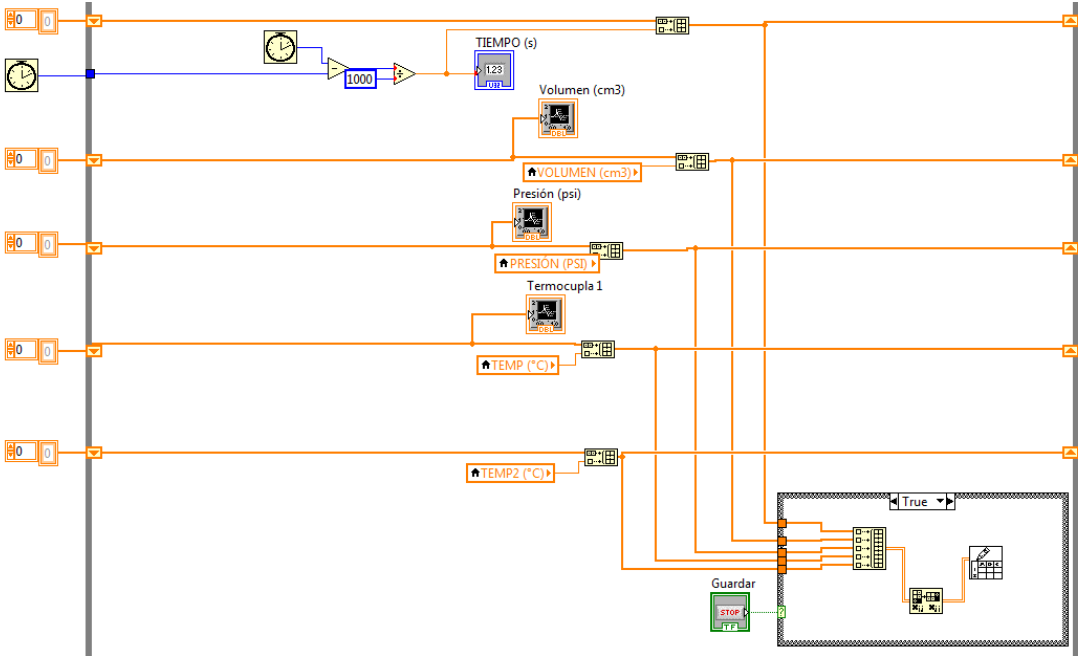


Figura 20 Diagrama de bloques para el almacenamiento de datos

6. MODELAMIENTO DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS EJECUTADOS

6.1. PROCESOS TERMODINÁMICOS EJECUTADOS

El dispositivo cilindro émbolo es muy versátil y en el que pueden ejecutarse distintos procesos termodinámicos. Sin embargo, por las condiciones particulares del dispositivo desarrollado en este proyecto, se pueden evaluar principalmente tres procesos: calentamiento de una sustancia en estado líquido (calentamiento inicial), expansión a presión constante con cambio de fase y calentamiento a volumen constante con cambio de fase. A continuación, se presentan modelos analíticos para estos modelos. Los modelos propuestos utilizan el enfoque de parámetros concentrados, es decir, consideran que la temperatura del sistema es uniforme.

6.1.1. Calentamiento inicial

En este caso el sistema estudiado está compuesto por la sustancia en fase líquida y el cilindro o contenedor. Es importante tener en cuenta el contenedor puesto que este tiene una masa considerable comparada con la cantidad de sustancia por ende su capacidad calorífica no puede ser despreciada. En la Figura 21 se presenta un esquema del sistema. La primera ley de la termodinámica para este sistema se expresa como:

$$\dot{W}_{elec} - \dot{Q}_p = \frac{dE_{sis}}{dt} \quad (1)$$

Únicamente se consideran los cambios de energía interna puesto que la velocidad y la elevación del sistema no cambian.

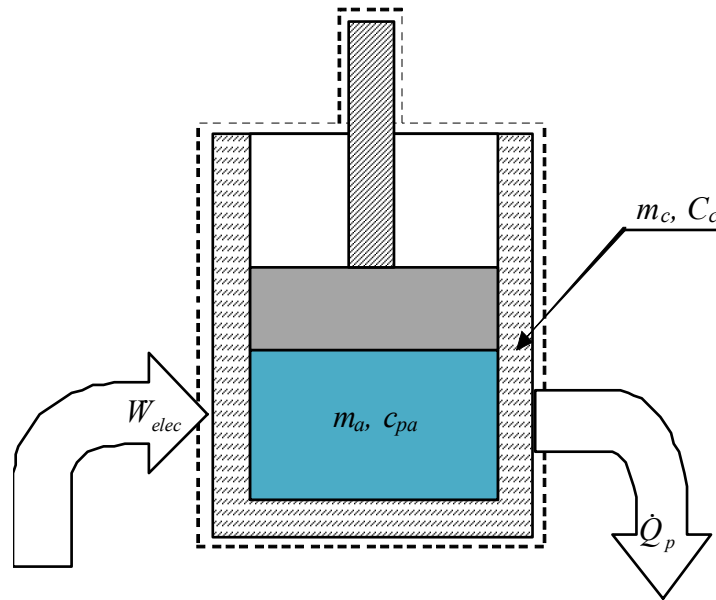


Figura 21 Esquema del sistema en calentamiento inicial

La razón de pérdida de calor se expresa como:

$$\dot{Q}_p = UA_s(T - T_\infty) \quad (2)$$

El cambio en la energía del sistema se expresa como:

$$dE_{sis} = dU_a + dU_c \quad (3)$$

El proceso modelado no considera el cambio de fase y la masa permanece constante, entonces los cambios en energía interna se manifiestan en cambios de temperatura y puede usarse el concepto de calor específico o capacidad calorífica específica.

$$dU_a = m_a c_{pa} dT \quad (4)$$

El cambio de energía interna para el contenedor se expresa en términos de la capacidad calorífica total. El contenedor está compuesto por el cilindro, el émbolo, las tapas y el vástago; y estos elementos están fabricados de distintos materiales. Sin embargo, se puede encontrar una capacidad calorífica total que es la suma de los productos entre la masa de cada elemento y la capacidad calorífica específica del material que está fabricado. El cambio de energía interna para el contenedor se expresa como:

$$dU_c = C_c dT \quad (5)$$

Así, el cambio en la energía del sistema se puede expresar como:

$$\frac{dE_{sis}}{dt} = (m_a c_{pa} + C_c) \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

En el desarrollo del modelo se define la capacidad calorífica del sistema compuesto como:

$$C_{sis} = (m_a c_{pa} + C_c) \quad (7)$$

La primera ley de la termodinámica para el sistema se expresa de la siguiente manera luego de reemplazar las anteriores definiciones.

$$\dot{W}_{elec} - UA_s(T - T_\infty) = C_{sis} \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

La solución de la ecuación diferencial anterior permite conocer la evolución temporal de la temperatura del sistema. Esta ecuación puede resolverse separando las variables e integrando.

$$\int_{T_i}^T \frac{dT}{\frac{\dot{W}_{elec}}{C_{sis}} - \frac{UA_s}{C_{sis}}(T - T_{\infty})} = \int_0^t dt \quad (9)$$

Para realizar la integral es apropiado hacer la siguiente sustitución de variables:

$$\theta = \frac{\dot{W}_{elec}}{C_{sis}} - \frac{UA_s}{C_{sis}}(T - T_{\infty}) \quad dT = -\frac{C_{sis}}{UA_s}d\theta$$

La ecuación se reorganiza así:

$$\int_{\theta_i}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = -\frac{UA_{sis}}{C_{sis}}t \quad (10)$$

Luego de realizar la integral y evaluarla en los límites se llega a:

$$\ln \left[\frac{\dot{W}_{elec} - UA_s(T - T_{\infty})}{\dot{W}_{elec} - UA_s(T_i - T_{\infty})} \right] = -\frac{UA_s}{C_{sis}}t \quad (11)$$

Despejando la temperatura del sistema se llega a:

$$T = \frac{\dot{W}_{elec}}{UA_s} - \left[\frac{\dot{W}_{elec}}{UA_s} - (T_i - T_{\infty}) \right] e^{-\frac{UA_s t}{C_{sis}}} + T_{\infty} \quad (12)$$

6.1.2. Expansión a presión constante

Luego del calentamiento inicial comienza el cambio de fase y la presión comienza a subir hasta que se supera el peso del émbolo y la fuerza de fricción. En este momento comienza el proceso de expansión a presión constante. El valor de la presión relativa al que ocurre este proceso puede encontrarse considerando el equilibrio mecánico para sistema compuesto por el émbolo y el vástago. En la Figura 22 se presenta el diagrama de cuerpo libre para el émbolo – vástago.

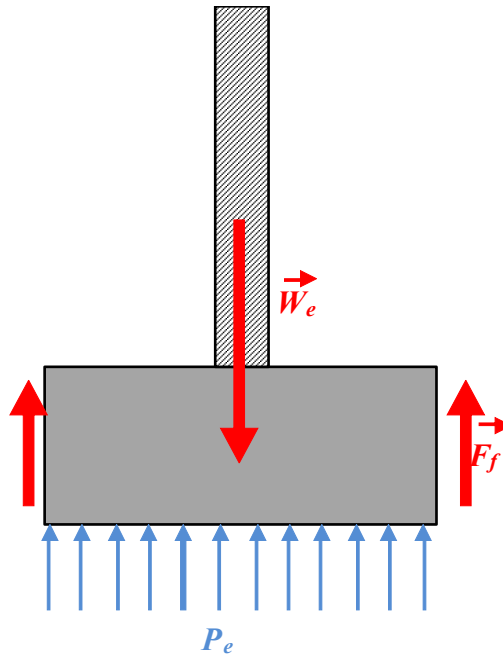


Figura 22 Diagrama de cuerpo libre del émbolo

El equilibrio mecánico del émbolo requiere que:

$$P_e \left(\frac{\pi}{4} D_i^2 \right) = W_e + F_f \quad (13)$$

Se supone que en el proceso de expansión a presión constante la energía eléctrica que entra el sistema se utiliza para realizar trabajo por deformación de los límites del sistema, incrementar la energía interna de la sustancia y disipar calor al ambiente. Este proceso se supone isotérmico e isocórico, por lo cual no se considera incremento en la energía interna del contenedor. En la Figura 23, se muestra el esquema del sistema analizado en el caso de expansión a presión constante con cambio de fase.

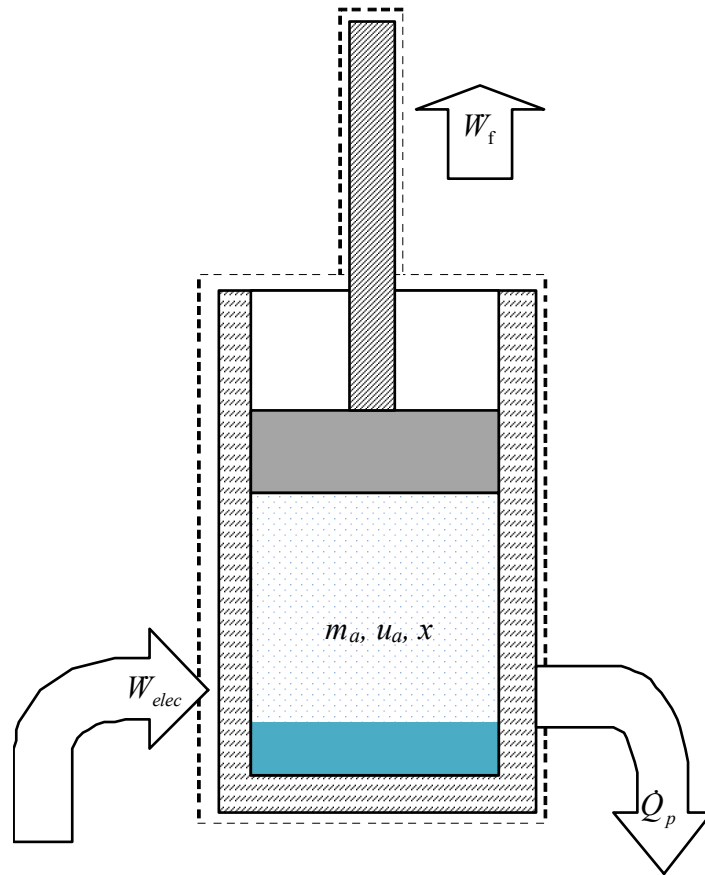


Figura 23 Esquema del sistema en expansión a presión constante

La primera ley de la termodinámica para este sistema se expresa como:

$$\dot{W}_{elec} - \dot{W}_f - \dot{Q}_p = \frac{dE_{sis}}{dt} \quad (14)$$

La razón a la que se realiza trabajo por deformación de los límites de la frontera es igual al producto de la fuerza por la velocidad. En este caso, la fuerza es que ejerce a la presión a la que ocurre la expansión sobre la cara del émbolo y la velocidad es la velocidad a la que se eleva el émbolo.

$$\dot{W}_f = p_e A_e \frac{dy}{dt} \quad (15)$$

La posición del émbolo está relacionada con el volumen que ocupa la sustancia estudiada.

$$V = A_e y \quad (16)$$

De esta manera la potencia por deformación de la frontera puede expresarse en términos del volumen que ocupa la sustancia de trabajo.

$$\dot{W}_f = p_e \frac{dV}{dt} \quad (17)$$

En este caso el único cambio de energía del sistema es el cambio en la energía interna de la sustancia estudiada.

$$dE_{sis} = dU_a = m_a du_a \quad (18)$$

Este cambio de energía no se manifiesta como incremento de temperatura, puesto que la presión es constante, por lo cual no puede encontrarse mediante el calor específico. Para una mezcla saturada la energía interna se encuentra con la calidad de la mezcla y las energías internas específicas del líquido y del vapor saturado.

$$u_a = (1 - x)u_f + xu_g \quad (19)$$

La calidad de la mezcla puede determinarse ya que el volumen ocupado por la mezcla saturada se conoce. El volumen específico de la mezcla es:

$$v_a = \frac{V}{m_a} \quad (20)$$

Entonces la calidad de la mezcla es:

$$x = \frac{v_a - v_f}{v_g - v_f} \quad (21)$$

Para conocer la evolución del sistema en el tiempo se retoma la expresión de la primera ley de la termodinámica para el mismo. En esta expresión se reemplaza la razón a la que se realiza el trabajo por deformación de la frontera por el producto entre la presión y la razón de cambio del volumen. Además, se reemplaza la razón de cambio de energía del sistema por la razón de cambio de energía interna en la sustancia de trabajo. También, se utiliza la expresión para las pérdidas de calor expuesta en la sección anterior.

$$\dot{W}_{elec} - UA_s(T - T_\infty) - p_e m_a \frac{dv_a}{dt} = m_a \frac{du_a}{dt} \quad (22)$$

Recordando la definición de entalpía, los cambios en esta propiedad se expresan como:

$$dh = du + pdv + vdp$$

En este caso, el término vdp se hace cero porque se trata de un proceso isobárico. Entonces el cambio en la entalpía de la sustancia estudiada es:

$$dh_a = du_a + p_e dv_a \quad (23)$$

Reorganizando términos en la expresión para la primera ley de la termodinámica se llega a:

$$\dot{W}_{elec} - UA_s(T - T_\infty) = m_a \left(\frac{du_a}{dt} + p_e \frac{dv_a}{dt} \right) = m_a \frac{dh_a}{dt} \quad (24)$$

La entalpía de la mezcla saturada puede encontrarse, también, con la calidad y las entalpías específicas del líquido saturado y del vapor saturado.

$$h_a = (1 - x)h_f + xh_g \quad (25)$$

Reemplazando la definición (25) en la expresión (24), de la primera ley de la termodinámica para el sistema se encuentra:

$$\dot{W}_{elec} - UA_s(T - T_\infty) = m_a(h_g - h_f) \frac{dx}{dt} \quad (26)$$

Teniendo en cuenta la expresión (21) se puede relacionar la razón de cambio de la entalpía con la razón de cambio del volumen específico.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{v_{fg}} \frac{dv_a}{dt} \quad (27)$$

Reemplazando (27) en (26):

$$\dot{W}_{elec} - UA_s(T - T_\infty) = m_a \left(\frac{h_g - h_f}{v_g - v_f} \right) \frac{dv}{dt} \quad (28)$$

Teniendo en cuenta que el producto del volumen específico por la masa de la sustancia es igual al volumen ocupado por la sustancia se encuentra una expresión para tasa de cambio del volumen.

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{v_g - v_f}{h_g - h_f} \right) (\dot{W}_{elec} - UA_s(T - T_\infty)) \quad (29)$$

De la expresión anterior, se concluye que la razón a la que se incrementa el volumen es constante. Las propiedades de las sustancia en saturación son

constantes, ya que la presión no cambia. La potencia eléctrica también es constante, al igual que la razón de pérdida de calor, puesto que se supuso que la temperatura es constante durante el proceso de expansión.

6.1.3. Calentamiento a volumen constante

El último proceso a considerar es el que comienza cuando el émbolo llega a un tope luego de la expansión. En este caso el volumen ocupado por la sustancia es constante. Si la masa de sustancia es suficiente, se tiene una mezcla saturada al comenzar este proceso. Al tener un proceso en saturación la presión y la temperatura son variables dependientes. Durante este proceso la temperatura y la presión deben cumplir la ecuación de Antoine.

El sistema considerado para estudiar este proceso se muestra en la Figura 24. En este proceso la potencia eléctrica suministrada por las resistencias es utilizada para incrementar la energía interna de la sustancia estudiada y del contenedor; y para disipar calor al ambiente.

La expresión de la primera ley de la termodinámica para este caso sería.

$$\dot{W}_{elec} - UA_s(T - T_\infty) = m_a \frac{du_a}{dt} + C_c \frac{dT}{dt} \quad (30)$$

Por tratarse de una mezcla saturada la energía interna de la sustancia de trabajo se determina con la calidad y las energías internas del líquido saturado y del vapor saturado, como lo expresa la ecuación (19). La calidad de la mezcla puede determinarse en cada estado ya que se conoce el volumen específico, el cual es constante. La solución explícita de la evolución temporal del sistema es difícil de encontrar, puesto que la relación de las propiedades de saturación con la temperatura no es lineal.

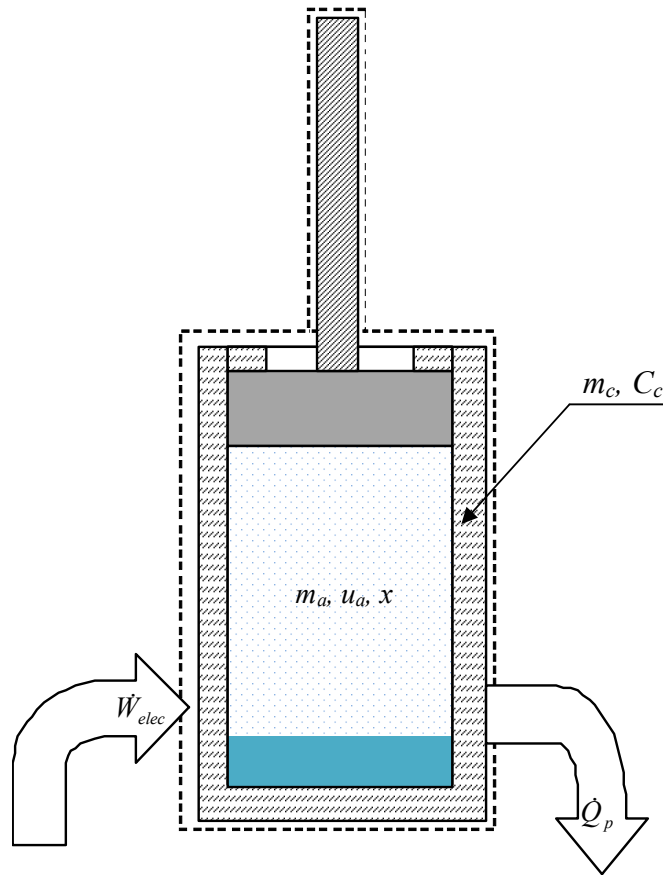


Figura 24 Esquema del sistema en calentamiento a volumen constante

6.2. ESTIMACIÓN TEÓRICA DE PARÁMETROS

Los modelos expuestos anteriormente tienen parámetros como la capacidad calorífica del contenedor y el coeficiente global de transferencia de calor. Estos parámetros son característicos del sistema e idealmente se deben determinar de manera experimental. Sin embargo, a continuación se expone el procedimiento seguido para estimar analíticamente estos parámetros.

6.2.1. Capacidad calorífica del contenedor

La capacidad calorífica total del contenedor se encuentra como la suma de las capacidades caloríficas de las partes que lo componen. Se considera que el contenedor está compuesto por: el cilindro, las tapas, el vástago, el émbolo y la tuerca para acoplar el émbolo y el vástago. El diseño del dispositivo incluye un par de placas para aislar térmicamente el cilindro del soporte.

$$C_c = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n c_i m_i \quad (31)$$

Utilizando un software de modelación geométrica se estiman los volúmenes de las partes del contenedor. En la tabla se resumen las propiedades de las partes y el resultado de la capacidad calorífica total.

Tabla 11 Masas y capacidades caloríficas partes del cilindro

Parte	Material	Densidad (g/cm ³)	Capacidad calorífica específica (J/kg°C)	Volumen (cm ³)	Masa (kg)	Capacidad calorífica (J/°C)
Cilindro	Aluminio	2.70	894	409.1	1.10	987.4
Tapa inferior	Aluminio	2.70	894	172.2	0.46	415.6
Tapa superior	Aluminio	2.70	894	183.4	0.50	442.7
Vástago	Acero	7.85	519	134.4	1.05	547.4
Tuerca vástago	Aluminio	2.70	894	6.2	0.02	15.1
Émbolo	Aluminio	2.70	894	140.2	0.38	338.4
TOTAL				1045.45	3.51	2746.60

6.2.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección se estima considerando que las pérdidas de calor se presentan por convección natural en una superficie cilíndrica. En realidad, la geometría externa del dispositivo es más compleja, puesto que los injertos con los que se ajustan las resistencias de calentamiento

son tramos de perfiles de aluminio. La geometría simplificada se esquematiza en la Figura 25.

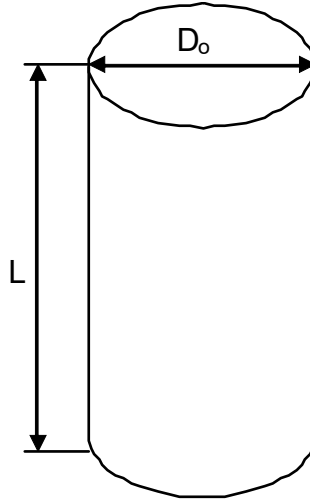


Figura 25 Geometría simplificada para análisis de convección natural

La transferencia de calor por convección es un fenómeno complejo y típicamente los coeficientes de transferencia de calor por convección se determinan mediante correlaciones. Las correlaciones se encuentran en función de números adimensionales. En el caso del cilindro vertical que pierde calor por convección natural las correlaciones están en términos del número de Nusselt, número de Rayleigh y el número de Prandtl.

El número de Nusselt se define como:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (32)$$

El número de Prandtl se define como:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (32)$$

El número de Grashof se define como:

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2(T_s - T_\infty)L_c^3}{\mu^2} \quad (33)$$

El número de Rayleigh se encuentra como el producto del número de Prandtl y el número de Grashof.

Para el caso de un cilindro vertical que pierde calor por convección natural la correlación para encontrar el número de Nusselt es:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (34)$$

En esta correlación, la longitud característica utilizada es la longitud del cilindro. Para el dispositivo estudiado la longitud es 359mm y el diámetro 100mm. Además, se calcula el coeficiente cuando se alcanza la temperatura máxima de operación, la cual es 200°C y se tiene la mínima temperatura ambiente que es 18°C. Se toman estos valores para encontrar el coeficiente de transferencia de calor por convección natural máximo. Con estos datos el coeficiente de convección encontrado es 7.1W/m²°C.

NOMENCLATURA

A_s : Área superficial.

A_e : Área del émbolo.

β : Coeficiente de expansión térmica.

c_p : Calor específico a presión constante

c_{pa} : Calor específico a presión constante para la sustancia estudiada.

E_{sis} : Energía del sistema.

g : Aceleración de la gravedad.

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección natural.

h_a : Entalpía específica de la sustancia estudiada.

h_f : Entalpía específica del líquido saturado.

h_g : Entalpía específica del vapor saturado.

k : Conductividad térmica.

L_c : Longitud característica.

m_a : Masa de sustancia estudiada.

μ : Viscosidad dinámica.

p_e : Presión a la que ocurre la expansión.

\dot{Q}_p : Razón a la que pierde calor el sistema.

ρ : Densidad.

T : Temperatura del sistema.

T_s : Temperatura superficial

T_∞ : Temperatura ambiente.

U : Coeficiente global de transferencia de calor.

U_a : Energía interna de la sustancia estudiada.

u_a : Energía interna específica de la sustancia estudiada.

U_c : Energía interna del contendor.

u_f : Energía interna específica del líquido saturado.

u_g : Energía interna específica del vapor saturado.

V : Volumen ocupado por la sustancia estudiada.

v_a : Volumen específico de la sustancia estudiada.

v_f : Volumen específico del líquido saturado.

v_g : Volumen específico del vapor saturado.

W_{elec} : Potencia eléctrica del sistema de calentamiento.

W_e : Peso del émbolo y el vástago (14.22N).

W_f : Razón a la que se realiza trabajo por deformación de la frontera.

x : Calidad de la mezcla saturada.

y : Posición del émbolo.

7. RESULTADOS

Se realizan pruebas con el dispositivo cilindro – émbolo para conocer la forma como opera. En las pruebas se utilizan 30g de agua como sustancia de trabajo. Se mide la corriente consumida por las resistencias y es 4A. También se mide el voltaje de suministro y es 122.5V. De esta manera la potencia eléctrica suministrada es 490W. La temperatura ambiente es 23°C.

Es importante indicar que la temperatura registrada durante las pruebas es tomada en el termo-pozo ubicado en el múltiple para la toma de señales. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los procesos de calentamiento inicial, expansión a presión constante y calentamiento a volumen constante.

7.1. CALENTAMIENTO INICIAL

La gráfica de la evolución de la temperatura durante el calentamiento inicial se presenta en la Figura 26. El comportamiento de la temperatura con el tiempo es lineal con una pendiente de 0.0792°C/s , como se aprecia en el gráfico. Además, se observa que el tiempo requerido para calentar la sustancia hasta 70°C es aproximadamente 20min.

El comportamiento lineal de la temperatura con el tiempo permite inferir que las pérdidas de calor son bajas, puesto que es la presencia del término de pérdidas de calor lo que da origen a la solución exponencial de la ecuación para calentamiento. El tiempo de calentamiento es largo, lo cual indica que la inercia térmica del sistema es alta.

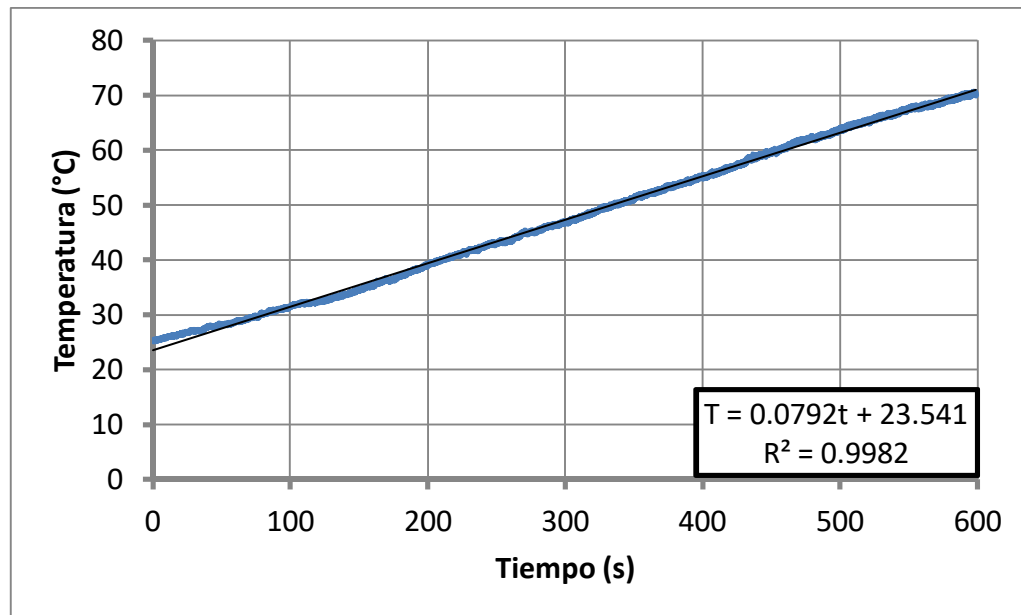


Figura 26 Evolución de la temperatura durante el calentamiento inicial

La capacidad calorífica del sistema puede determinarse experimentalmente despreciando las pérdidas de calor. De esta manera, la pendiente de la curva de calentamiento es igual al cociente entre la potencia eléctrica y la capacidad calorífica del sistema.

Con los datos de la prueba se encuentra que la capacidad calorífica del sistema es $6187\text{J}/^\circ\text{C}$. Este valor es considerablemente mayor que el estimado analíticamente. La diferencia puede explicarse porque en el cálculo experimental no se tuvieron en cuenta los accesorios del múltiple para la toma de señales. Además, es probable que la estructura del dispositivo también esté absorbiendo calor. Durante las pruebas se evidencia cierto calentamiento en las placas del soporte.

7.2. EXPANSIÓN A PRESIÓN CONSTANTE

La evolución del volumen ocupado por la sustancia durante la prueba se muestra en la Figura 27. En la gráfica se observa que al principio el volumen permanece constante. Luego comienza a crecer hasta alcanzar el tope y después permanece

constante hasta el final de la prueba. Durante la expansión el volumen crece linealmente con el tiempo con una razón de $6.107\text{cm}^3/\text{s}$, como se observa en la gráfica.

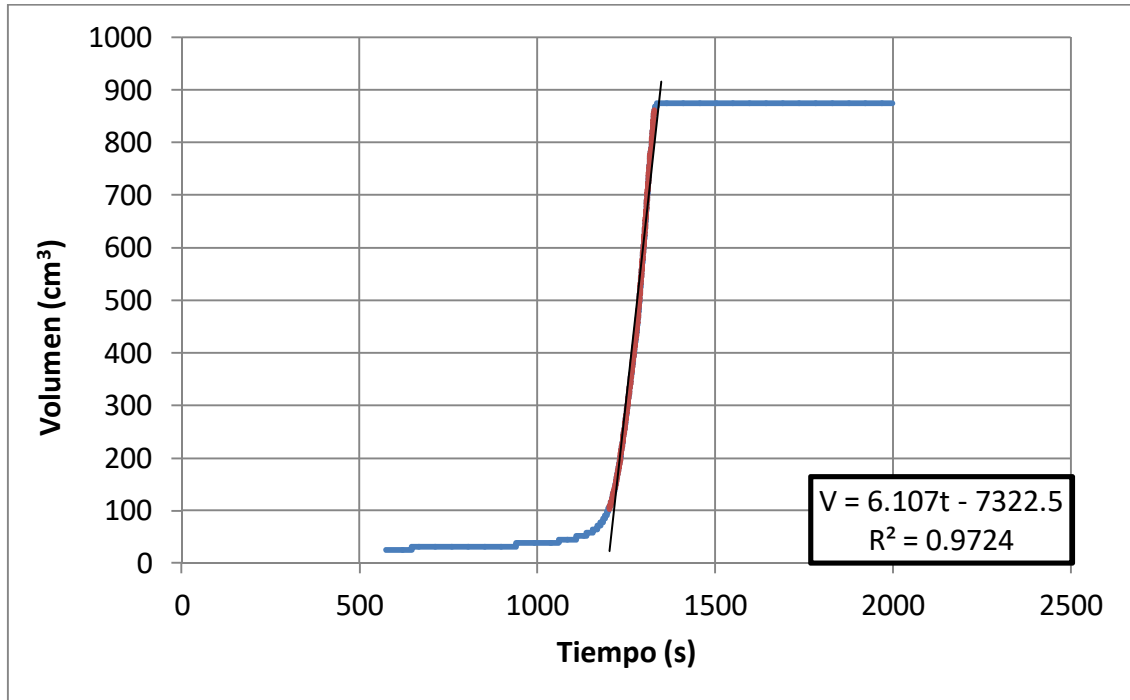


Figura 27 Evolución del volumen durante prueba

La presión a la que comienza la expansión es 101.5kPa . A esta condición la entalpía de vaporización es 2257kJ/kg y la diferencia entre los volúmenes específicos del vapor saturado y el líquido saturado es $1.673\text{m}^3/\text{kg}$. Con estos datos, la razón a la que se transfiere calor a la sustancia de trabajo es 8.24W . Este valor es una fracción muy pequeña de la potencia eléctrica suministrada. Como se ha mencionado anteriormente las pérdidas de calor son bajas, entonces se intuye que el contenedor no ha alcanzado el equilibrio térmico y aún está absorbiendo gran parte de la energía suministrada.

La Figura 28 muestra la relación entre la presión y el volumen durante la prueba. En el gráfico se observa que la presión permanece aproximadamente constante

durante la expansión. También, se observa que antes de comenzar la expansión, el volumen y la presión crecen levemente. Al finalizar la expansión el volumen permanece constante y la presión se incrementa.

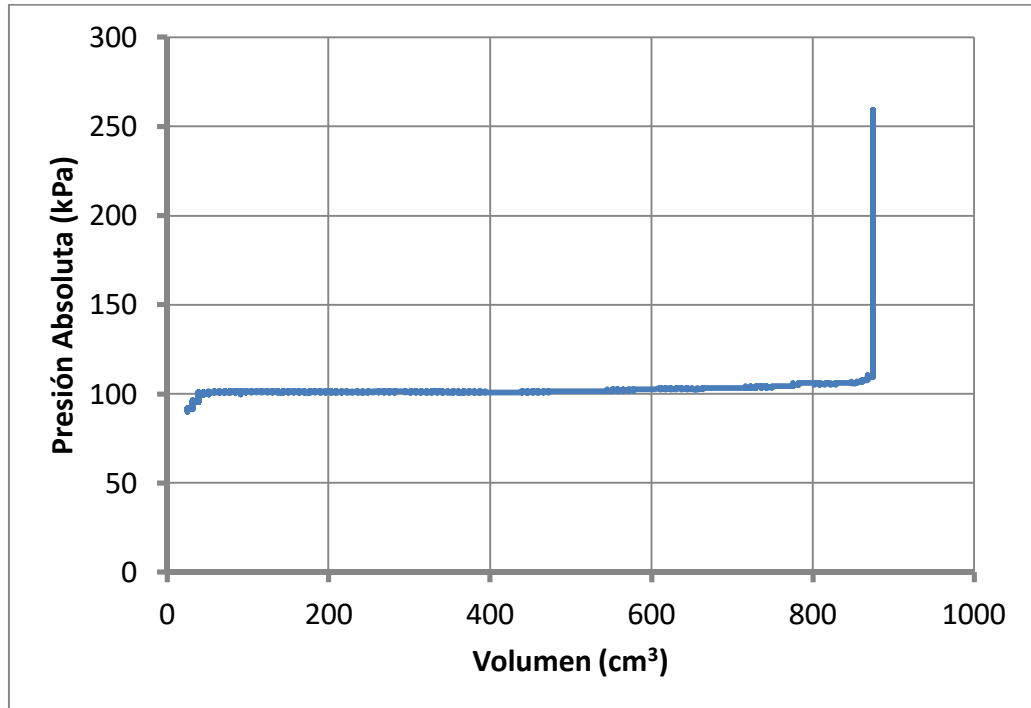


Figura 28 Curva presión contra volumen para la prueba

La curva de presión y volumen está acorde con lo esperado, exceptuando por el leve incremento de volumen antes de la expansión a presión constante. Esto puede deberse a que queda aire atrapado dentro del émbolo. El agua en fase líquida también se expande, pero este fenómeno no es tan apreciable.

La Figura 29 muestra la relación para la temperatura y el volumen durante la prueba. Se observa que la temperatura incrementa hasta que comienza la expansión. Durante la expansión la temperatura crece levemente. Luego de la expansión el volumen permanece constante y la temperatura crece notoriamente.

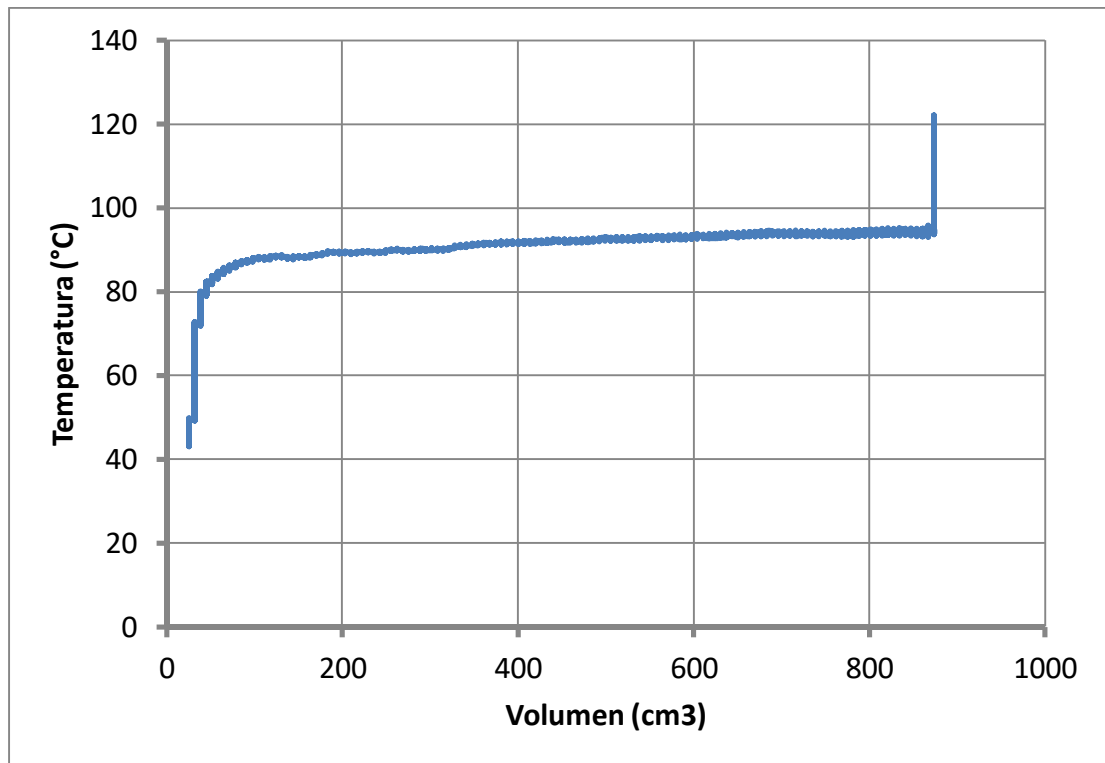


Figura 29 Curva presión contra volumen para la prueba

La temperatura debería ser constante durante la expansión, sin embargo en la prueba se observa un leve crecimiento. Este incremento puede deberse a que el punto en el que se mide la temperatura se encuentra en la parte inferior, donde no hay calentamiento. Es probable que la temperatura sensada no corresponda a la temperatura de la sustancia y la región en la que se encuentra el termopar aún está absorbiendo calor durante la expansión.

7.3. CALENTAMIENTO A VOLUMEN CONSTANTE

El calentamiento a volumen constante permite evaluar la relación entre la temperatura y la presión de saturación. En la Figura 30 se muestra el comportamiento de la presión y la temperatura durante el calentamiento a volumen constante. También, se muestra la relación predicha entre ambas variables por la ecuación de Antoine.

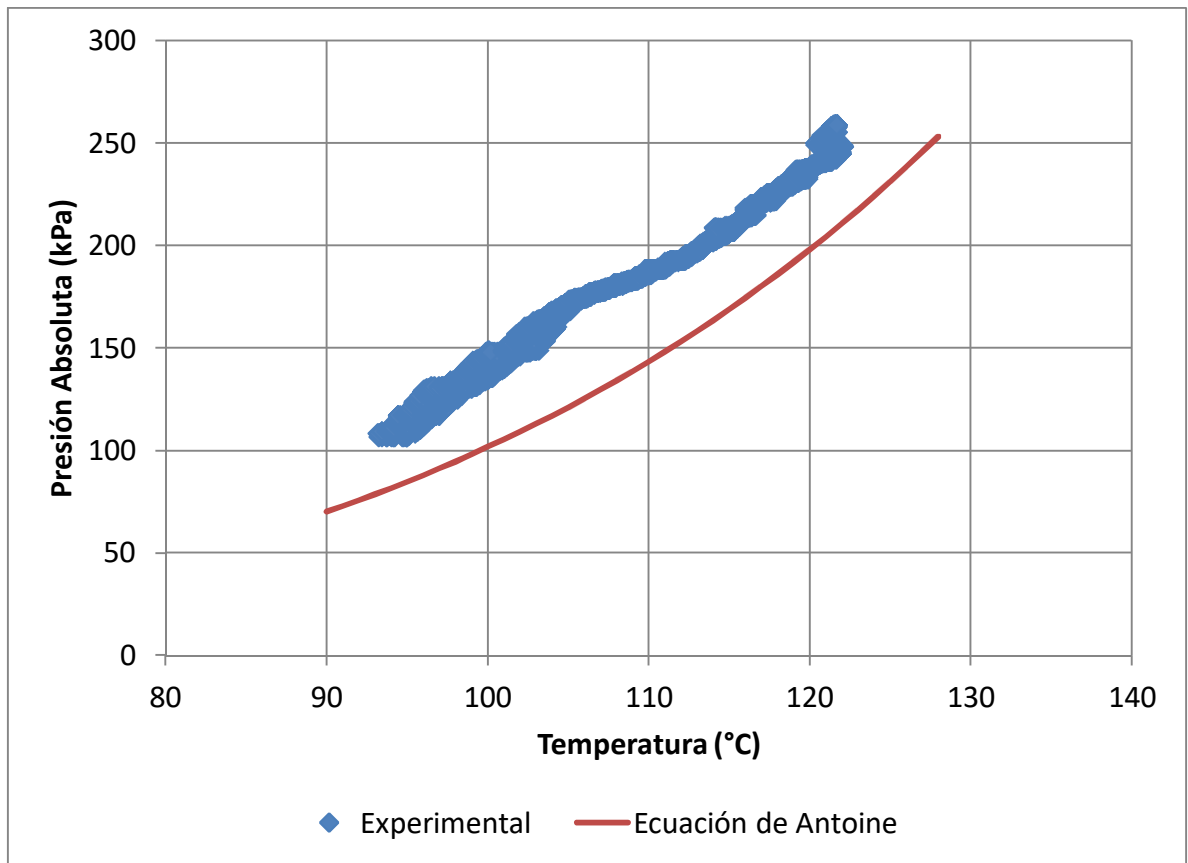


Figura 30 Presión contra la temperatura durante el calentamiento a volumen constante

Se observa que los datos experimentales tienen un comportamiento similar al de la curva teórica, sin embargo las temperaturas para los datos experimentales son menores. Este offset puede ser explicado, de nuevo, porque el punto de medición de temperatura se encuentra en una región sin calentamiento. También, se debe considerar algún inconveniente con la calibración de los sensores de temperatura y presión.

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un dispositivo cilindro – émbolo con monitoreo de las variables de presión, temperatura y volumen, el cual permite el estudio de procesos de expansión a presión constante y calentamiento a volumen constante con cambio de fase líquida a vapor. La condición actual del dispositivo permite su uso en ambientes académicos.

En el dispositivo desarrollado se pueden ejecutar procesos con cambio de fase líquida a vapor utilizando agua y etanol como sustancias de trabajo. Los procesos termodinámicos a estudiar con el dispositivo son: calentamiento en fase líquida, expansión a presión constante y calentamiento con volumen constante.

El diseño mecánico del dispositivo garantiza su operación segura con una presión manométrica máxima de 100psi y un factor de seguridad de 2. La potencia nominal de calentamiento es 400W, permitiendo alcanzar temperaturas superiores a los 200°C:

Se realizó de manera exitosa el ensamble del dispositivo cilindro – émbolo. Para la camisa se utilizaron partes de un pistón neumático comercial. El émbolo fue diseñado y manufacturado en el desarrollo del proyecto. El dispositivo no presenta fugas considerables.

El dispositivo dispone de instrumentación para la medición de presión, temperatura y volumen. Se tienen dos puntos de medición de temperatura y esta medida se hace con termopares. Se tiene un manómetro de Bourdon para indicar la presión y un transductor de presión para su registro digital. El volumen se determina mediante el desplazamiento del émbolo el cual se sensa con un encoder digital.

Se implementó un circuito de amplificación de la señal de temperatura, utilizando un amplificador operacional. Este circuito presenta linealidad y repetibilidad en la respuesta.

Las variables sensadas son monitoreadas con la ayuda de una tarjeta de adquisición de datos. Se desarrolló una aplicación en LabVIEW® que lee las señales de la tarjeta y permite su visualización y almacenamiento. Además, la aplicación permite el encendido y apagado de las resistencias de calentamiento, haciendo uso de las salidas digitales de la tarjeta. El sistema de monitoreo y registro de las variables sensadas funciona correctamente.

El calentamiento del dispositivo es realizado por medio de resistencias de eléctricas que se ubican en la parte externa de la camisa. Este sistema requiere del calentamiento de las distintas partes del dispositivo, además del calentamiento de la sustancia estudiada. El diseño propuesto e implementado solo utiliza una pequeña fracción de la energía para el proceso que se pretende estudiar. En el caso del proceso de expansión a presión constante esta fracción es del 1.7%.

Las pruebas experimentales muestran, en cierta medida, ajuste con los modelos experimentales. La curva de calentamiento inicial se ajusta a la predicha por el modelo, pero se requiere un ajuste en el parámetro de capacidad calorífica. La expansión a presión constante ocurre a velocidad constante como predice el modelo. La curva de presión contra temperatura a volumen constante tiene la forma de la curva teórica, pero presenta un offset.

Se propone como actividad didáctica experimental la construcción de las curvas de temperatura contra presión de saturación para las distintas sustancias de trabajo con las que puede operar el dispositivo. Esta experiencia permite una confrontación de la realidad con las expresiones teóricas y la comparación del comportamiento de distintas sustancias en saturación. Además, las diferencias

evidenciadas con los modelos, son útiles para llamar la atención sobre los inconvenientes y dificultades de la medición.

RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En el desarrollo de un proyecto similar se recomienda utilizar un sistema de calentamiento esté concentrado en la sustancia estudiada. Por ejemplo, se pueden utilizar resistencias de inmersión.

Se recomienda hacer pruebas con masas mayores de sustancia de trabajo. Lo anterior, favorece que las partes del dispositivo cilindro – émbolo se calienten antes de comenzar a evidenciar cambios en la sustancia estudiada.

Aunque las pérdidas de calor son bajas, se recomienda aislar externamente el dispositivo, esto acortará los tiempos de calentamiento y permitirá alcanzar temperaturas más altas.

Es recomendable, también, medir la temperatura en varios puntos para tener una mejor sensación de la uniformidad o no de la distribución de temperatura. Puede resultar más representativo medir la temperatura haciendo uso del termo-pozo acoplado al émbolo.

Se debe realizar una purga apropiada del sistema para eliminar posibles fuentes de error por la presencia de aire. Esta purga puede realizarse antes de la carga de la sustancia de trabajo mediante vacío.

Se propone como trabajo de futuro implementar un sistema que permita variar la carga mecánica sobre el émbolo mediante pesas o mediante un resorte.

Está pendiente aún el uso del dispositivo en un ambiente académico y la valoración de su impacto en el proceso de enseñanza – aprendizaje.

Con el dispositivo se puede considerar la realización de una experiencia con sistemas abiertos, empleando la entrada de más para incorporar una válvula de carga y / o venteo o de seguridad y habilitando la medición del flujo másico. También se puede utilizar el dispositivo para estudiar sistemas lejos del equilibrio termodinámico, incluyendo casos de transferencia de calor.

Se propone como trabajo futuro, también, la implementación de un mecanismo de enfriamiento forzado, este puede ser una celda Peltier acolada al lado plano de la tapa inferior.

BIBLIOGRAFÍA

Annaratone, D. (2007). *Pressure Vessel Design*. Berlín: Springer-Verlag.

Argensold. (s.f.). *Argensold*. Recuperado el Noviembre de 2011, de <http://www.argensold.com/viton.php3>

Carvahlo, E. O., & Otros. (2009). A Novel Tool to Facilitate the Learning of Thermodynamic Principles by Undergraduate Students of the Biological Area. *Biochemistry and Molecular Biology Education* , 37 (5), 271-278.

Cengel, Y. A. (2009). *Termodinámica, Sexta Edición*. México: McGraw - Hill.

CHROMALOX. (s.f.). *CHROMALOX*. Recuperado el Mayo de 2011, de <http://www.chromalox.com>

Doebelin, E. O. (1995). *Engineering Experimentation: Planing, Excecution, Reporting*. New York: Mc Graw - Hill.

FUJITAKA. (s.f.). Recuperado el 2011 de Mayo, de www.fujitaka.com

Goodwin, A., Marsh, K., & Wakeham, W. (2003). *Measurement of the Thermodynamic Properties of Single Phases*. Elsevier.

Hagart-Alexander, C. (2003). Temperature Measurement. En W. Boyes, *Instrumentation Reference Book (Fourth Edition)*. Elsevier.

Higham, E. H., & Paros, J. M. (2003). Measurement of Pressure. En W. Boyes, *Instrumentation Reference Book (Fourth Edition)*. Elsevier.

Laubuhn, D., & Romberg, O. (2005). *Keine panik vor termodinamik*. Vieweg.

Müller, I. (2007). *A history of thermodynamics: The doctrine of energy and entropy*. Berlín: Springer Berlin Heidelberg.

Parker. (2011). *Parker O ring Handbook ORD 5700*. Lexington: Parker.

Potter, M. C., & Scott, E. P. (2006). *Termodinámica*. Thomson.

Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2002). *Diseño en ingeniería mecánica (Sexta Edición ed.)*. México: Mc Graw Hill.

Sydenham, P. H. (2003). Measurement of length. En W. Boyes, *Instrumentation Reference Book*. Elsevier.

Weir, R. D., & de Loos, T. W. (2005). *Measurement of thermodynamic properties of multiple phases*. Elsevier.

Wheeler, A. J., & Ganji, A. R. (2004). *Introduction to engineering experimentation*. New Jersey: Prentice Hall.