

Manual para la realización de prácticas de laboratorio - Área de Energía - Ing. Mecánica

Diego Alejandro Camargo Trillos

Fernando Javier Calvo Silva

Rafael David Gómez Vásquez

Mario Andrés Palacio Vega



Manual para la realización de prácticas de laboratorio - Área de Energía - Ing. Mecánica

Diego Alejandro Camargo Trillos

Fernando Javier Calvo Silva

Rafael David Gómez Vásquez

Mario Andrés Palacio Vega

GRUPO DE INVESTIGACION: OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS Y USO
RACIONAL DE LA ENERGÍA Y BIOMASA



Escuela de Ingenierías y Arquitectura
Colección Textos Académicos
2024

Manual para la realización de prácticas de laboratorio - Área de Energía - Ing. Mecánica / Diego Alejandro Camargo Trillos y otros. -- Montería : Universidad Pontificia Bolivariana, 2024.
218 páginas. -- (Colección Textos académicos)

e-ISBN: 978-958-722-916-5

1. Termodinámica 2. Puntos de ebullición 3. Máquinas térmicas
4. Ingeniería de procesos 5. Optimización energética 6. Energía biomásica 7. Transferencia de energía

CDD. 621.402

Manual para la realización de prácticas de laboratorio - Área de Energía - Ing. Mecánica

© Diego Alejandro Camargo Trillos
© Fernando Javier Calvo Silva
© Rafael David Gómez Vásquez
© Mario Andrés Palacio Vega

© Universidad Pontificia Bolivariana

978-958-722-916-5

Imagen de cubierta: Laboratorio de energías renovables UPB-Montería.

Universidad Tecnológica de Pereira
Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión
Editorial Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia

Coordinador editorial:
Luis Miguel Vargas Valencia
luismvargas@utp.edu.co
Teléfono (606) 313 7381
Edificio 9, Biblioteca Central Jorge Roa Martínez
Cra. 27 No. 10-02 Los Álamos, Pereira, Colombia
www.utp.edu.co

Montaje y producción
Tomás Flórez Calle
Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, Risaralda, Colombia.

Contenido

AGRADECIMIENTOS	13
INTRODUCCIÓN.....	15
Objetivos de las practicas de laboratorio.....	16
Elaboración de informe.....	17
CAPÍTULO 1	
LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	19
1.1 Práctica N°1: Calor de Fusión del Hielo.....	21
1.1.1 Marco teórico.....	23
1.1.2 Objetivos	26
1.1.3 Equipos e insumos	26
1.1.4 Procedimiento	26
1.1.5 Informe	26
1.1.6 Preguntas.....	29
1.2 Práctica N°2: Temperatura de Ebullición de Sustancias Puras y Ascenso Ebulloscópico de Soluciones.....	31
1.2.1 Marco teórico.....	31
1.2.2 Objetivo	32
1.2.3 Equipos e insumos	33
1.2.4 Procedimiento	33
1.2.5 Informe	34
1.3 Práctica N°3: Introducción al software para el cálculo de Propiedades y Diagramas de Cambio de Fase.....	36
1.3.1 Marco teórico.....	36
1.3.2 Objetivos	37
1.3.3 Equipos e insumos	38
1.3.4 Procedimiento para software mini-refprop	38
1.3.5 Informe	47
1.4 Práctica N° 4: Presión, Volumen y Temperatura.....	49
1.4.1 Marco teorico.....	49

1.4.2	Objetivos	51
1.4.3	Equipos e insumos	51
1.4.4	Procedimiento	52
1.4.5	Informe	57
1.5	Práctica N°5: Aplicación del Software EES y Trabajo de Frontera.	58
1.5.1	Marco Teórico.....	58
1.5.2	Objetivos	59
1.5.3	Equipos E Insumos	59
1.5.4	Procedimiento	59
1.5.5	Informe	64
1.6	Práctica N°6: Capacidad Calorífica de Sólidos	66
1.6.1	Marco teórico.....	66
1.6.2	Objetivos	67
1.6.3	Equipos e insumos	67
1.6.4	Procedimiento	67
1.6.5	Informe	69
1.7	Práctica N°7: Primera Ley de la Termodinámica en Sistemas Abiertos en Estado Estable	71
1.7.1	Marco teórico.....	71
1.7.2	Objetivos	72
1.7.3	Equipos e insumos	72
1.7.4	Procedimiento	72
1.7.5	Informe	75
1.8	Práctica N°8: Ciclo de Refrigeración Real	76
1.8.1	Marco teórico.....	76
1.8.2	Objetivos	79
1.8.3	Equipos e insumos	79
1.8.4	Procedimiento	79
1.8.5	Informe	80
1.9	Set N° 9: Energy Analyses of Solar Photovoltaic module	82
1.9.1	Theory.....	82
1.9.2	Object.....	83
1.9.3	Equipment and supplies.....	84
1.9.4	Methodology.....	85
1.9.5	Experimental process.....	85
1.9.6	Final report.....	85

CAPÍTULO 2

LABORATORIOS DE MAQUINAS TÉRMICAS	87
2.1 Práctica N°1: Procesos isotrópicos en la ingeniería.....	89
2.1.1 Marco teórico.....	92
2.1.2 Objetivos	92
2.1.3 Equipos e insumos	93
2.1.4 Procedimiento	94
2.1.5 Informe	95
2.2 Set N°2: Exergy Analyses – Solar Photovoltaic module	96
2.2.1 Theory.....	96
2.2.2 Object.	99
2.2.3 Equipment and supplies.	99
2.2.4 Methodology.....	100
2.2.5 Final report.	101
2.3 Práctica N°3: Ciclo de combustión interna	102
2.3.1 Marco teórico.....	102
2.3.2 Objetivos	108
2.3.3 Equipos e insumos	108
2.3.4 Procedimiento	109
2.3.5 Informe	110
2.4 Práctica N°4: Ciclos de potencia de gas.....	111
2.4.1 Marco teórico.....	111
2.4.2 Objetivos	114
2.4.3 Equipos e insumos	114
2.4.4 Procedimiento	114
2.4.5 Informe	116
2.5 Práctica N°5: Ciclo Rankine ideal.....	119
2.5.1 Marco teórico.....	119
2.5.2 Objetivos	122
2.5.3 Equipos e insumos	122
2.5.4 Procedimiento	122
2.5.5 Informe	124
2.6 Práctica N°6: Implementación de tabla psicrométrica en balances de energía	126
2.6.1 Marco teórico.....	126
2.6.2 Objetivo	128
2.6.3 Equipo e insumos.....	128

2.6.4 Procedimiento	129
2.6.5 Informe	131
CAPÍTULO 3	
LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	135
3.1 Práctica N°1: Propiedades térmicas de materiales - Conductividad.	137
3.1.1 Marco teórico.....	137
3.1.2 Objetivo	142
3.1.3 Equipos e insumos	143
3.1.4 Procedimiento	143
3.1.5 Informe	144
3.2 Práctica N°2: Flujo de calor en aletas longitud infinita.....	145
3.2.1 Marco teórico.....	145
3.2.2 Objetivos	148
3.2.3 Equipos e insumos	149
3.2.4 Procedimiento	149
3.2.5 Informe	152
3.3 Práctica N°3: Ley de enfriamiento de Newton – Analisis térmico de sistema de Masa concentrado	153
3.3.1 Marco teórico.....	153
3.3.2 Objetivos	156
3.3.3 Equipos e insumos	156
3.3.4 Procedimiento	157
3.3.5 Informe	157
3.4 Práctica N°3: Calentamiento y Enfriamiento de cuerpos.....	159
3.4.1 Marco teórico.....	159
3.4.2 Objetivos	162
3.4.3 Equipos e insumos	162
3.4.4 Procedimiento	163
3.4.5 Informe	163
3.5 Práctica N°6: Análisis transitorio de transferencia de calor en sistemas No concentrados.....	165
3.5.1 Marco teórico.....	165
3.5.2 Objetivos	168
3.5.3 Equipos e insumos	168
3.5.4 Procedimiento	169
3.5.5 Informe	169

3.6 Set N°2: Thermal and energy analysis of solar photovoltaic model	171
3.6.1 <i>Theory</i>	171
3.6.2 <i>Object</i>	174
3.6.3 <i>Equipment and supplies</i>	174
3.6.4 <i>Methodology</i>	175
3.6.5 <i>Procedure</i>	175
3.6.5 <i>Final report</i>	176
3.7 Práctica N°7: Estimación del coeficientes de transferencia de calor por convección para flujo forzado	177
3.7.1 <i>Marco teórico</i>	177
3.7.2 <i>Objetivos</i>	179
3.7.3 <i>Equipos e insumos</i>	180
3.7.4 <i>Procedimiento</i>	180
3.7.5 <i>Informe</i>	182
3.8 Practica N°8: Intercambiador de calor de tubo concéntrico	184
3.8.1 <i>Marco teórico</i>	184
3.8.2 <i>Objetivos</i>	185
3.8.3 <i>Equipos e insumos</i>	186
3.8.4 <i>Procedimiento</i>	189
3.8.5 <i>Informe</i>	191
3.9 Practica N°9: Intercambiador de calor de tubos y coraza	190
3.9.1 <i>Marco teórico</i>	194
3.9.2 <i>Objetivos</i>	198
3.9.3 <i>Equipos e insumos</i>	199
3.9.4 <i>Procedimiento</i>	201
3.9.5 <i>Informe</i>	203
3.10 Practica N°9: Intercambiador de calor de tubos y coraza 2.	205
3.10.1 <i>Marco teórico</i>	205
3.10.2 <i>Objetivos</i>	207
3.10.3 <i>Equipos e insumos</i>	208
3.10.4 <i>Procedimiento</i>	210
3.10.5 <i>Informe</i>	214
AUTORES	217

Lista de tablas

Tabla 1 Propiedades de cambio a de fase de compuestos comunes a 1 atm presión.	47
Tabla 2 Estados termodinamicos de compuestos puros.....	116
Tabla 3 Densidad de las mezclas y poder calorífico inferior, tomado de [1].	116
Tabla 4 Relaciones estequiométricas en masa y volumen para diferentes combustibles, tomado de [1].....	117
Tabla 5 Composición química de aire seco	126
Tabla 6 Propiedade térmicas del material de construcción.....	188
Tabla 7 Características geométricas de intercambiador de calor de tubos concéntricos.....	188
Tabla 8 Dimensiones detalladas del equipo.....	201
Tabla 9 Propiedades térmicas del material del equipo	201
Tabla 10 Las dimensiones detalladas de intercambiador de tubos y coraza 2.....	210

Lista de figuras

Figura 1	Diagrama Temperatura – Presión (Cambios de fase sólido-líquido-gas).....	25
Figura 2	Diagrama Temperatura – Tiempo (Curva de calentamiento) para sustancia pura (●) y solución con sustancia no volátil (-).	32
Figura 3	Diagrama Presión – Volumen (Cambio de Fase).....	38
Figura 4	Ventana de inicio de Software MINI-REFPROP.....	39
Figura 5	Ventana de configuración de unidades del sistema.	39
Figura 6	Ventana de selección de estado de Referencia.	40
Figura 7	Ventana de selección de propiedades de interés.....	41
Figura 8	Ventana de selección de sustancia o fluido de interés.....	42
Figura 9	Tabla de propiedades termodinámicas de interés.....	42
Figura 10	Generación de estados en la tabla de Estado específico.	43
Figura 11	Ventana de ecuaciones para la escritura de código o algoritmo de interés.	44
Figura 12	Ventana de sistema de unidades	44
Figura 13	Ventana de solución.	45
Figura 14	Ventana de información de propiedades del diagrama.	46
Figura 15	Diagrama de Propiedades (T-s).	46
Figura 16	Esquema del montaje para medición experimental.....	53
Figura 17	Esquema del equipo para la medición de Temperatura y Presión, con volumen constante	55
Figura 18	Dispositivo Cilindro - Émbolo.....	60
Figura 19	Ventana de Diagrama.....	61
Figura 20	Ilustración de interface de EES.	62
Figura 21	Ventana de adición de texto en diagrama	62
Figura 22	Cilindro – Émbolo (Solución en Interface Gráfica).	64
Figura 23	Esquema experimental.....	68
Figura 24	Montaje primera parte.	73
Figura 25	Componentes de ciclo de refrigeración.....	77
Figura 26	Diagrama T-s de ciclo de refrigeración ideal de equipo piloto.....	78

Figura 27	Componentes de equipo piloto de refrigeración a) compresor b) Condensador c) tubo capilar d) Evaporador.....	78
Figura 28	Schematic diagram of electric configuration.....	84
Figura 29	Diagrama Temperatura – Entropía (Cambio de Fase).....	93
Figura 30	Schematic diagram of electric configuration.....	100
Figura 31	Componentes de maquina reciprocante.....	103
Figura 32	Etapas de ciclo ideal Otto.....	104
Figura 33	Etapas de ciclo ideal Diésel.....	107
Figura 34	Ciclo ideal de potencia de gas.....	112
Figura 35	Esquema de componentes de microturbina comercial, adaptado de Cruz D. [2].....	115
Figura 36	Ciclo Rankine Ideal.....	121
Figura 37	Ciclo Rankine de vapor con recalentamiento.....	123
Figura 38	Propiedades presentadas en la tabla psicrométrica.	128
Figura 39	Esquema del montaje experimental implementado.....	130
Figura 40	Esquema de dispositivo de medición de la conductividad empleando geometría esférica	138
Figura 41	Esquema del dispositivo de medición de la conductividad empleando geometría cilíndrica.....	140
Figura 42	Dispositivo para medición empleando geometría plana.....	142
Figura 43	Aleta y elemento diferencial de volumen de una aleta en extendida en el eje z, con longitud dz, área seccional Ac y perímetro P.....	147
Figura 44	Esquema experimental de laboratorio de Calor.	150
Figura 45	Esquema de cuerpo enfriándose en un medio a temperatura T^∞	154
Figura 46	Cuerpo sometido a proceso de calentamiento o enfriamiento	161
Figura 47	Diagrama Heisler para pared plana.....	168
Figura 48	Schematic diagram of electric configuration.....	175
Figura 49	Esquema de montaje experimental	182
Figura 50	Configuraciones de flujo en intercambiador de doble tubo a) régimen de flujo paralelo b) régimen de flujo contracorriente adaptado de [1].....	185
Figura 51	Esquema de los Intercambiadores de calor del laboratorio de transferencia de calor.	187

Figura 52	Intercambiador de calor de tubos concéntricos.....	188
Figura 53	Flujómetros del banco de intercambiadores de calor a) línea de baja temperatura y b) línea de Alta temperatura.....	190
Figura 54	Isométrico de intercambiador de calor de tubos y coraza horizontal	194
Figura 55	Distribución de tubos cuadrado.....	196
Figura 56	Distribución de tubos cuadrado inclinado.....	196
Figura 57	Distribución de tubos triangular	197
Figura 58	Esquema de los Intercambiadores de calor del laboratorio de transferencia de calor.	200
Figura 59	Flujómetros del banco de intercambiadores de calor a) línea de baja temperatura y b) línea de Alta temperatura	203
Figura 60	Isométrico de intercambiador de calor de tubos y coraza 2.....	205
Figura 61	Esquema de los Intercambiadores de calor del laboratorio de transferencia de calor.	209
Figura 62	Diagrama del proceso de flujo contraflujo con el intercambiador de tubo y coraza 2.	212
Figura 63	Diagrama del proceso de flujo paralelo con el intercambiador de tubo y coraza 2.	213
Figura 64	Flujómetros del banco de intercambiadores de calor a) línea de baja temperatura y b) línea de Alta temperatura.....	214

Agradecimientos

Infinitas gracias a los docentes y estudiantes del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana de la seccional de Montería, quienes han puesto su granito de arena en este trabajo, especialmente a Daniel Espinosa director del programa de Ingeniería Mecánica, Fabio Sánchez, Julio Chaverra, Jesús Humanéz, Juan Pianeta y todos los estudiantes del curso: Área de energía de la escuela de Ingeniería y Arquitectura.

Introducción

El programa de Ingeniería Mecánica tiene unas necesidades en cuanto a laboratorios, debido a que ciertas asignaturas necesitan afianzar sus conocimientos no solo en la parte teórica sino también la parte práctica, una de estas asignaturas es Termodinámica, debido a la importancia que esta tiene en los procesos agroindustriales como la pasteurización, el secado, la des-humidificación, entre otros.

En este manual se mostrará algunas prácticas de gran importancia para los estudiantes del programa de Ingeniería, que le ayudaran a fortalecer el conocimiento de la asignatura.

Las prácticas se inician con conocimientos básicos y generales de las sustancias puras, seguidas de otras más específicas de la asignatura como lo son los poderes caloríficos, balances de masa y energía de primera ley y por último unas aplicativas como la de secado y psicrometría.

Adicional a lo dicho anteriormente se complementa este laboratorio con la utilización de un software de ingeniería como Solidworks, EES (Engineering Equations Solver), entre otros, que proporcionan al estudiante el manejo de una herramienta informática que le será de utilidad para valoración, diseño y análisis de sistemas de transformación de energía.

Objetivos de las prácticas de laboratorio

Con el desarrollo de las prácticas de termodinámica se busca fundamentalmente:

- Familiarizarse con el manejo y la interpretación de variables de uso común en termodinámica, con los instrumentos usados para medirlas, así como los alcances y limitaciones que presentan tales instrumentos.
- Motivar el espíritu crítico durante la práctica. No se trata de aceptar sin más los resultados de un ensayo; más bien se trata de cuestionarlos, de ver si son coherentes, y si no lo son, intentar detectar cuáles fueron las causas que originaron las desviaciones.
- Observar algunos de los fenómenos que se tratan en la parte teórica del curso.
- Manejar el rigor de un informe técnico y/o científico tanto en su contenido, como en su presentación. Por tanto, se seguirá la correspondiente norma ICONTEC y/o Artículo de revista según corresponda.
- Fomentar la búsqueda y el análisis de información en el estudiante con el fin de que se cree una cultura científica para la solución de problemas de ingeniería.

Elaboración del informe

El informe de las prácticas de laboratorio debe entregarse al comienzo de la práctica siguiente, con referencia en los siguientes ítems:

- **Introducción**

Dar una idea global sobre lo que se hizo, los resultados obtenidos y su posible significado. No debe tomar más de una página.

- **Objetivos**

Enunciar en forma breve, completa y numerada los objetivos generales y específicos de la realización de la práctica, desde la perspectiva de los integrantes del equipo.

- **Equipos**

Se hace una descripción exacta de los equipos o instrumentos utilizados para el análisis y medición de variables físicas.

- **Teoría relacionada**

Se describe con una búsqueda bibliográfica las teorías que rigen el fenómeno que se está estudiando, esta debe ser breve y concisa.

- **Cálculos**

Mostrar paso a paso todos los cálculos que se realizaron, incluyendo las fórmulas, unidades y conversiones de unidades (si es necesario).

- **Análisis de resultados**

Consiste en una discusión de los resultados obtenidos, en donde se busca

Interpretar los datos, ya sea mediante gráficos o tablas con el fin de sacar conclusiones acerca de ellos.

- **Conclusiones**

Deben expresarse cuidadosamente. Son, sencillamente, las ideas centrales del análisis de resultados.

- **Preguntas**

Se deben responder todas las preguntas planteadas en las guías de las prácticas o durante la práctica si así sucediera.

- **Bibliografía**

Deben reseñarse técnicamente las fichas de textos y revistas que fueron consultadas para el desarrollo del informe.

1

CAPÍTULO
UNO

1. Laboratorio de termodinámica

Las guías de laboratorio aquí descritas son un complemento didáctico para el desarrollo práctico de la metodología de aprendizaje del curso de Termodinámica. El cual tiene como propósito contribuir a la apropiación del lenguaje científico y la destreza analítica, de forma que el estudiante pueda enfrentar y resolver sistemáticamente ejercicios, problemas y situaciones que impliquen la transformación y aprovechamiento de la energía, a partir de leyes fundamentales de la termodinámica como la primera (Conservación) y segunda Ley (Eficiencia y entropía) que le permita analizar distintos sistemas físicos.

Con el desarrollo teórico práctico se busca que el estudiante tenga la capacidad de valorar sistemas de generación y/o transformación de energía para aplicaciones industriales, comerciales y cotidianas, en estado transitorio y estacionario, mediante la aplicación de los fundamentos de las ciencias básicas y la ingeniería, utilizando recursos técnicos y de tecnológicos convencionales y no convencionales.

- Identifica el concepto fundamental de la Primera Ley de la termodinámica y las transformaciones de energía.
- Efectúa balances de energía de acuerdo con la Primera Ley de la Termodinámica teniendo en cuenta las transformaciones de energía asociadas.
- Interioriza los conceptos de primera ley de la termodinámica, transformaciones de energía y balances de energía.

- Reconoce cada una de las propiedades termodinámicas fundamentales y los conceptos de sustancia pura, cambio de fase, gas ideal y ecuación de estado.
- Maneja las propiedades termodinámicas de una sustancia pura o gas ideal mediante el uso de tablas de propiedades y ecuaciones de estado en procesos de cambio de fase.
- Aprecia la importancia de las propiedades termodinámicas y los conceptos de gas ideal, sustancia pura y ecuación de estado en la ingeniería.
- Identifica y diferencia los conceptos de sistema cerrado y volumen de control en situaciones reales de ingeniería.
- Resuelve problemas básicos de ingeniería en lengua extranjera aplicando la primera ley de la termodinámica y las propiedades termodinámicas en sistemas cerrados y volúmenes de control.
- Valora las estrategias de análisis de sistemas cerrados y volúmenes de control en la solución de problemas de ingeniería.
- Identifica los conceptos fundamentales de la Segunda Ley de la termodinámica, máquina térmica, trabajo reversible e irreversible.
- Determina la eficiencia de segunda ley de la termodinámica de máquinas térmicas y ciclos termodinámicos.
- Interioriza la importancia de la segunda ley de la termodinámica en la evaluación y comparación de desempeño de máquinas térmicas.

1.1 Práctica N° 1: Calor de fusión del hielo

1.1.1 Marco teórico

Calor sensible - La porción de la energía interna de un sistema relacionada con la energía cinética de las moléculas se llama energía sensible. La velocidad promedio y el grado de actividad de las moléculas son proporcionales a la temperatura del gas, por lo que a temperaturas más elevadas las moléculas poseen energías cinéticas superiores y, como consecuencia, el sistema tiene una energía interna más alta. La energía o calor suministrado o retirado de una sustancia (sólido, líquido y/o gas) para que incremente o disminuya su temperatura se designa como calor sensible transferido (Mecanismo de transferencia).

Calor Latente - Cuando una sustancia pura cambia de estado (sólido-líquido-gas) no existen cambios de presión y temperatura; sin embargo, el proceso requiere la transferencia de una cantidad finita de calor a la sustancia para generar los cambios de la materia; estos efectos caloríficos se conocen como calor latente de fusión (sólido-líquido) y calor latente de vaporización (líquido-gas).

La energía interna también se relaciona con diversas fuerzas de interacción entre las moléculas de una sustancia, entre los átomos dentro de una molécula y entre las partículas al interior de un átomo y su núcleo. Las fuerzas que unen a las moléculas entre sí son, como se esperaría, más intensas en los sólidos y más débiles en los gases. Si se agrega suficiente energía a las moléculas de un sólido o de un líquido, éstas superan las

fuerzas moleculares y se separan, de modo que la sustancia se convierte en un gas; este es un proceso de cambio de fase y el calor latente necesario para dar este cambio varía de una sustancia a otra ver **Tabla 1**.

Tabla 1

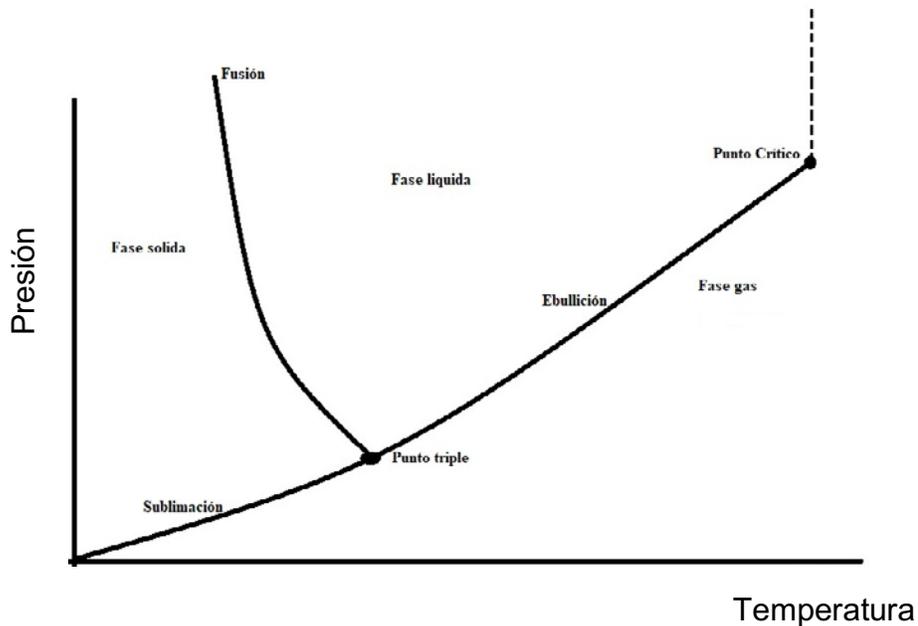
Propiedades de cambio a de fase de compuestos comunes a 1 atm presión.

Sustancia	Punto de Fusión (°C)	Calor latente específico de Fusión (Kcal/Kg)	Punto de ebullición (°C)	Calor latente específico de ebullición (Kcal/Kg)
Alcohol Etílico	-114	24.9	78	204
Agua	0	79.7	100	539
Mercurio	-39	2.82	357	65
Oro	1063	15.4	2660	377
Nitrógeno	-209.98	6.17	-195.8	47.57

La característica principal de todos estos procesos es la coexistencia de dos fases, de acuerdo con la regla de las fases. Un sistema de dos fases formado por una sola especie (sustancia pura) es invariante y su estado intensivo está determinado por la especificación de una sola propiedad intensiva, relacionando las distintas propiedades en las conocidas líneas de saturación o de cambio de fase (ver **Figura 1**). Por tanto, el calor latente que acompaña a un cambio de fase es una función exclusiva de la temperatura.

Figura 1

Diagrama Temperatura – Presión (cambios de fase sólido-líquido-gas)



Por otro lado, al agregar calor a un líquido no saturado, se provocará un aumento de su temperatura; lo anterior se conoce como calor sensible, pues su efecto se puede seguir a través de los cambios térmicos. La capacidad calorífica se define como la cantidad de energía que requiere un cuerpo para que cambie su temperatura en 1 grado o unidad de temperatura; también se puede interpretar como la energía que puede almacenar la materia en función de su temperatura.

Finalmente, la temperatura de un sistema indica el potencial de transferencia de energía en forma de calor. Por lo tanto, mientras exista una diferencia de temperatura entre dos cuerpos en contacto, ocurrirá una transferencia de calor desde aquel a mayor

temperatura hacia aquel de menor temperatura; una vez se alcance el equilibrio térmico, la transferencia de calor cesa.

1.1.2 Objetivos

- Identificar el calor sensible requerido para el calentamiento de agua líquida.
- Calcular el calor de fusión del hielo a presión de 1 atmósfera.
- Verificar que el calor de fusión del hielo no depende de la cantidad de masa.
- Comparar el valor obtenido experimentalmente con el reportado en la bibliografía.

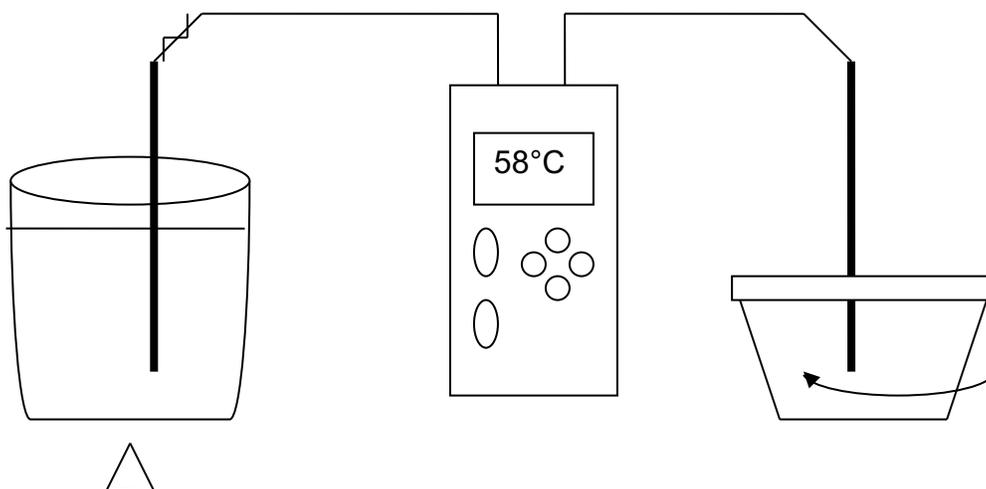
1.1.3 Equipos e insumos

- Parrilla eléctrica de calentamiento.
- Beaker de 200 ml.
- 2 recipientes térmicos con tapa (vaso de poliestireno expandido (icopor) reciclable).
- Balanza de triple brazo.
- 2 termocuplas y 1 Data logger / termómetro de mercurio.
- Hielo y agua (Implemento suministrado por el estudiante).

1.1.4 Procedimiento

- Agregue poco más de 200 ml de agua al beaker y sométalo a calentamiento en la parrilla eléctrica a máxima potencia.

- Pese el recipiente térmico con la tapa.
- Cuando el agua en el beaker comience a generar burbujas (ebullición), inicie la medición de la temperatura del agua.
- En el momento que la temperatura del agua caliente se estabilice (cerca de los 100 °C), agregue en un recipiente térmico los cubos de hielo de manera que pesen aproximadamente 40 g y péselo detalladamente.
- Apague la parrilla de calentamiento y agregue el agua caliente al vaso de poliestireno expandido (icopor) con hielo, cuidando de no derramarla.
- Introduzca el termómetro y agite la mezcla hasta que desaparezca todo el hielo. Tome el dato de temperatura estable que registre.
- Pese el recipiente térmico con tapa y el agua final.
- Repita el procedimiento con un peso del hielo de aproximadamente 80 g.



- Identificar formas de calor disponible sistema.

Cambio energía interna	Fórmula	Líquido incompresible
Calor sensible	$Q_{sensible} = m\Delta u_{1-2}$	Cambio calor sensible es igual al cambio de la energía interna del sistema por la masa.
Calor Latente	$Q_{latente} = M_h h_{if}$	Cambio de calor latente es igual a la energía requerida para derretir la masa hielo.

- Calcule el calor de fusión del hielo para ambos casos usando la siguiente ecuación:

Energía total disponible en el sistema, despreciando el material aislante	<p>Hielo Calor latente = $M_h h_{if- (0^\circ\text{C})}$ Calor sensible líquido = $M_h \Delta u_{0-eg} = M_h (u_{eg} - u_0)$</p> <p>Agua caliente Calor sensible = $m_{ac} \Delta u_{1-eg} = m_{ac} (u_{eg} - u_1)$</p>
Principio de conservación de energía	<p>Cambio energía Hielo = Cambio energía Agua caliente.</p> $M_h h_{if} + M_h \Delta u_{0-eg} \cong m_{ac} \Delta u_{1-eg}$
Cálculo de calor latente específico	$h_{if} = \frac{m_{ac} [u_a _{T_{eq}} - u_a _{T_1}]}{M_h} - (u_a _{T_{eq}} - u_a _{T_0})$

h_{if} : Calor de fusión del hielo [kJ/kg].

m_{ac} : Masa de agua caliente [kg].

M_h : Masa de hielo [kg].

$u_a|_{T_{eq}}$: Energía interna del sistema (agua + hielo) a temperatura final de equilibrio [kJ/kg]. (Tabla A-3 o A-4 (Cengel and Boles 2006))

$u_a|_{T_1}$: Energía interna del agua caliente [kJ/kg]. (Tabla A-3 o A-4 (Cengel and Boles 2006)).

$u_a|_{T_0}$: Energía interna del agua derretida valor inicial [kJ/kg]. (Tabla A-3 o A-4 (Cengel and Boles 2006)).

Investigue el valor de calor de fusión reportado en la bibliografía; calcule el error porcentual del dato experimental frente al dato teórico:

$$\%Error = \frac{h_{if}|_{experimental} - h_{if}|_{teórico}}{h_{if}|_{teórico}} * 100$$

1.1.5 Preguntas

- Represente el proceso sufrido por el agua caliente y el hielo en un diagrama Temperatura – Presión (**Figura 1**).
- ¿Qué pasaría se redujera demasiado la masa de agua caliente?
- Elabore análisis de datos, conclusiones y algunas posibles causas de error, teniendo en cuenta la siguiente información y los objetivos propuestos:

- La ecuación para el cálculo del calor de fusión proviene de un balance de energía (Primera Ley de la Termodinámica), suponiendo que el vaso está aislado al momento de poner juntos el agua y el hielo.
- El hielo se encuentra a 0 °C, y está totalmente sólido.
- El vaso de poliestireno expandido (icopor) no absorbe energía de la mezcla.
- Los datos tomados con los instrumentos tienen una precisión adecuada.

Nota: Todos los informes deben ser entregados según Plantilla Normas Icontec para informes técnicos (Icontec, 2020).

1.2 Práctica N° 2: Temperatura de ebullición de sustancias puras y ascenso ebulloscópico de soluciones

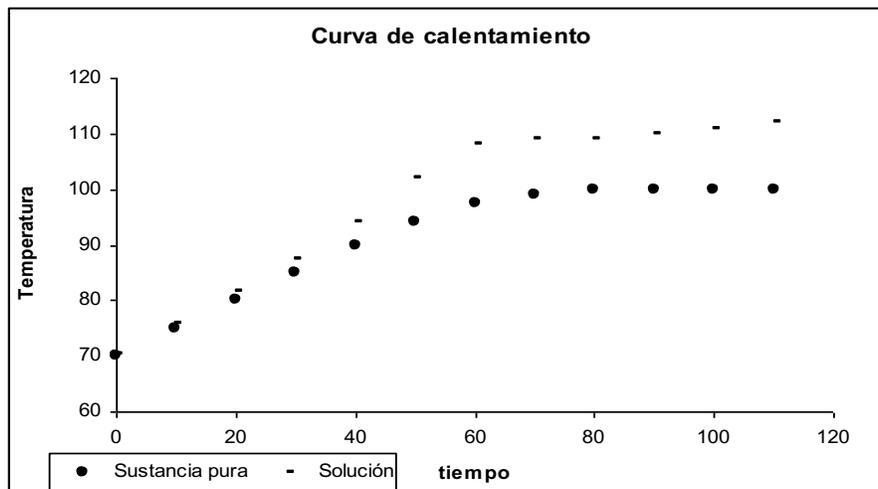
1.2.1 Marco teórico

Cuando una sustancia pura cambia de fase a presión constante, la temperatura permanece también constante durante todo el cambio; por ejemplo, el agua pura líquida a presión de 1 atmósfera (101.325 kPa) se vaporiza a 100 °C y se solidifica a 0.01 °C, y sus temperaturas no varían hasta cambiar completamente de fase. Además, existe una relación entre ambas propiedades, de manera que, si aumenta una, la otra también lo hace; por ejemplo, si se aumenta la presión del agua hasta 200 kPa, el agua cambia de fase a los 120.23 °C.

Sin embargo, cuando se trata de una solución de un líquido y un soluto no volátil (que no se vaporiza), por ejemplo, agua y sal, estas propiedades se ven afectadas de forma que el punto de ebullición aumenta “*aumento ebulloscópico*” (ver **Figura 2**) y/o el punto de solidificación disminuye “*descenso crioscópico*”.

Figura 2

Diagrama Temperatura – Tiempo (Curva de calentamiento) para sustancia pura (●) y solución con sustancia no volátil (-)



Ambos fenómenos dependen de diferentes características de cada una de las sustancias que se estén utilizando, pero se ha encontrado que en general, es proporcional al número de moles del soluto agregado. Además de cambiar estas propiedades, la adición de un soluto no volátil afecta la presión de vapor de un líquido y la presión osmótica del mismo.

1.2.2 Objetivo

- Determinar experimentalmente que existe un ascenso ebulloscópico del agua (Incremento T. de ebullición) provocado por la cantidad de soluto no volátil disuelto.

1.2.3 Equipos e insumos

- Parrilla eléctrica de calentamiento.
- Beaker de 200 ml.
- Balanza de analítica.
- 2 Termocuplas y tarjeta de adquisición de datos.
- Sal y agua.

1.2.4 Procedimiento

- Pese el beaker vacío.
- Agregue 200 ml de agua al beaker y péselo.
- Verifique que la tarjeta de adquisición de datos esté calibrada para medir cada 10 s o 30 s, y comience a tomar datos de temperatura vs. tiempo de la solución, instalando una termocupla dentro del recipiente.
- Encienda la parrilla eléctrica
- Tome datos hasta 7 minutos después de haberse iniciado la ebullición de la solución.
- Repita el procedimiento anterior.
- Antes encender la parrilla eléctrica, pese aproximadamente 40 g de sal y agréguelo al agua; Someta la solución a calentamiento en la parrilla eléctrica.
- Repita el procedimiento anterior
- Antes encender la parrilla eléctrica, pese aproximadamente 20 g de sal y agréguelo al agua; Someta la solución a calentamiento en la parrilla eléctrica.

1.2.5 Informe

- Grafique los datos de T vs. t.
- Calcule el ascenso ebulloscópico experimental.
- Calcule el ascenso ebulloscópico teórico usando la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \frac{2 * R_u * [T^*]^2 * m_{sal}}{h_{fg} * m_{agua} * M_{sal}}$$

En donde:

ΔT : Ascenso ebulloscópico [K].

h_{fg} : Calor de vaporización del agua a la temperatura T^* [kJ/kg](Ver tabla A-4 (Cengel and Boles 2006)).

T^* : Temperatura de vaporización sin el soluto no volátil [K] (Ver tabla A-4 (Cengel and Boles 2006)).

R_u : Constante universal de gas [kJ/kmol*K].

m_{sal} : Masa de sal agregada a la solución [g].

m_{agua} : Masa de agua de la solución [g].

M_{sal} : Peso molecular de la sal [kg/kmol].

- Calcule el error porcentual del dato experimental frente al dato teórico:

$$\%Error = \frac{\Delta T|_{experimental} - \Delta T|_{teórico}}{\Delta T|_{teórico}} * 100$$

- Consulte algunas aplicaciones industriales y de tipo práctico del principio de ascenso ebulloscópico y descenso crioscópico.
- Si se necesita provocar un aumento en la temperatura de ebullición (o descenso en la temperatura de solidificación) ¿preferiría usted un soluto de alto o de bajo peso molecular?
- Elabore análisis de datos, conclusiones y algunas posibles causas de error.

1.3 Práctica N° 3: Introducción al software para el cálculo de propiedades y diagramas de cambio de fase

1.3.1 Marco teórico

EES son las siglas de Solucionador de Ecuaciones de Ingeniería (Engineering Equations Solver). La función principal suministrada por EES es la solución de un grupo de ecuaciones algebraicas.

EES ofrece las ventajas de un simple juego de órdenes que un principiante puede aprender a utilizar rápidamente para resolver cualquier problema algebraico. De cualquier modo, las posibilidades de este programa son muchas y más útiles también para cualquier experto. La gran cantidad de datos sobre propiedades termodinámicas y de transferencia que contiene EES son de gran ayuda en la resolución de problemas de Termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor. EES puede utilizarse para muchas aplicaciones ingenieriles; es muy conveniente para la formación, cursos de ingeniería mecánica y para el ingeniero con la necesidad de resolver problemas prácticos.

REFPROP es un programa informático, distribuido a través del programa de datos de referencia estándar del NIST, que proporciona propiedades termofísicas de fluidos puros y mezclas en una amplia gama de condiciones de fluidos, incluidas las fases líquida, gaseosa y supercrítica. El software contiene modelos matemáticos con el objetivo de representar las propiedades dentro de la incertidumbre subyacente a los datos

experimentales utilizados en su desarrollo. Estas propiedades se pueden utilizar para diseñar soluciones a los desafíos que presenta un clima cambiante, así como para proporcionar datos termofísicos precisos a los usuarios de la industria química, la industria del petróleo y academia.

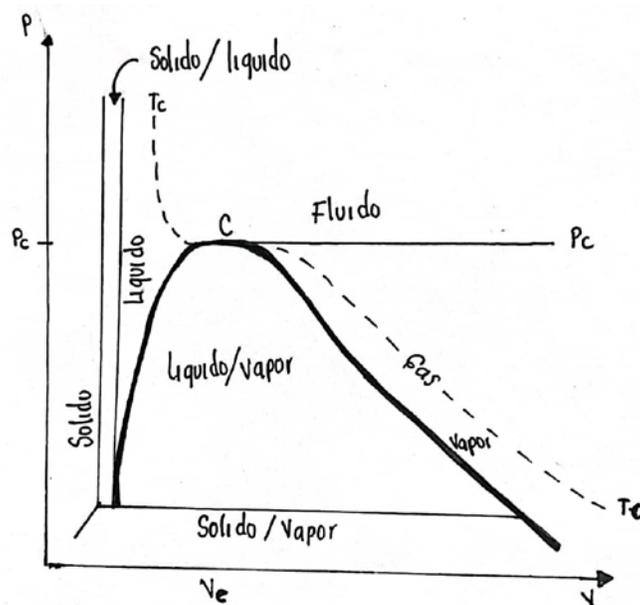
Las variaciones de las propiedades termodinámicas intensivas (T , P , v , u , h , s , etc.) durante los procesos de cambio de fase de las sustancias puras se estudian y comprenden mejor con la ayuda de diagramas de propiedades (ver Figura 3). Aunque las tablas termodinámicas poseen información más detallada y precisa, estos diagramas permiten observar de forma simultánea las diferentes fases (líquido comprimido, equilibrio líquido vapor, vapor sobrecalentado y estado supercrítico), y observar más fácilmente los cambios a través de los procesos.

1.3.2 Objetivos

- Construir diagramas de propiedades de sustancias (agua y refrigerante 134a) en cambios de fase líquido gas, a partir de la utilización del software EES.
- Localizar en diagrama de propiedades las regiones más importantes de una sustancia pura: punto crítico, líquido comprimido, líneas de saturación, mezcla saturada, vapor sobrecalentado y sustancia supercrítica.
- Identificar como cambian las propiedades de una sustancia dependiendo del estado de la sustancia pura.

Figura 3

Diagrama Presión – Volumen (Cambio de Fase)



1.3.3 Equipos e insumos

- Software EES

1.3.4 Procedimiento para software

Mini-Refprop



- Dar clic en el icono  y nuevamente clic en *Continue*.
- Se mostrará la ventana de inicio del software, como se ve en la **Figura 4**.

Figura 4

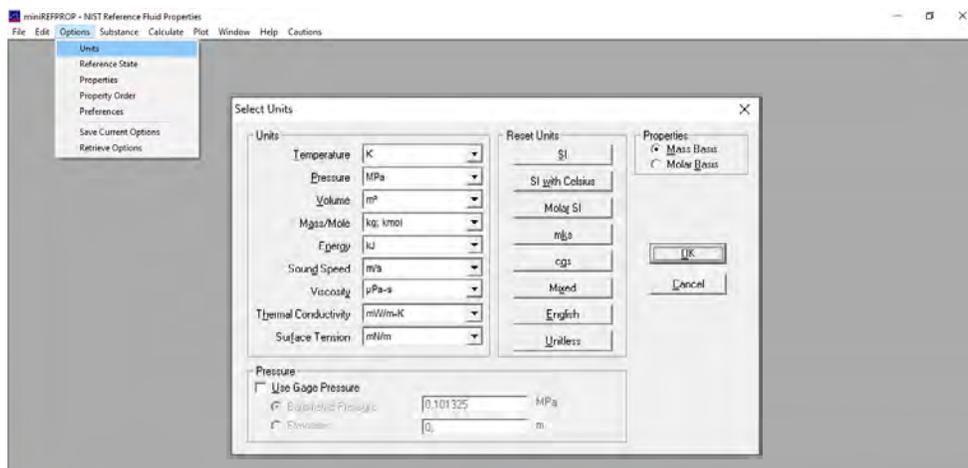
Ventana de inicio de Software MINI-REFPROP



- Para iniciar damos clic en la barra de menú en *Options*, y seleccionamos *Units*, en esta opción no permite ajustar las unidades de trabajo del programa en el sistema deseado o seleccionar las unidades de interés para las propiedades termodinámicas, como se presenta en la **Figura 5**, al finalizar damos clic en OK.

Figura 5

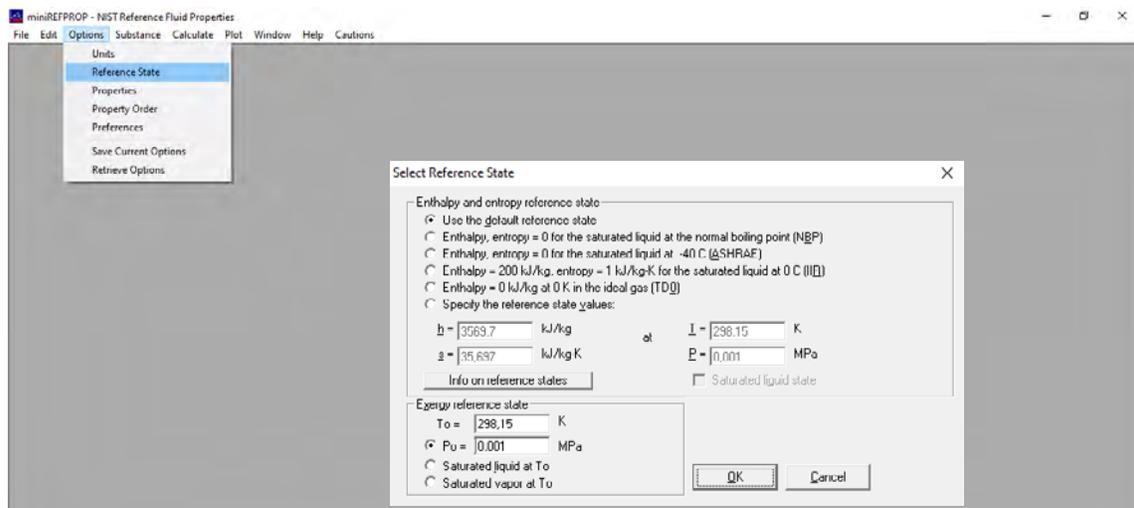
Ventana de configuración de unidades del sistema



- A continuación damos clic *Options*, clic en *Select Reference State*, y seleccionamos el estado de referencia de interés para los valores de energía, al finalizar damos clic en OK.

Figura 6

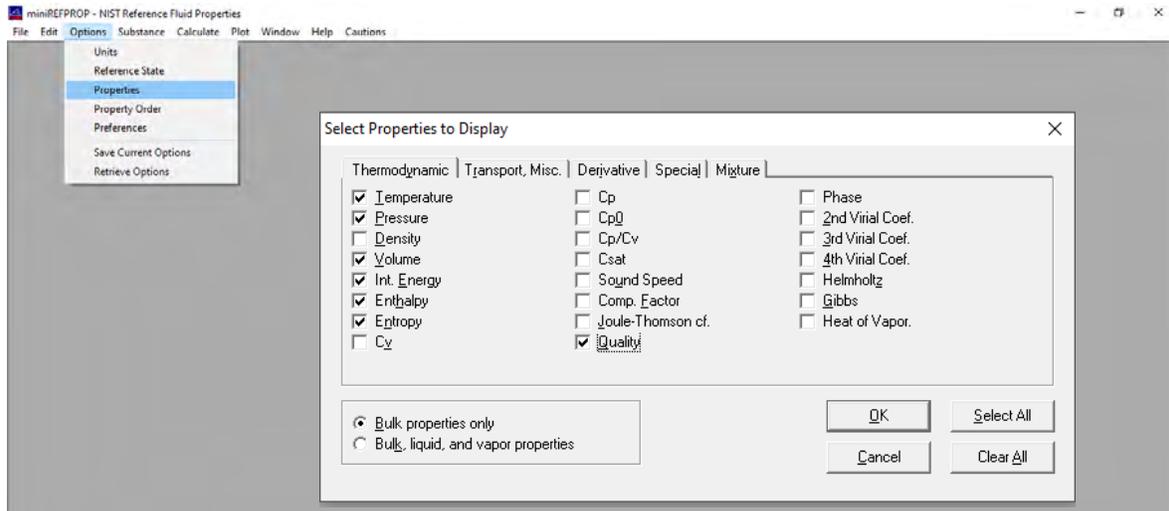
Ventana de selección de estado de Referencia



- A continuación, debemos hacer clic en *Options*, damos clic en *Properties*, donde podremos seleccionar las propiedades termodinámicas, de transporte, Derivadas, Especiales y de Mezcla que nos ofrece el programa, en esta opción habilitamos haciendo clic las propiedades de *Temperature, Pressure, Volume, Int. Energy, Enthalpy, Entropy y Quality*. Al finalizar damos OK, como se muestra en la **Figura 7**.

Figura 7

Ventana de selección de propiedades de interés



- Para continuar vamos a la barra de menú y damos clic en *Substance* y con el puntero seleccionamos *Pure Fluid (Single Compounds)*, el cual nos abre un cuadro de selección donde, escogeremos el fluido de interés para la práctica, en este caso damos clic *Water*, y posteriormente en OK, como se muestra en la Figura 8 .
- Para finalizar, en la barra de menú, damos clic en *Calculate*, donde nos dará la opción de seleccionar el tipo de tabla termodinámica a ser construida, en este caso nos desplazamos hasta *Specified State Points* damos clic, y nos aparecerá una ventana con una tabla en blanco para el fluido seleccionado, con las propiedades de interés, y las unidades seleccionadas previamente como se muestra en la **Figura 9**.

Figura 8

Ventana de selección de sustancia o fluido de interés

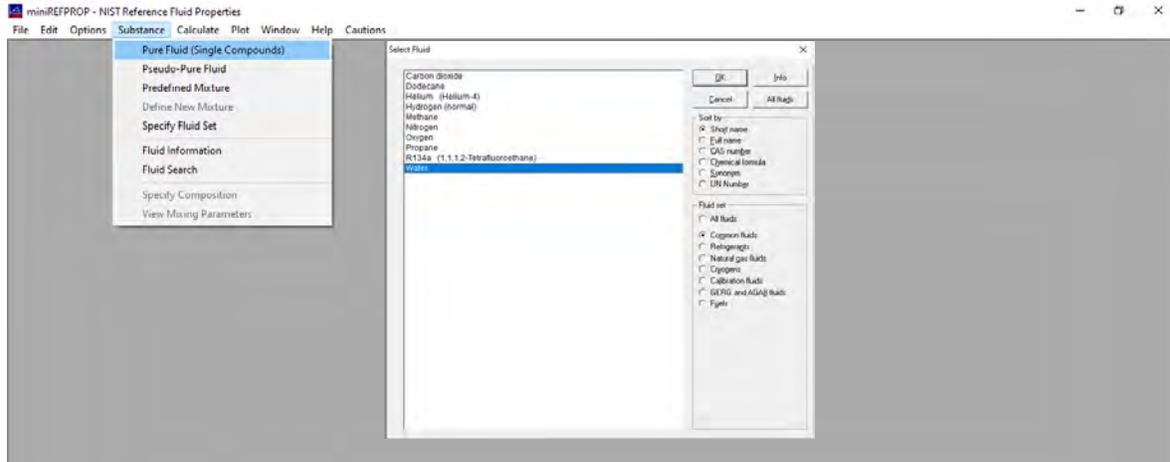
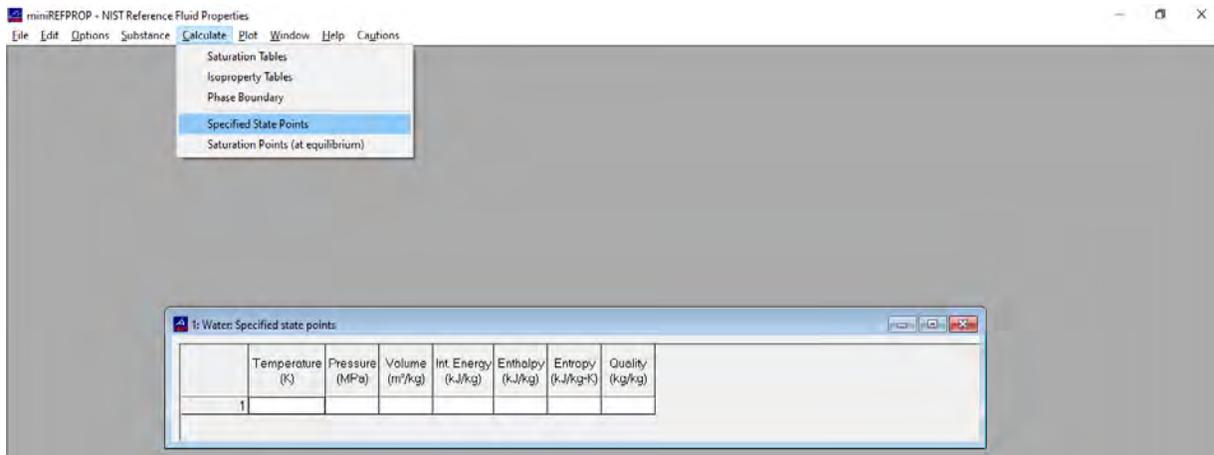


Figura 9

Tabla de propiedades termodinámicas de interés



- Para finalizar para establecer un estado termodinámico y encontrar las propiedades mínimas necesarias, debemos introducir por lo menos dos propiedades intensivas independientes, o una propiedad intensiva y una específica independientes,

siguiendo el postulado de estado para sustancia pura. En este caso con la introducción de una temperatura y una presión del agua podemos establecer el estado y estimar sus propiedades.

Figura 10

Generación de estados en la tabla de Estado específico

The figure shows three sequential screenshots of the EES software interface for a 'Water: Specified state points' calculation. Each window displays a table with the following columns: Temperature (K), Pressure (MPa), Volume (m³/kg), Int. Energy (kJ/kg), Enthalpy (kJ/kg), Entropy (kJ/kg-K), and Quality (kg/kg).
- The first screenshot shows state 1 with T=273.15 K, P=101.00 MPa, and state 2 with T=273.15 K, P=101.00 MPa, and Quality=1.0000.
- The second screenshot shows state 1 with T=273.15 K, P=101.00 MPa, and state 2 with T=373.1 K, P=101.00 MPa, and Quality=1.0000.
- The third screenshot shows state 1 with T=273.15 K, P=101.00 MPa, and state 2 with T=373.10 K, P=0.10124 MPa, and Quality=1.0000.

Con este software es posible encontrar el estado seleccionando distintas propiedades como se presenta en la **Figura 10**.

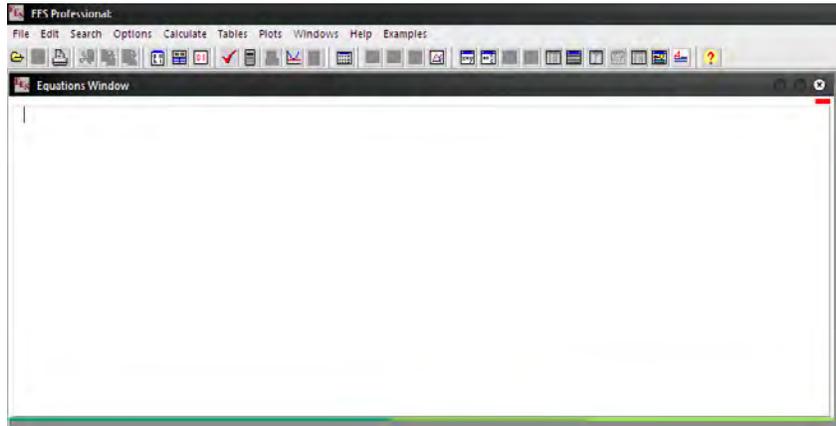
Software EES



- Dar clic en el icono  y nuevamente clic en continúe.
- Muestra una ventana llamada Equations Windows. Como se muestra en la **Figura 11**.

Figura 11

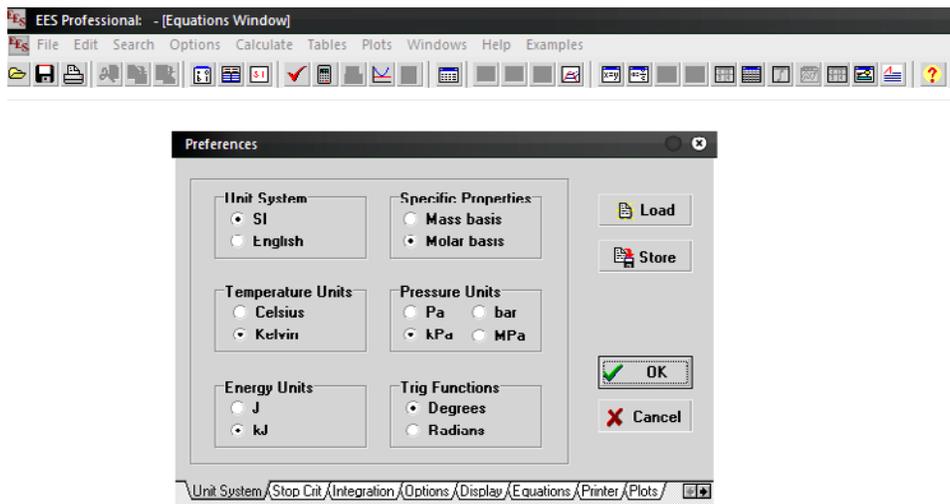
Ventana de ecuaciones para la escritura de código o algoritmo de interés



- Antes de empezar a escribir arrastramos el puntero hasta la barra de menú *options* y seguido hacemos clic en *Unit system*, asignamos en que sistema de unidades se debe manejar, como se muestra en la **Figura 12**.

Figura 12

Ventana de sistema de unidades



- A partir de los datos de temperatura y de líquido saturado para agua, se procede a obtener las propiedades de Presión y Energía Interna. Escribiendo en la Ventana de Ecuaciones lo siguiente:

```
"Datos Conocidos"  
T[1]=70[C]  
"Líquido saturado"  
"Calculo de las Propiedades"  
P[1]=PRESSURE(Water;T=T[1];X=1)  
u[1]=INTENERGY(Water;T=T[1];P=P[1])
```

Y se presiona la tecla F2 y muestra el cálculo de las propiedades. Como se muestra en la **Figura 13**.

Figura 13

Ventana de solución

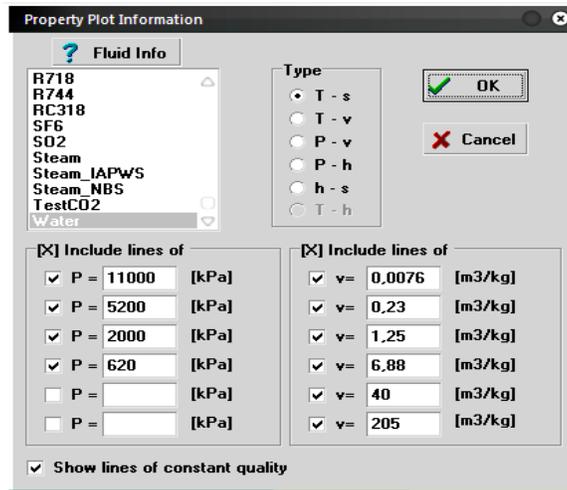
Sort	1 P_i [kPa]	2 T_i [C]	3 u_i [kJ/kg]
[1]	31,18	70	2469

Para la realización de diagramas (P-v, T-s, etc.) se procede a lo siguiente:

- Arrastramos el puntero hasta el icono *property plot*  y hacemos clic. Luego aparece una ventana llamada *property plot information*, el cual muestra el tipo de fluido que se va a seleccionar y el tipo de gráfica que se quiere realizar. Como se observa en la **Figura 14**.

Figura 14

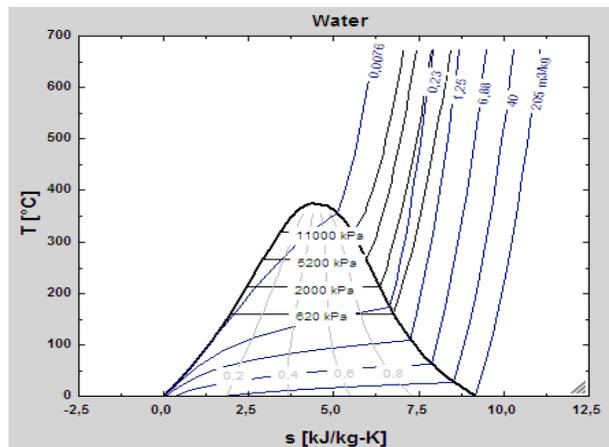
Ventana de información de propiedades del diagrama.



Y por último mostrará el diagrama.

Figura 15

Diagrama de propiedades (T-s)



1.3.5 Informe

- Completar la siguiente tabla utilizando el software EES.

Tabla 2

Estados termodinámicos de compuestos puros

Sustancia	T (°C)	P (kPa)	u (kJ/kg)	Calidad	Fase
Agua	70				Líquido saturado
R134a	100	1500			
Agua		650		0.68	
R134a	-20		115.5		
Agua		1000	3296.8		
Agua	92	200			
Agua	337				Vapor saturado
R134a	-6	834			
Agua	700	12500			
R134a		2200			Vapor saturado

- Mostrar todos los estados definidos en la tabla en un diagrama P vs. v.
- Identifique las condiciones del punto crítico para cada sustancia, para las gráficas. Por “encima” de éste ¿la sustancia es un gas o un líquido? Justifique su respuesta.
- Compare los cambios en las propiedades de cada sustancia, en las regiones de líquido comprimido y de vapor sobrecalentado. ¿Qué conclusión se puede realizar?
- Elabore análisis y conclusiones acerca de los comportamientos de ambos fluidos de acuerdo con lo observado en las gráficas.

Responda las siguientes preguntas conceptuales:

- Defina la propiedad de un sistema.
- ¿Cómo puede convertirse una propiedad extensiva en una propiedad intensiva?
- ¿Qué dice la Ley Cero de la Termodinámica? Interpretela en un ejemplo cotidiano.
- Defina sustancia pura. ¿Se puede considerar al aire como una sustancia pura durante un proceso de disminución de su temperatura (enfriamiento)?
- ¿Cuál es la diferencia entre líquido saturado y líquido comprimido? ¿Y entre vapor saturado y vapor sobrecalentado?
- ¿Hay diferencia entre las propiedades intensivas del vapor y líquido?
- ¿Es cierto que el agua hierve a mayores temperaturas a presiones más altas?

Explique.

- ¿La cantidad de energía absorbida por 1 kg de agua líquida saturada cuando hierve a 100 °C, es igual a la energía liberada cuando 1 kg de vapor saturado a 100 °C se condensa? Explique.

1.4 Práctica N° 4: Presión, Volumen y Temperatura

1.4.1 Marco teórico

Los modelos físicos que relacionen al menos tres propiedades independientes de la materia como son la presión, la temperatura, la densidad, el volumen específico y/o energía interna de una sustancia pura se denomina ecuación de estado. Hay varias ecuaciones de estado, algunas sencillas y otras muy complejas: la más sencilla y mejor conocida para sustancias en la fase gaseosa es la ecuación de estado de gas ideal, la cual predice el comportamiento P - v - T de un gas con bastante exactitud, dentro de cierta región elegida adecuadamente.

$$Pv = RT \quad \text{Ec. 1}$$

La ecuación 1 es la ecuación de estado de gas ideal, o sencillamente relación de gas ideal; un gas que obedece esta relación recibe el nombre de gas ideal. En esta ecuación, P es la presión absoluta, T es la temperatura absoluta y v es el volumen específico. La constante R es diferente para cada gas y se determina a partir de

$$R = \frac{R_u}{M} [kJ kg^{-1} K^{-1}] \text{ o } [kPa m^3 kg^{-1} K^{-1}] \quad \text{Ec. 2}$$

Donde R_u es la constante universal de los gases y M es la masa molar (llamada también peso molecular) del gas. La constante R_u es la misma para todas las sustancias y su valor es

$$R_U = \begin{array}{l} 8.3144 [kJ kmol^{-1} K^{-1}] \text{ o } [kPa m^3 kmol^{-1} K^{-1}] \\ 0.083144 [bar m^3 kmol^{-1} K^{-1}] \\ 0.08205746 [atm L mol^{-1} K^{-1}] \\ 1.98588 [btu lb mol^{-1} R^{-1}] \\ 10.7316 [Psia ft^3 lb - mol^{-1} R^{-1}] \end{array}$$

La masa molar **M** se define como la masa de un mol (llamada también gramo- mol, abreviado gmol) de una sustancia en gramos, o bien, la masa de un **kmol** (llamada también kilogramo-mol, abreviado kgmol) en kilogramos. En unidades inglesas es la masa de **1 lbmol en lbm**. La masa de un sistema es igual al producto de su masa molar **PM** y el número de moles **n** así pues **m=N*PM**, por lo que podemos reescribir la ecuación 1 de la siguiente manera:

$$PV = nR_u T \quad \text{Ec. 3}$$

Como una función del proceso aplicado sobre el sistema es posible establecer algunas relaciones para gases ideales como son:

- Isotérmico y masa constante $P_1 V_1 = P_2 V_2$ (Boyle-Mariotte)
- Isobárico y masa constante $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ (Charles)
- Isocórico y masa constante $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$ (Gay Lussac)
- Isotérmico e isobárico $\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$ (Principio de Avogadro)

1.4.2 Objetivos

- Realizar un análisis comparativo de la compresión y expansión de gas(aire) con la implementación de la ecuación de gas ideal para la predicción del estado termodinámico durante el proceso.
 - Identificar instrumentos comunes en la medición de temperatura y presión.
 - Identificar el estado del aire a partir de propiedades del material.
 - Utilizar las relaciones más comunes para gas ideal para completa identificación del estado.

1.4.3 Equipos e insumos

- Compresor
- Flexómetro
- Medidor de presión de columna Mercurio
- 1 termocupla tipo K
- 1 termómetro digital
- Cronómetro
- Recipiente aislado (12000 cm^3) y accesorios
- Manómetro de Bourdon (carátula)

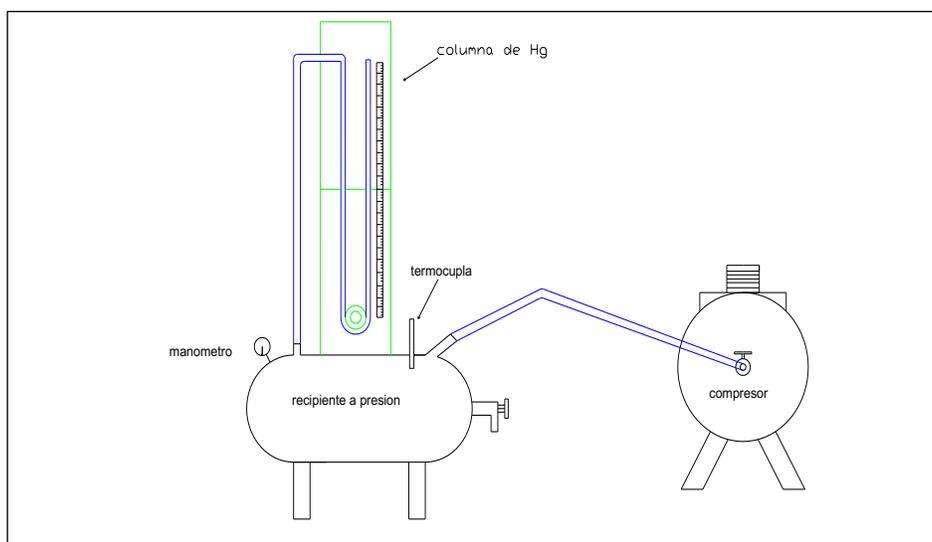
1.4.4 Procedimiento

Compresión

- Inicie el procedimiento abriendo la válvula de ingreso de aire, dejando equilibrar la presión del tanque con la presión atmosférica.
- Mida la temperatura dentro del recipiente.
- Cierre la válvula de ingreso al recipiente y conecte la línea de suministro de aire.
- Abra la válvula de ingreso de aire hasta alcanzar una presión de 5psi en el manómetro de bourdon, tome el tiempo que dura el llenado.
- Cierre la válvula, mida la presión y temperatura con los distintos dispositivos instalados (columna de mercurio).
- Repita el procedimiento para alcanzar presiones de 10, 15 y 20 psi. (Realizar el procedimiento tres veces para cada toma de presión 5, 10, 15 psi). Trate de que el llenado del tanque, para las tomas de datos sea igual o aproximado.
- Una vez alcanzada la presión máxima, pese el recipiente lleno de aire.

Figura 16

Esquema del montaje para medición experimental



Calcular:

- La presión del manómetro de Bourdon (manómetro de caratula) en mmH₂O
- La presión absoluta del sistema en mmHg
- Cantidad de aire que entra en moles y kilogramos en cada proceso de llenado
- Flujo de aire en mol/s y en kg/s en cada proceso de llenado
- Hacer los cálculos anteriores asumiendo que la temperatura en cada llenado permanece constante y es igual a la temperatura inicial.

Analizar:

- ¿Es recomendable asumir un proceso a temperatura constante?
- ¿Qué puede ocurrir con las variables del proceso si se hace el llenado de manera mucho más lenta?

Descompresión:

- Una vez alcanzada la presión máxima en el procedimiento anterior, desconecte el suministro de aire del recipiente, con la válvula de ingreso cerrada.
- Abra la válvula de ingreso dejando escapar gas hacia el entorno, hasta alcanzar una presión de 15 psi.
- Cierre la válvula, mida la presión y temperatura con los distintos dispositivos instalados (columna de mercurio)
- Repita el procedimiento para alcanzar presiones de 10, 5 y 0 psi. (Realizar el procedimiento tres veces para cada toma de presión 10, 5, 0 psi). Trate de que el vaciado del tanque, para las tomas de datos sea igual o aproximado.

Calcular:

- La presión del manómetro de Bourdon en mmH₂O
- La presión absoluta del sistema en mmHg
- Cantidad de aire que entra en moles y kilogramos en cada proceso de llenado
- Flujo de aire en mol/s y en kg/s en cada proceso de llenado hacer los cálculos anteriores asumiendo que la temperatura en cada vaciado permanece constante y es igual a la temperatura inicial.

Graficar:

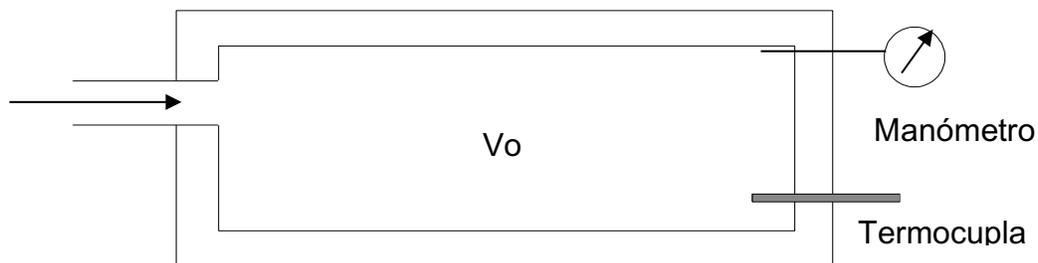
- Presión Vs Tiempo
- Flujo másico evacuado Vs intervalo de tiempo

Analizar:

Comportamiento de los parámetros medidos y el efecto de considerar la compresión o expansión isotérmica.

Figura 17

Esquema del equipo para la medición de Temperatura y Presión, con volumen constante



Calcular el flujo de aire que entra en el recipiente; al medir ambos la presión y la temperatura en el estado inicial y final, se puede establecer la cantidad de moles en el volumen del recipiente. Por tanto, aplicando la ecuación de gas ideal $P_i * V_i = n_i * R_u * T_i$, se puede despejar el número de moles n_i :

$$n_i = \frac{P_i * V_i}{R_u * T_i} \quad \text{Ec. 4}$$

Por tanto, la diferencia de moles entre el estado 1 y 2, en el recipiente será

$$n_2 - n_1 = \frac{P_2 * V_2}{Ru * T_2} - \frac{P_1 * V_1}{Ru * T_1} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde 1 es el estado inicial y 2 el estado final. Simplificando la Ec. 4, al aplicar las condiciones operativas como $V_1 = V_2$ (Volumen constante) y $T_2 = T_1$ (Temperatura constante), se puede hacer la siguiente ecuación:

$$n_2 - n_1 = \frac{V}{Ru * T} (P_2 - P_1) \quad \text{Ec. 5}$$

Haciendo el seguimiento al tiempo Δt requerido para pasar del estado 1 al 2, es posible establecer el flujo de molar en el proceso de la siguiente manera, analizando en función del tiempo (t):

$$\frac{n_2 - n_1}{\Delta t} = \frac{\Delta n}{t} = \frac{V}{RuTt} (P_2 - P_1) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde Δn es la cambio de moles en el proceso (La cantidad de aire en moles que entra al tanque es $\Delta n = n_2 - n_1$). Para calcular el flujo másico se puede establecer una relación directa entre el flujo molar y flujo másico utilizando el peso molecular de la sustancia

$$\dot{m} = \frac{\Delta n}{t * PM} \quad \text{Ec. 7}$$

1.4.5 Informe

- ¿Qué es un gas ideal y en qué condiciones este modelo de ecuación de estado se puede aplicar a cualquier sustancia en fase gas?
- ¿Por qué se presentan desviaciones en la lectura de la presión en el manómetro Bourdon comparado con la medida en la columna líquida?
- ¿Cuál es el principio de funcionamiento de una termocupla?
- Si el manómetro de un tanque registra una presión de 50psi en Medellín, cuánto debe registrar en Montería si la temperatura y el volumen son iguales.

1.5 Práctica N° 5: Aplicación del Software EES y Trabajo de Frontera

1.5.1 Marco teórico

La expansión o compresión de un gas en un dispositivo cilindro – émbolo, es un ejemplo común de la transformación de la energía de la materia en un trabajo mecánico. Durante este proceso, parte de la frontera (la cara interior del émbolo) se mueve en ambas direcciones. Por tanto, el trabajo de expansión y la compresión a menudo recibe el nombre de trabajo de frontera móvil o trabajo de frontera. El trabajo de frontera es la forma primaria de trabajo en los motores de automóvil. Durante su expansión, los gases de combustión obligan al émbolo moverse, y éste a su vez hace girar al cigüeñal.

El trabajo de frontera asociado con las máquinas o compresores reales no puede determinarse con exactitud a partir solamente de un análisis termodinámico, debido a que el émbolo suele moverse a velocidades muy altas, dificultando que el gas al interior se mantenga en equilibrio. En esas condiciones no es posible identificar los estados por los que pasa el sistema durante el proceso, y no puede trazarse ninguna trayectoria del proceso. Por tanto, el trabajo de frontera en máquinas y compresores reales se determina mediante mediciones directas.

El trabajo de frontera total realizado durante el proceso, cuando el émbolo se mueve se obtiene al sumar todos los trabajos diferenciales desde el estado inicial 1 hasta el estado final 2 (Ver ecuación 1).

$$W_b = \int_1^2 P dV \quad \text{Ec. 1}$$

Existen distintos procesos de trabajo de frontera como: Proceso a volumen constante, Proceso Isobárico (P constante), Proceso Isotérmico (T constante) y el Proceso Politrópico.

1.5.2 Objetivos

- Conocer las aplicaciones del Software con bases de datos termodinámicos en los distintos problemas de que se presentan en ingeniería diariamente (Cilindro - Émbolo).
- Poner en práctica los distintos procesos térmicos que implican la generación de trabajo de frontera.
- Calcular el trabajo de frontera y los cambios de energía de un sistema.

1.5.3 Equipos e insumos

- Software EES.

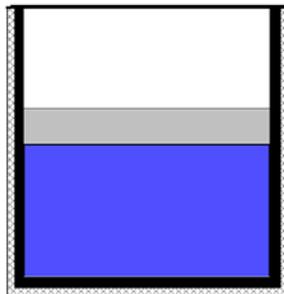
1.5.4 Procedimiento

- Ejecutamos el Software EES descrito anteriormente para responder los siguientes problemas termodinámicos.
- Un dispositivo cilindro – émbolo sin fricción (ver Figura 18) contiene 10 lbm de vapor de agua a 60 psia y 320 °F. El calor se transfiere al vapor hasta que la

temperatura alcanza 400°F. Si el émbolo no está unido a un eje y su masa es constante, determine el trabajo realizado por el vapor durante este proceso.

Figura 18

Dispositivo Cilindro - Émbolo



- Asignamos las unidades del sistema en que se va a trabajar el ejemplo.
- Se procede a definir los estados, los datos que suministra el ejemplo y se escribe el código.

```
" datos del problema"  
m=10[lbm]  
" condiciones iniciales"  
P1=60[psia]  
T1=320[F]  
" condiciones finales"  
T2=400[F]  
P2=P1  
" cálculo de propiedades"  
v_1=VOLUME (steam;T=T1;P=P1)  
v_2=VOLUME (steam;T=T2;P=P2)  
" cálculo de trabajo de frontera a presión constante"  
Wb=m*P1*(v_2 - v_1)*(1/5.404)
```

- Presionamos F2 para ver la solución.

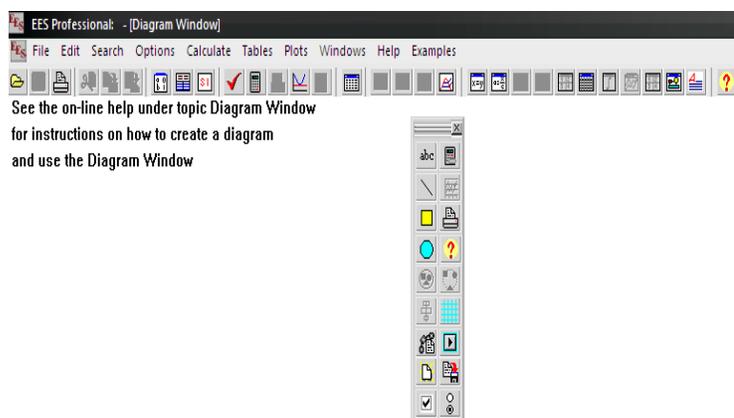
Ya obtenida la solución, se orientará el código a objeto, el cual va a permitir a modificar cualquier dato de entrada suministrado por el problema sin necesidad de

modificar el código. (Implementación de interface). Para realizar la implementación seguimos los siguientes pasos:

- Arrastramos el puntero hasta el icono *Diagram Windows*  y hacemos clic. Y aparecerá la siguiente ventana como se muestra en la **Figura 19**.

Figura 19

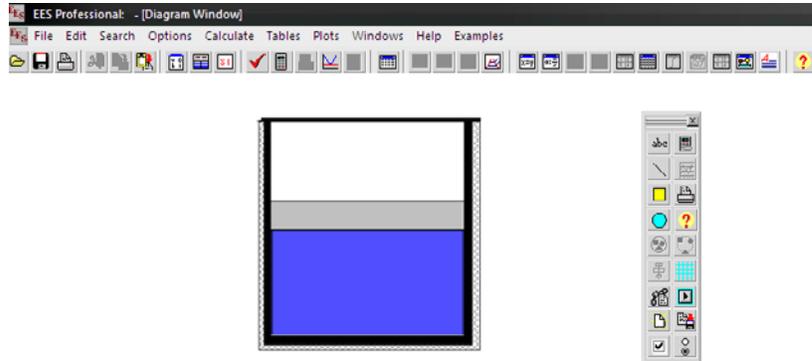
Ventana de diagrama



- Se copia el dibujo de cilindro – émbolo (**Figura 18**). Y se pega en Diagram Windows y se selecciona *Picture* y hacemos clic en *Paste* como se muestra en Figura 20. Se obtiene lo siguiente:

Figura 20

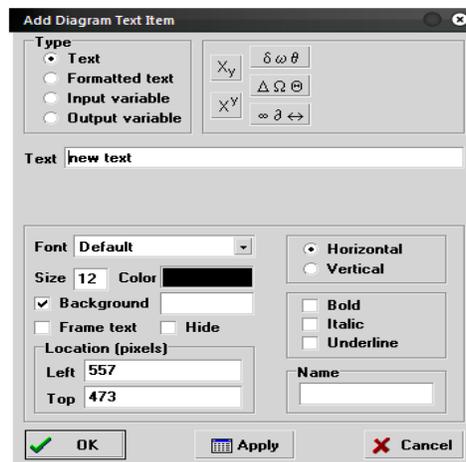
Ilustración de interface de EES



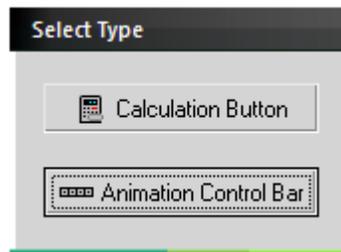
Ahora se procede a insertar las variables de entradas y de salidas, presionando en la pequeña barra de herramienta que aparece en *Diagram Windows* el botón , el cual aparecerá un cuadro como se observa en la **Figura 21**.

Figura 21

Ventana de adición de texto en diagrama



- Ingresamos las variables y seleccionamos ok. Nuevamente arrastro el puntero hacia el botón , el cual aparecerá un cuadro como se observa en la siguiente imagen:



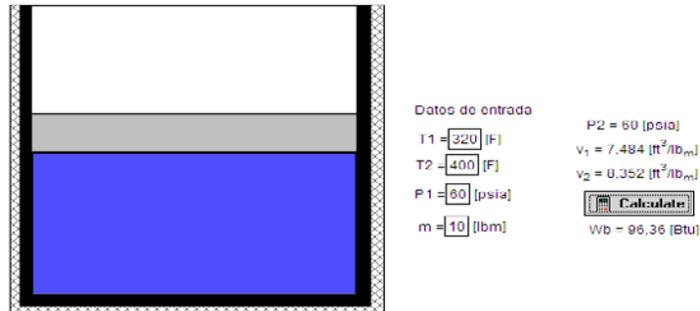
- Seleccionamos *Calculation Button*.
- Ahora arrastramos el puntero hasta el icono Equations Windows  y se escribe por encima de datos del problema `$ifnot diagramwindow` y por debajo de `T2=400[F] $endif`.

```
$ifnot diagramwindow  
"datos del problema"  
m=12[lbm]  
"condiciones iniciales"  
P1=60[psia]  
T1=320[F]  
"condiciones finales"  
T2=400[F]  
$endif  
P2=P1  
v_1=VOLUME (steam;T=T1;P=P1)  
v_2=VOLUME (steam;T=T2;P=P2)  
Wb=m*P1*(v_2 - v_1)*(1/5,404)
```

- Retornamos a  y desactivamos la pequeña barra de herramienta y presionamos Calculate o F2. Se observará como la **Figura 22**.

Figura 22

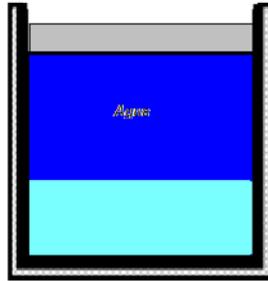
Cilindro – Émbolo (Solución en Interface Gráfica)



1.5.5 Informe

Resuelva las siguientes preguntas, implementando la programación de algoritmos en el programa EES.

- Un dispositivo cilindro – émbolo sin fricción contiene 0.1 m³ de agua líquida y 0.9 m³ de vapor de agua en equilibrio a 800 Kpa. Se transfiere calor a presión constante hasta que la temperatura alcanza 350° C.
 - a) ¿Cuál es la temperatura inicial del agua?
 - b) Determine la masa total del agua
 - c) Calcule el volumen final
 - d) Calcule el trabajo total del sistema
 - e) Muestre el proceso en un diagrama p-v respecto de las líneas de saturación.



- Una masa de 5 kg de vapor de agua a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se calienta a presión constante hasta que la temperatura alcanza $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Calcule el trabajo realizado por el vapor durante este proceso.
- Un dispositivo de cilindro-émbolo contiene vapor saturado a 101KPa . Al dispositivo se le adiciona un flujo de calor constante, pero el émbolo se mantiene estacionario mientras la presión y la temperatura ascienden a 1.2 MPa y $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Se continúa con la adición de calor al dispositivo para que la temperatura se eleva hasta $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el émbolo se mueve para mantener una presión constante.
 - I. Determine el trabajo realizado por el émbolo durante todo el proceso
 - II. Determine el calor transferido al sistema durante todo el proceso
 - III. Represente la trayectoria del proceso en un diagrama P-v y P-h.
- Construya la trayectoria de compresión de aire de 14.533 Psia a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una presión de 130.53 Psia en un diagrama P-v con al menos 5 puntos y calcule el trabajo requerido para su compresión para:
 - Compresión politrópica $n=1.3$
 - Compresión isotérmica de gas ideal

1.6 Práctica N° 6: Capacidad calorífica de sólidos

1.6.1 Marco teórico

Es posible observar que 1 kg de diferentes sustancias requieren distintas cantidades de energía para aumentar su temperatura en una cantidad específica; una experimentación cuidadosa revela además que esta propiedad varía con la temperatura y la presión. Esta propiedad la define la Capacidad Calorífica (o Calor Específico): “cantidad de energía que debe ser añadida a una cantidad dada de una sustancia para aumentar en un grado su temperatura”.

Así, un kg de agua líquida requiere 41.8 kJ de energía para aumentar su temperatura de 20 a 30 °C, mientras que el hierro necesita 4.5 kJ para efectuar el mismo cambio. Adicionalmente, el calor específico del cobre a - 50 ° C es 0.367 kJ/kg*K, pero a 200 °C aumenta a 0.403 kJ/kg*K (aproximadamente un 10 %). Por lo tanto, la capacidad calorífica es una propiedad y es función de otras propiedades (como la temperatura y la presión): es decir, cuando la temperatura o la presión varíen, la capacidad calorífica de un material variará.

En termodinámica interesan dos clases de calores específicos: el calor específico a presión constante C_p (energía ganada a lo largo de un proceso a presión constante) y el calor específico a volumen constante C_v (energía ganada durante un proceso a volumen constante). Ambas propiedades se relacionan con los cambios de energía interna y cambios de entalpía de las sustancias bajo ciertas circunstancias específicas.

1.6.2 Objetivos

- Determinar experimentalmente la capacidad calorífica promedio de diversos materiales sólidos.
- Comparar la capacidad calorífica promedio de diversos tipos de materiales (conductores, aislantes) entre sí.
- Comparar los valores obtenidos con los reportados en la bibliografía.

1.6.3 Equipos e insumos

- Estufa.
- 2 Beaker de 200 ml.
- 2 agitadores.
- 2 vasos de poliestireno expandido (icopor) con tapa.
- Pinzas.
- Balanza analítica.
- 2 termocuplas y tarjeta de adquisición de datos.
- Probetas de diferentes materiales (acero, aluminio, cobre, bronce).

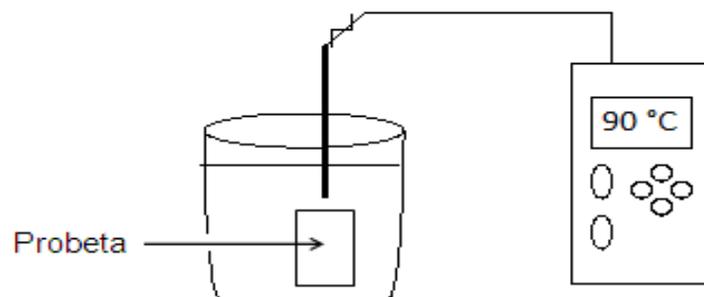
1.6.4 Procedimiento

- Introduzca 200 ml de agua en el beaker e introduzca una de las probetas previamente pesada en el beaker.
- Encienda la estufa y coloque el conjunto (beaker + probeta) en esta, mida la temperatura, tanto de la probeta como la del agua.

- Pese un vaso de icopor y agregue 100 g de agua (aproximadamente) y pese nuevamente.
- Registre la temperatura del agua en el vaso de poliestireno expandido (icopor) con una Termocupla, y continúe monitoreando la temperatura del agua.
- Cuando el agua en el (beaker + probeta) alcance su máxima temperatura (más o menos 100°C) durante la ebullición, se retira la probeta con ayuda de las pinzas y se coloca en el vaso de icopor con agua rápidamente.
- Agite continuamente, y anote la temperatura final de equilibrio, tanto de la probeta como del agua.
- Seque la probeta y reintrodúzcala beaker con agua hirviendo.
- Repita el procedimiento para todos los materiales disponibles.

Figura 23

Esquema experimental



1.6.5 Informe

- Reporte los siguientes datos: masa del vaso de poliestireno expandido (icopor), masa del vaso de icopor más agua, temperatura inicial del agua de enfriamiento, temperatura inicial de la probeta, temperatura final de equilibrio agua - probeta.
- Calcule la capacidad calorífica promedio de cada material usando la siguiente ecuación:

$$\bar{C} = \frac{m_a * [u|_{T_{eq}} - u|_{T_a}]}{m_p * [T_c - T_{eq}]}$$

En donde:

\bar{C} : Calor específico promedio [kJ/kg*K].

m_a : Masa de agua [g].

m_p : Masa de la probeta [g].

T_a : Temperatura inicial del agua de enfriamiento [°C].

T_{eq} : Temperatura de equilibrio agua – sólido [°C].

T_c : Temperatura inicial de la probeta [°C].

- Consulte el calor específico para cada uno de los materiales analizados, especificando claramente la temperatura a la cual se tomó ese dato y la referencia utilizada.
- Calcule el error porcentual del dato experimental frente al dato teórico para cada material:

$$\%Error = \frac{\bar{C}|_{experimental} - C|_{teórica}}{C|_{teórica}} * 100$$

- ¿Determine si las capacidades caloríficas halladas son a presión constante (C_p) o a volumen constante (C_v)? Justifique su respuesta.
- ¿Para qué sirve conocer el valor del C_p en los metales?
- A qué se refiere cuando se dice que un elemento tiene un $C_p=1.02^{kJ}/kg\ ^\circ C$

1.7 Práctica N° 7: Primera Ley de la Termodinámica en sistemas abiertos en estado estable

1.7.1 Marco teórico

La primera ley de la termodinámica relaciona el cambio en la energía interna (ΔU) de un sistema con las diferentes formas en las cuales la energía entra o sale del mismo: calores, trabajos y los tipos de energías que incluye la masa.

El calor (Q) se define como una transferencia de energía a través de las fronteras de un sistema, debido a una diferencia de temperaturas entre éste y los alrededores; el trabajo (W) es igualmente una transferencia de energía a través de las fronteras de un sistema, pero debido a un desbalance de fuerzas. Las masas que entran o salen de un sistema (m) contienen tres tipos de energía: entalpía (h), energía cinética (E_k) y energía potencial gravitatoria (E_p).

$$\sum \dot{Q} + \sum \dot{W} + \sum \dot{m}\theta = \frac{d(m*u)}{dt} \quad \text{Primera Ley en Flujos.}$$

$$\sum Q + \sum W + \sum m\theta = \Delta U \quad \text{Primera Ley en Cantidades totales.}$$

Donde $\theta = h + E_k + E_p$, conocido como la energía de flujo de fluido.

La primera Ley de la termodinámica en sistemas abiertos es importante en un sentido práctico, ya permite relacionar las interacciones energéticas (calor y trabajo), con las dinámicas del flujo del fluido; y como estas pueden ser utilizadas para generación de energía o frío, principales requerimientos para el confort de la especie humana.

1.7.2 Objetivos

- A partir de mediciones experimentales de velocidad y temperatura, evaluar la energía suministrada al fluido en diferentes formas de energía (Trabajo mecánico y Calor).
- A partir de la Primera Ley de la Termodinámica, determinar la potencia de trabajo suministrada al flujo másico de aire en el túnel.
- Analizar el comportamiento del sistema motor - ventilador - tubería, a partir de datos de potencia eléctrica consumida por el motor y la velocidad del aire.

1.7.3 Equipos e insumos

- Túnel de secado (incluye ventilador, resistencia eléctrica y demás accesorios).
- Anemómetro.
- Multímetro
- Pinzas voltiamperimétricas.
- Computador
- Interface de datos

1.7.4 Procedimiento

Energía mecánica

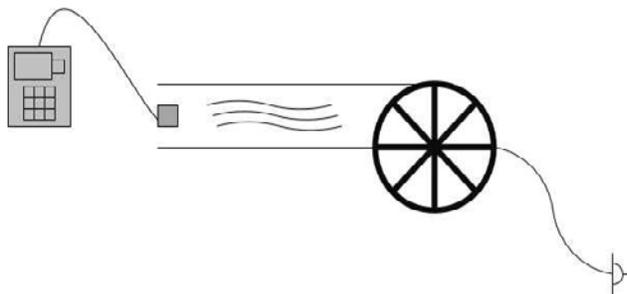
- Ajuste la frecuencia del variador de velocidad para obtener una velocidad de flujo entre 0.5 – 2.5 m/s.
- Mida la velocidad promedio y temperatura del aire a la salida de la tubería.

- Mida la potencia absorbida por el motor con la pinza amperimétrica (voltaje y amperaje).
- Medir el caudal de aire impulsado por el ventilador al final del ducto (velocidad y área).
- Medir también la temperatura del aire a la entrada del ventilador para determinar la densidad del aire.
- Repita el procedimiento para a dos velocidades distintas incrementando o disminuyendo.
- Establezca el balance de energía para el ducto de aire y determine cuánto es el cambio de energía de fluido en el sistema.
- Comparando la energía entregada al fluido a partir de balance energía sistema abierto estado estacionario y determine la eficiencia con el que trabaja el ventilador.

Figura 24

Montaje primera parte

$$\eta = \frac{(\theta_{out} - \theta_{in})}{W_{e-}}$$



Transferencia de calor

- Encienda el ventilador del túnel de viento a la velocidad utilizada en la sección anterior.
- Encienda la resistencia eléctrica, fijando la temperatura deseada a la salida, esta debe ser la misma para todo el proceso.
- Mida la temperatura de entrada y salida del aire por medio del lazo de control del túnel una vez se alcanza el estado estacionario.
- Mida el flujo de aire que pasa a través del túnel de viento siguiendo el procedimiento anterior.
- Repita el procedimiento variando el caudal del aire utilizando los valores anteriores.
- Establezca el balance de energía para el ducto de aire y determine la eficiencia de la transferencia de energía al fluido considerando trabajo y calor.

Determine

- Para cada uno de los equipos analizados durante la práctica se debe hacer balances de masa y energía suponiendo que se encuentran en estado estable flujo estable.
- Calcular para el ventilador la potencia entregada y el calor transferido al fluido.
- Presente una gráfica de eficiencia vs caudal en los dos casos experimentales

1.7.5 Informe

Realice una discusión de los resultados obtenidos y considere las siguientes preguntas

- ¿Qué diferencia fundamental existe entre los términos del lado izquierdo y el del lado derecho en la ecuación de primera ley?
- Si parte del trabajo eléctrico consumido por el sistema no pasa al aire, enumere algunas hipótesis acerca de en qué se convierte. Haga un seguimiento a las transformaciones que sufre la energía desde su ingreso hasta su salida del sistema motor-eje-ventilador-tubería hasta su salida.
- ¿Qué significado tiene cuando se dice que un ventilador o una bomba tienen una eficiencia del 75%?
- ¿Qué entiende por Energía interna y Entalpía?

1.8 Práctica N° 8: Ciclo de refrigeración real

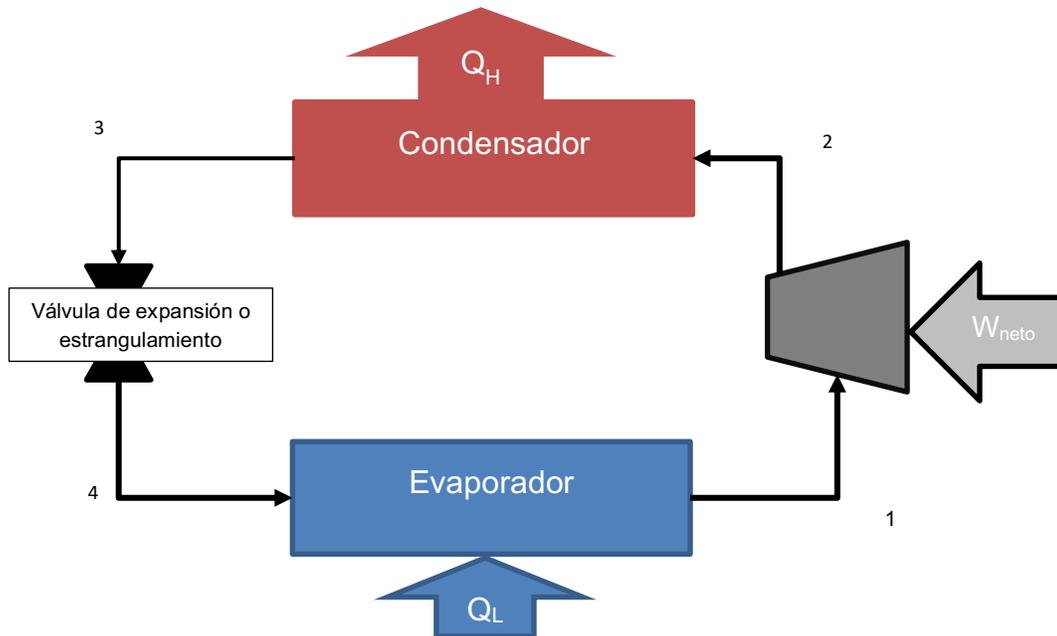
1.8.1 Marco teórico

Los refrigeradores, como las bombas de calor, son dispositivos cíclicos. El fluido de trabajo utilizado en el ciclo de refrigeración se denomina refrigerante. El ciclo de refrigeración que se utiliza con más frecuencia es el *ciclo de refrigeración de compresión de vapor*, en el que intervienen cuatro componentes principales: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador

El refrigerante entra al compresor como vapor y se comprime hasta la presión del condensador, posteriormente sale del compresor a una temperatura relativamente alta y se enfría y condensa a medida que fluye por los serpentines del condensador rechazando calor al medio circundante. Después entra al tubo capilar donde su presión y temperatura caen de forma drástica debido al efecto de estrangulamiento. Luego, el refrigerante a temperatura baja entra al evaporador, donde se evapora absorbiendo calor del espacio refrigerado. El ciclo se completa cuando el refrigerante sale del evaporador y vuelve a entrar al compresor (ver **Figura 25**).

Figura 25

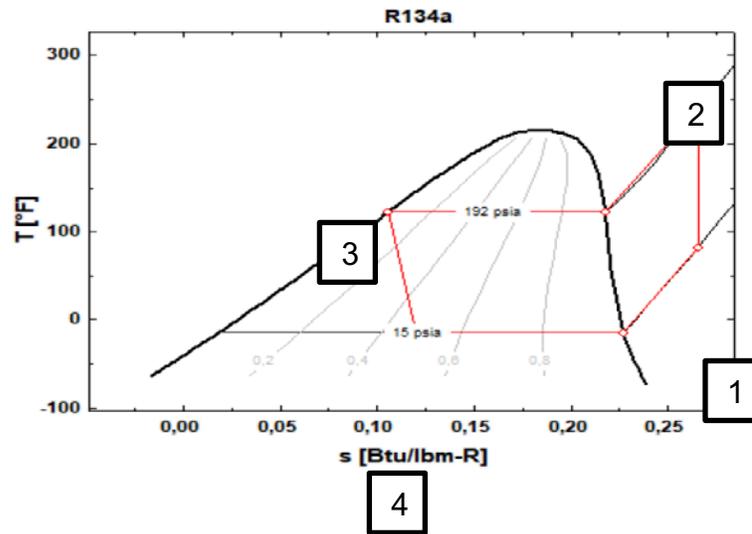
Componentes de ciclo de refrigeración



- 1-2 Compresión Isoentrópica (Ingreso de trabajo)
- 2-3 Enfriamiento y condensación isobárica (Liberación de calor)
- 3-4 Expansión isoentálpica
- 4-1 Evaporación y calentamiento isobárica (Absorción de calor)

Figura 26

Diagrama T-s de ciclo de refrigeración ideal de equipo piloto



A continuación se presenta el equipo piloto de refrigeración disponible en el laboratorio de térmicas UPB.

Figura 27

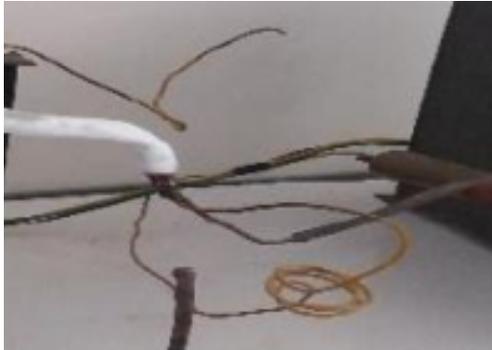
Componentes de equipo piloto de refrigeración a) compresor b) condensador c) tubo capilar d) evaporador



a)



b)



c)



d)

1.8.2 Objetivos

Caracterizar un ciclo de refrigeración de compresión real identificando los procesos irreversibles presentes durante la operación

1.8.3 Equipos e insumos

- Banco didáctico de refrigeración con refrigerante R134a
- Termopares superficiales y datalogger
- Tablas termodinámicas para refrigerante R134a
- Pinzas Volti-amperométrica.

1.8.4 Procedimiento

- Identifique cada uno de los componentes del sistema de refrigeración descritos en la **Figura 25** y **Figura 27**.
- Encienda el banco didáctico de práctica de refrigeración.

- Tome los valores de temperatura y presión en las entradas y salidas de los componentes en su condición inicial y durante la operación. Llene la siguiente tabla según el estado que corresponda según el diagrama presentado en **Figura 26**.

Estado	P (Psia)	T (°F)
1		
2		
3		
4		

- Espere a que se alcance un estado estacionario de operación (Tome los datos durante el tiempo que sea necesario) y defina los datos de la tabla anterior en esta condición
- Mida la potencia eléctrica consumida por el compresor, utilizando la pinza amperimétrica y voltímetro.
- Construya un ciclo ideal del ciclo de refrigeración utilizando como base los datos tomados anteriormente.

	P (Psia)	T (°F)
1		
2		
3'		
3		
4		
1'		

1.8.5 Informe

- Represente el ciclo de refrigeración real en un diagrama T-s y compárelo contra el ciclo ideal correspondiente.

- ii. Calcule para el banco de refrigeración piloto y el ciclo ideal:
 - a. Potencia del compresor.
 - b. Coeficiente de desempeño equipo de refrigeración.
 - c. Capacidad de refrigeración por unidad de tiempo
- iii. Compruebe que efecto tiene la reducción de temperatura de refrigeración en la eficiencia del ciclo ideal para las siguientes temperaturas 32 °F, -10°F, -15°F, -30°F.
- iv. (Avanzado) Comparé la potencia de compresión requerida y el COP del sistema si la compresión del refrigerante es:
 - a. Compresión polientrónica $n=1.3$
 - b. Compresión isotérmica de gas ideal
 - c. Compresión ideal de dos Etapas con interenfriamiento

1.9 Set N° 9: Energy Analyses of Solar Photovoltaic module.

1.9.1 Theory

Energy

Pandey A. (Pandey 2013), in 4 chapters of his work, proposed a methodology to analyze solar photovoltaic (**SPV**) module energy and exergy). Its methodology starts to measure the input energy i.e. the energy of solar radiation is given by

$$\dot{Q}_{in} = I_s A \quad \text{Eq. 1}$$

Where I_s is the intensity of solar radiation, and A is the area of the SPV module. The actual output work of the SPV module may be defined as below:

$$W_0 = V_{OC} I_{sc} FF \quad \text{Eq. 2}$$

Where V_{OC} is open-circuit voltage, I_{sc} is short circuit current, and FF is the fill factor. This latter factor of the SPV system can be defined as the ratio of the product of voltage corresponding to maximum power (V_m) and the current corresponding to maximum power (I_m) to the product of open-circuit voltage and short circuit current and can be expressed as below:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{OC} I_{sc}} \quad \text{Eq. 3}$$

Replacing the Eq. 3 with the Eq.(2), the output work can also be expressed as below:

$$W_0 = V_m I_m \quad \text{Eq.4}$$

The energy loss is due to parallel convection and radiation heat transfer mechanisms. A combined heat transport coefficient h_{ca} will be estimated as a function of the wind speed v by for the following expression $h_{ca} = 5.7 + 3.8v$. Therefore, the heat rate \dot{Q}_{loss} will be estimated by Equation 5, where A_T is the surface area of the solar panel transfer heat, T_{cell} is the surface temperature of SPV module, and T_A is the environmental temperature around the solar panel.

$$\dot{Q} = h_{ca} A_T (T_{cell} - T_A) \quad \text{Eq.5}$$

The solar cell power conversion efficiency (η_{pce}) can be defined as the ratio of actual electrical work output to the input solar radiation ($I_s A$) on the SPV surface and can be given as below:

$$\eta_{pce} = \frac{V_m I_m}{I_s A} \quad \text{Eq.6}$$

The power conversion efficiency can also be written in terms of FF using the above equation as follows:

$$\eta_{pce} = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{I_s A} \quad \text{Eq.7}$$

1.9.2 Object

- 1.10 Evaluate the energy production of SPV module under natural operational conditions in the UPB Monteria campus.

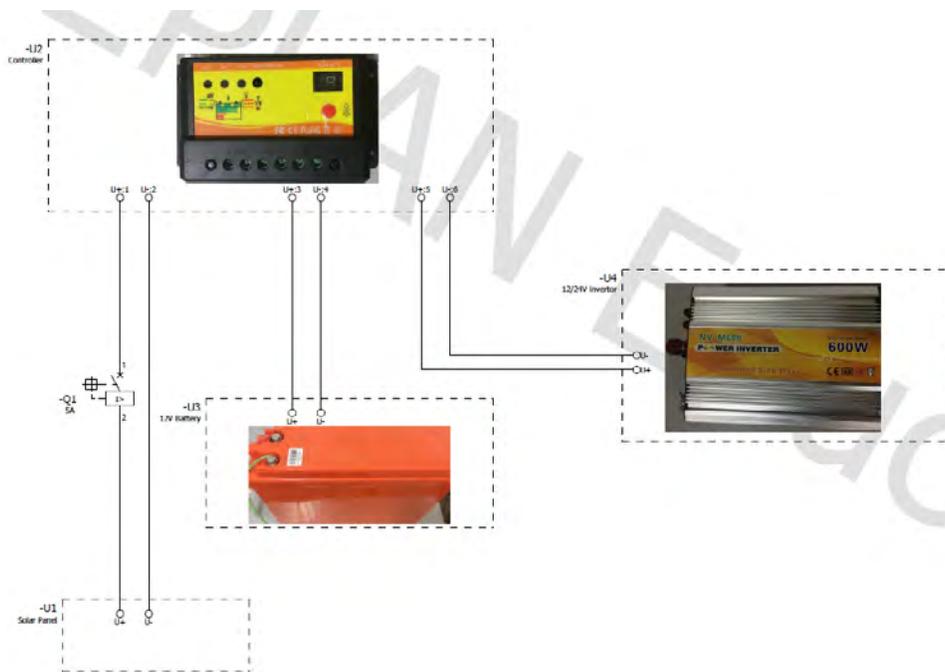
1.11 Recognize the operational factors that have a more significant effect on the energy-efficient of SPV.

1.9.3 Equipment and supplies

- Solar Photovoltaic cell (2 Technologies).
- Multitest VOM.
- Electric resistance.
- Electric Supplies
- Air temperature and humidity sensor
- Pyranometer (Enable in Energy renewable laboratory -UPB)
- Anemometer

Figura 28

Squematic diagram of electric configuration



1.9.5 Methodology

Each workgroup should plan the experimental process and methodology (measure factor, time to record data, day, etc.) that allow them to evaluate the energy production of the SPV module implemented on the UPB campus.

1.9.5 Experimental process

- Assemble and prepare the circuit as shown in the image; Later.
- Measure the wind speed.
- Measure the solar radiation in the area of the panel.
- Record the temperatures of the solar panel surfaces. (Front and rear)
- Measure the voltage and amperage at the connections going from the panel to the battery.
- Record the voltage and amperage coming from the battery to the inverter.

1.9.6 Final Report

- Present an energy balance of SPV and their contribution
- Present the energy production data by the experimental set implemented and estimate the average energy production in kWh.
- Evaluate the instantaneous energy efficiency of the Solar photovoltaic module under the environmental conditions of the UPB campus.

- Discuss the effect of the operation condition on the energy efficiency measured by the experimental set; is it a typical value or an atypical condition?
- The test results must be presented in scientific paper style with a maximum of 5 pages following the written format of the journal DYNA (<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>).

References

Cengel, Yunus, and Michael Boles. (2006). *Termodinámica - Cengel 5th*. 5th ed. Mc. Graw Hill.

Icontec. (2020). *Plantilla Normas Técnicas ICONTEC*. Retrieved (<https://normasicontec.co/>).

Pandey, A. (2013). "Exergy Analysis and Exergoeconomic Evaluation of Renewable Energy Conversion System." Shri Mata Vaishmo Devi University.

2

**CAPÍTULO
DOS**

2. Laboratorios de Máquinas Térmicas

Las guías de laboratorio aquí descritas son un complemento práctico de la metodología de aprendizaje de curso de Termodinámica II. El curso tiene como propósito desarrollar en el estudiante la capacidad para realizar apropiadamente balances de exergía con el propósito de analizar ciclos de potencia de gas, vapor, refrigeración y sistemas reactivos aplicando los fundamentos de la primera y segunda ley de la termodinámica y cuantificando el costo de los procesos. Lo cual aporta herramientas de alta importancia para el ingeniero mecánico por sus aplicaciones en la industria.

Con el desarrollo teórico práctico se busca que el estudiante tenga la capacidad de Diseñar, evaluar y proponer sistemas de generación y transformación de energía optimizando los recursos, reconociendo la importancia de las energías renovables como un factor clave para la preservación del entorno y la sostenibilidad.

Competencias específicas

- Identifica la entropía como una propiedad que permite la cuantificación de la segunda ley de la termodinámica
- Resuelve problemas en lengua extranjera asociados a procesos isentrópicos y cambios de entropía en sustancias puras, gases ideales y procesos termodinámicos

- Interioriza la importancia de la entropía y su relación con la segunda ley de la termodinámica
- Identifica la exergía como una propiedad que permite cuantificar el máximo trabajo útil que puede desarrollarse de un sistema termodinámico
- Resuelve balances exergéticos de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica en procesos y sistemas termodinámicos
- Valora el análisis exergético como una herramienta fundamental para el análisis de la disponibilidad de trabajo en aplicaciones de ingeniería
- Comprende los principios fundamentales de los ciclos de potencias de gas, vapor y refrigeración y las estrategias para la evaluación de su rendimiento
- Determina el rendimiento y parámetros de funcionamiento de ciclos de potencias de gas, vapor y refrigeración en aplicaciones prácticas de ingeniería
- Comprende la importancia de los ciclos de potencia de gas vapor y refrigeración en los procesos industriales
- Describe las estrategias de análisis de sistemas reactivos y determinación de propiedades en mezclas de gases ideales y reales
- Determina el rendimiento de sistemas reactivos de acuerdo con la primera y segunda ley de la termodinámica
- Interioriza las reglas para la determinación de propiedades termodinámicas en mezcla de gases ideales y reales para el análisis de sistemas reactivos

- Valora la importancia de la termo economía aplicada a balances de procesos termodinámicos como herramienta en la toma de decisiones y diseños bajo criterios económicos y técnicos

2.1 Práctica Nº 1: Procesos isotrópicos en la ingeniería.

2.1.1 Marco teórico

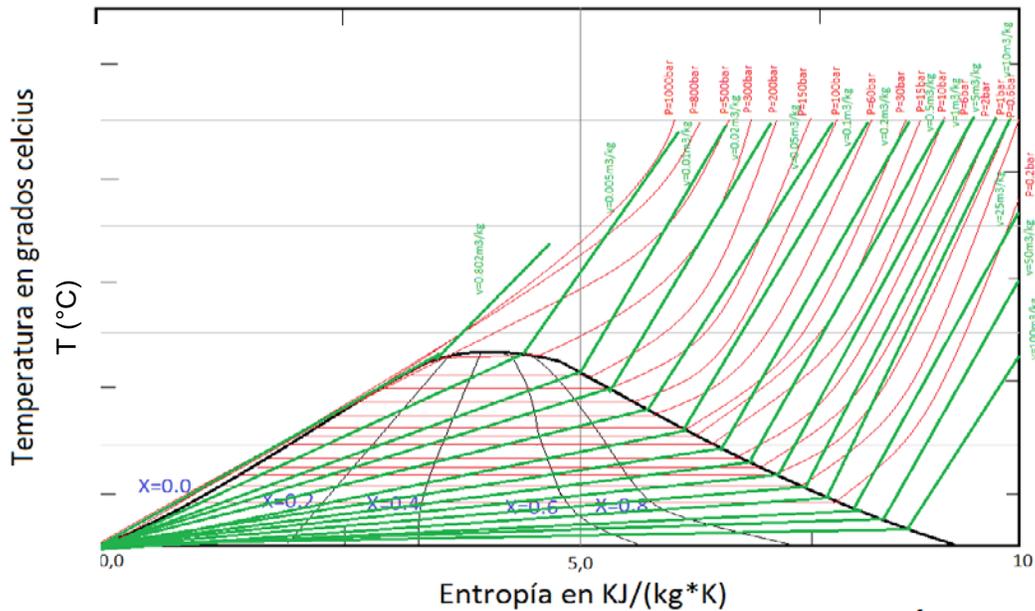
EES son las siglas de Solucionador de Ecuaciones de Ingeniería (Engineering Equations Solver). La función principal suministrada por EES es la solución de un grupo de ecuaciones algebraicas.

EES ofrece las ventajas de un simple juego de órdenes que un principiante puede aprender a utilizar rápidamente para resolver cualquier problema algebraico. De cualquier modo, las posibilidades de este programa son muchas y más útiles también para cualquier experto. La gran cantidad de datos sobre propiedades termodinámicas que contiene EES son de gran ayuda en la resolución de problemas de Termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor. EES puede utilizarse para muchas aplicaciones ingenieriles; es muy conveniente para la formación, cursos de ingeniería mecánica y para el ingeniero con la necesidad de resolver problemas prácticos.

Las variaciones de las propiedades termodinámicas intensivas (T , P , v , u , h , s , etc.) durante los procesos de cambio de fase de las sustancias puras se estudian y comprenden mejor con la ayuda de diagramas de propiedades. Aunque las tablas termodinámicas poseen información más detallada y precisa, estos diagramas permiten observar de forma simultánea las diferentes fases (líquido comprimido, equilibrio líquido vapor, vapor sobrecalentado y estado supercrítico), y observar más fácilmente los cambios a través de los procesos, (ver **Figura 29**).

Figura 29

Diagrama Temperatura – Entropía (Cambio de Fase)



2.1.2 Objetivos

- Identificar las herramientas que nos entrega un software de cálculo que incluye propiedades de compuestos puros y mezclas
- Conocer e interpretar los procesos isentrópicos comunes en gases y líquidos.
- Establecer rutinas simples para el cálculo de propiedades, estado en procesos termodinámicos aplicados a las sustancias.

2.1.3 Equipos e insumos

- Software EES. -Computador

2.1.4 Procedimiento

a. Escoja una sustancia de la siguiente lista Agua, Refrigerante (R134), Metano, CO₂

i. Construya los diagramas P-v, T-S para estos.

b. En un diagrama T-s represente el proceso Compresión adiabática reversible de aire en un motor que inicia a 22°C-95 kPa, y posee una razón de compresión $V_1/V_2 = 7.5$ Utilice la relación de gas ideal isentrópico del volumen relativo para calcular la Temperatura T₂.

c. En un diagrama T-s represente la compresión isentrópica de líquido saturado de 100 Kpa hasta 0.5MPa, y vapor saturado desde 100kPa hasta 0.5 MPa, determine el trabajo reversible de flujo estable.

i. Donde $w_{rev} = \int_1^2 v dP = \int_1^2 dh$

d. Construya la trayectoria de compresión de aire de 14.533 Psia a 27°C hasta una presión de 130.53Psia en un diagrama P-v y T-s con al menos 5 puntos para:

- Compresión isentrópica de gas ideal
- Compresión poli entrópica $n=1.3$
- Compresión isotérmica de gas ideal
- Compresión ideal de dos etapas con Inter-enfriamiento

2.1.5 Informe

- Reportar la información obtenida en formato artículo, siguiendo los lineamientos exigidos por la revista DYNA

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias

2.2 Set N° 2: Exergy Analyses – Solar Photovoltaic module

2.2.1 Theory

Exergy

Exergy is the maximum amount of energy that can be transformed into useful work, meaning by useful that which is not used to act against the environment. Exergy is therefore a measure of the availability of energy.

Exergy gives us the maximum useful work that we can obtain from a system, adjusted to the limits imposed by the principles of thermodynamics. For this, we must assume completely reversible processes and therefore without entropy production.

In a real process, entropy is always produced. The production of entropy implies a reduction of the useful work that we can extract from the system, i.e. the higher the entropy production, the lower the utilization of its exergy. The exergy is completely consumed when the system reaches equilibrium, thermal, mechanical, chemical, etc. with the environment.

Following the previous energy analyses of solar photovoltaic module **SPV** (read Set N° 9, thermodynamic practice) and implemented the methodology suggested by Pandey A. at 4 chapter [1], we can establish a exergy analysis measured. The input exergy i.e., exergy of solar radiation is given by:

$$\dot{Ex}_{solar} = \dot{Ex}_{in} = \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) I_s A \quad \text{Eq. 1}$$

T_s is the sun's temperature, which is taken as 5777 K and T_a is the environmental temperature. The exergy output of the SPV systems can be given as follows:

$$Ex_{out} = Ex_{elec} + Ex_{d,therm} + Ex_{d,elect} = Ex_{elec} + I' \quad \text{Eq. 2}$$

Where $I' = \sum Ex_x = Ex_{d,therm} + Ex_{d,elect}$ which includes internal as well as external losses. Internal losses are electrical exergy destruction i.e $Ex_{d,elect}$ and external losses are heat loss, $Ex_{d,therm}$ which is numerically equal to $Ex_{d,therm}$ for SPV system. For the calculation of electrical exergy of the PV system i.e. Ex_{elec} it has been assumed that exergy content received by the photovoltaic surface is fully utilized to generate maximum electrical exergy ($V_{oc}I_{sc}$).

$$\dot{Ex}_{elec} = E_{elc} - I' = V_{oc}I_{sc} - (V_{oc}I_{sc} - V_m I_m) \quad \text{Eq. 3}$$

Where, $V_{oc}I_{sc}$ represents the electrical energy and $(V_{oc}I_{sc} - V_m I_m)$ represents the electrical exergy destruction. Therefore, from the above equation, we find the electrical exergy as below:

$$\dot{Ex}_{elec} = V_m I_m \quad \text{Eq. 4}$$

The thermal exergy of the system ($Ex_{d,therm}$) which is defined as the heat loss from the SPV surface to the ambient, can be represented as below:

$$\dot{E}x_{thrm} = \left(1 - \frac{T_a}{T_{cell}}\right) Q \quad \text{Eq. 5}$$

Where $\dot{Q} = h_{ca}A_T(T_{cell} - T_A)$ [2] and $h_{ca} = 5.7 + 3.8v$ where h_{ca} the combine transfer coefficient (convective and radiative) heat transfer coefficient, and v is the wind speed. Using the above equations exergy of SPV system can be written as below:

$$\dot{E}x_{PV} = V_m I_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_{cell}}\right) h_{ca} A (T_{cell} - T_A) \quad \text{Eq. 6}$$

The solar cell power conversion efficiency (η_{pce}) can be defined as the ratio of actual electrical output to the input solar radiation ($I_s A$) on the SPV surface and can be given as below:

$$\eta_{pce} = \frac{V_m I_m}{I_s A} \quad \text{Eq. 7}$$

In general, the exergy efficiency (ψ) is defined as the ratio of output exergy to that of the input exergy and given as follows;

$$\psi = \frac{\text{Output Exergy}}{\text{Input Exergy}} \quad \text{Eq. 8}$$

Using the above equations, the exergy efficiency (ψ) can be expressed as follows:

$$\psi = \frac{V_m I_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_{cell}}\right) h_{ca} A (T_{cell} - T_a)}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) I_s A} \quad \text{Eq. 9}$$

2.2.2 Object

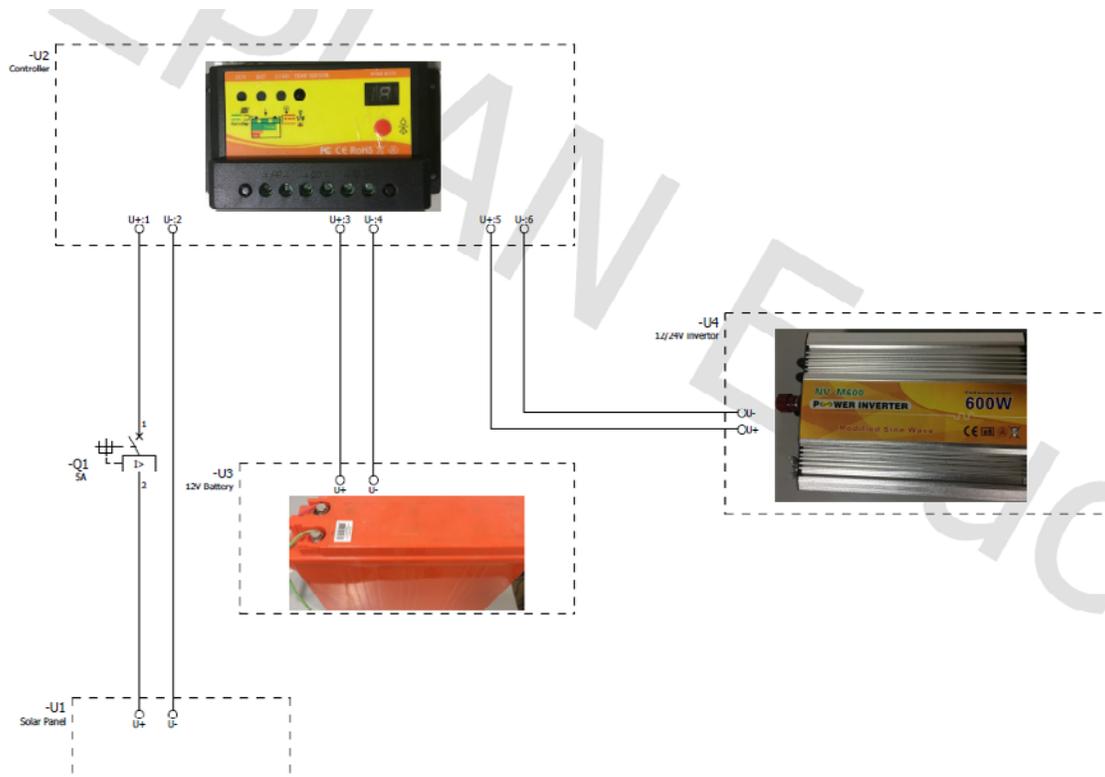
- Evaluate solar photovoltaic cell's energy and exergy production on natural operational conditions in the UPB Monteria campus.
- Recognize the operational factors that have a more significant effect on the exergy balance by SPV.

2.2.3 Equipment and Supplies

- Solar Photovoltaic cell (2 Technologies).
- Multitest VOM.
- Electric resistance.
- Electric Supplies
- Air temperature and humidity sensor
- Pyranometer (Enable in Energy renewable laboratory -UPB)
- Anemometer.

Figura 30

Squematic diagram of electric configuration



2.2.4 Methodology

Each work group should plan the experimental process and methodology (measure factor, time to record data, day, etc.) that allow them to evaluate the energy and exergy production of Solar Photovoltaic module implemented on UPB campus.

- Assemble and prepare the circuit as shown in the image; Later.
- Measure the wind speed.

- Measure the solar radiation in the area of the panel.
- Record the temperatures of the solar panel surfaces. (Front and rear)
- Measure the voltage and amperage at the connections going from the panel to the battery.
- Record the voltage and amperage coming from the battery to the inverter.

2.2.5 Final Report

- Present the data of both energy and exergy production by the experimental set implemented.
- Evaluate the energy and exergy efficient of Solar photovoltaic module on the environmental conditions of UPB campus.
- The results of the test must be presented in scientific paper style with maximum 5 pages following the written format of the journal DYNA (<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>).

2.3 Práctica N° 3: Ciclo de combustión interna

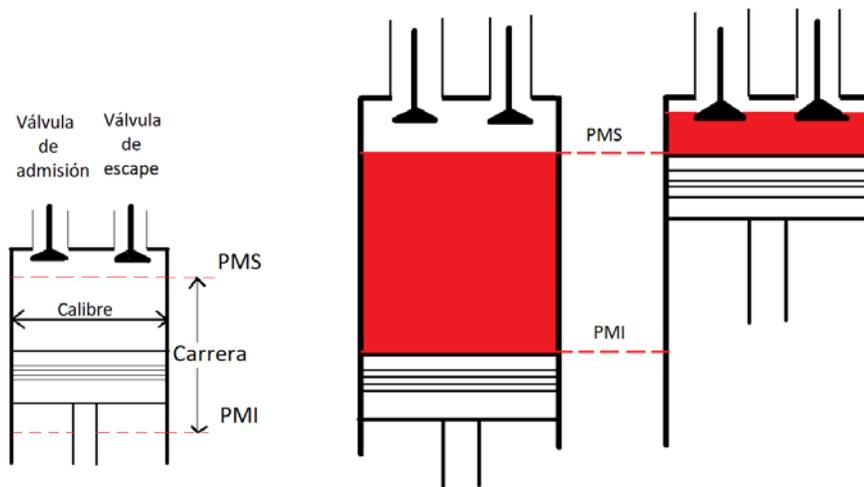
2.3.1 Marco teórico

Los componentes básicos de una máquina reciprocante se muestran en la Figura 31. El émbolo reciprocante en el cilindro se alterna entre dos posiciones fijas llamadas punto muerto superior (PMS) —la posición del émbolo cuando se forma el menor volumen en el cilindro— y punto muerto inferior (PMI). La distancia entre el PMS y el PMI es la más larga que el émbolo puede recorrer en una dirección y recibe el nombre de carrera del motor. El diámetro del pistón se llama calibre. La relación entre el máximo volumen formado en el cilindro y el volumen mínimo (espacio libre) recibe el nombre de relación de compresión r del motor:

$$r = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} \quad \text{Ec. 1}$$

Figura 31

Componentes de máquina recíprocante



La presión media efectiva (PME), una presión ficticia, que representa la presión que si actuara sobre el émbolo durante toda la carrera de potencia, produciría la misma cantidad de trabajo neto que se produce durante todo el ciclo real

$$PME = \frac{W_{neto}}{V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n}} = \frac{w_{neto}}{v_{m\acute{a}x} - v_{m\acute{i}n}} \quad (kPa) \quad \text{Ec.2}$$

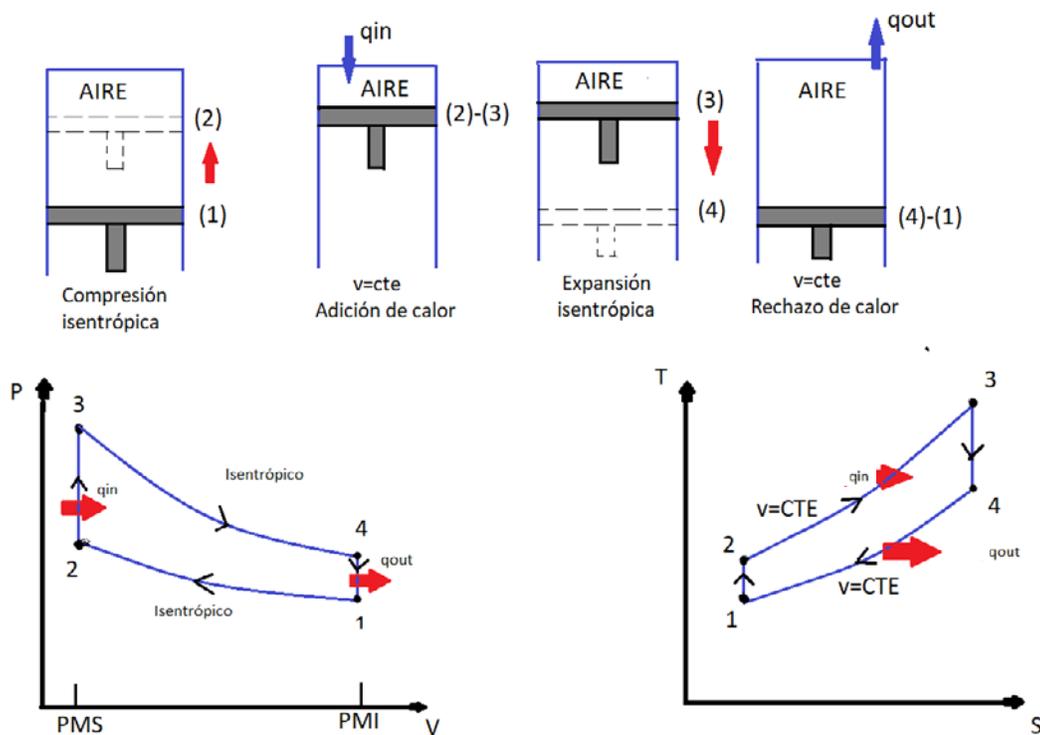
La presión media efectiva puede ser usada como parámetro para comparar el desempeño de máquinas recíprocantes de igual tamaño. La máquina que tiene un valor mayor de PME entregará más trabajo neto por ciclo y por lo tanto se desempeñará mejor.

El ciclo de Otto es el ciclo ideal para las máquinas recíprocantes de encendido por chispa. En la mayoría de las máquinas de encendido por chispa el pistón ejecuta cuatro

tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. Estas máquinas son llamadas máquinas de combustión interna de cuatro tiempos.

Figura 32

Etapas de ciclo ideal Otto



El ciclo de Otto ideal, se compone de cuatro procesos reversibles internamente:

- 1-2 Compresión isentrópica
- 2-3 Adición de calor a volumen constante
- 3-4 Expansión isentrópica
- 4-1 Rechazo de calor a volumen constante

El balance de energía para cualquiera de los procesos se expresa, por unidad de masa

$$\Delta u = (q_{ent} - q_{salida}) + (w_{entre} - w_{salida}) \text{ (kJ/kg)} \quad \text{Ec. 3}$$

No hay trabajo involucrado durante los dos procesos de transferencia de calor porque ambos toman lugar a volumen constante

$$\begin{aligned} q_{entra} &= u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2) \\ q_{salida} &= u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1) \end{aligned} \quad \text{Ec. 4}$$

La eficiencia térmica del ciclo de Otto ideal supuesto para el aire frío estándar es

$$\eta_{ter.Otto} = \frac{w_{neto}}{q_{entra}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad \text{Ec. 5}$$

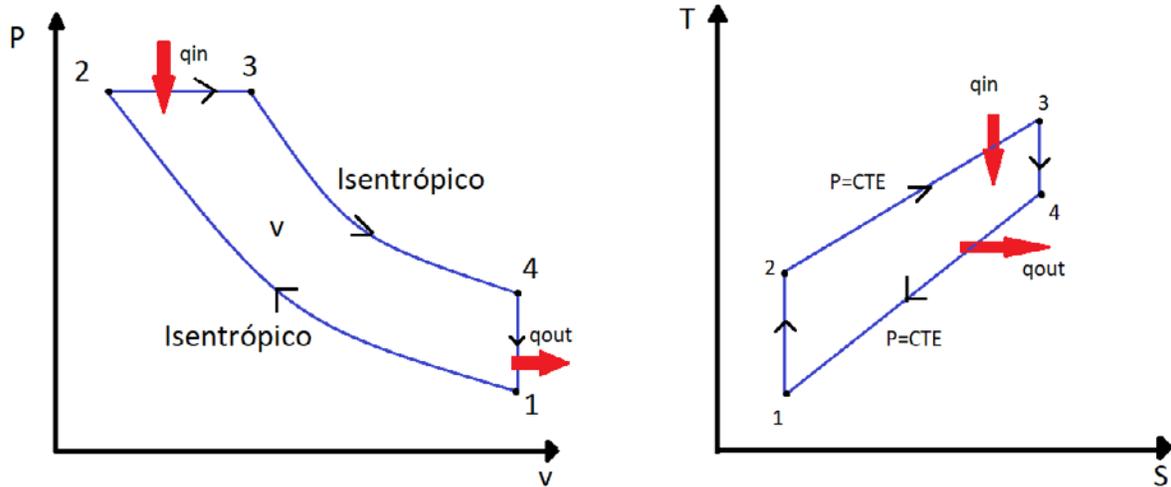
Donde r es la relación de compresión, y k es la relación de calores específicos C_p/C_v . El autoencendido en las máquinas de encendido por chispa no puede tolerarse debido a que perjudica el desempeño y puede dañar la máquina. El requerimiento de que el autoencendido no deba permitirse impone un límite superior en las relaciones de compresión que pueden usarse en las máquinas de combustión interna de encendido por chispa. El uso de relaciones de compresión más altas (hasta aproximadamente 12) sin que se enfrenten problemas de autoencendido, han impulsado el incremento de la eficiencia térmica de máquinas de gasolina.

El ciclo Diésel es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes ECOM. En los motores ECOM (también conocidos como motores diésel) el aire se comprime hasta una temperatura que es superior a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión inicia al contacto, cuando el combustible se inyecta dentro de este aire caliente.

En los diésel, solamente el aire se comprime durante la carrera de compresión, eliminando la posibilidad de autoencendido. Por lo tanto, los motores diésel pueden ser diseñados para operar a relaciones de compresión mucho más altas, generalmente entre 12 y 24. El proceso de inyección de combustible en los motores diésel empieza cuando el pistón se aproxima al PMS y continúa durante la primera parte de la carrera de potencia. Por lo tanto, en estos motores el proceso de combustión sucede durante un periodo más largo. Debido a esta mayor duración, el proceso de combustión en el ciclo Diésel ideal se obtiene como un proceso de adición de calor a presión constante.

Figura 33

Etapas de ciclo ideal Diésel



a) Diagrama P-v

b) Diagrama T-s

Este ciclo que se ejecuta en un dispositivo de pistón y cilindro, se puede simplificar considerándolo como un ciclo termodinámico, la cantidad de calor añadida al fluido de trabajo a presión constante y rechazada por éste a volumen constante puede expresarse como:

$$\begin{aligned}
 q_{entra} - w_{b,salida} &= u_3 - u_2 \rightarrow q_{entra} \\
 &= P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) \\
 &= h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 6}$$

$$-q_{salida} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{salida} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1)
 \tag{Ec. 7}$$

Entonces, la eficiencia térmica de un ciclo Diésel ideal bajo las suposiciones de aire frío estándar se vuelve

$$\eta_{ter,Diesel} = \frac{W_{neto}}{q_{entra}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entra}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad \text{Ec.8}$$

2.3.2 **Objetivos**

Construir de las curvas teóricas para el ciclo de combustión Otto esperado para dos modelos de generadores eléctricos una a Gasolina y otro Diésel he identificar el trabajo generado y eficiencia termodinámica del ciclo.

2.3.3 **Equipos e insumos**

- Ficha técnica de generadores eléctricos comercial Gasolina [1] –Diésel [2]
- Software EES

2.3.4 Procedimiento

OTTO	DIÉSEL
	
<p>Ciclo otto para motor de combustión a gasolina: el ciclo ideal inicia en proceso de compresión de aire a 20psia y 194 °F, se espera que el proceso de combustión entrega una energía de combustión de 800 kJ/kg durante el proceso de adición de calor. Asuma que la suposición de aire estándar es aplicable y tome en cuenta la variación del calor específico del aire con la temperatura para determinar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La temperatura y presión máxima que ocurre durante el ciclo ○ La salida de trabajo neto esperado ○ La eficiencia térmica ○ La presión media efectiva del sistema 	<p>Ciclo Diésel para motor de combustión diésel: Si la relación de corte de admisión es igual a 2 en el motor diésel, al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo a 20psia y 194 °F con volumen máximo de pistón (Ver cilindraje). Utilizando la suposición de aire frío estándar determine:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● La temperatura y presión de aire al final de cada proceso ● La salida de trabajo neto ● La eficiencia térmica ● La presión media efectiva
<p>Construya e identifique cada uno de los procesos del ciclo ideal en un diagrama P vs v, T vs s en EES.</p>	<p>Construya e identifique cada uno de los procesos del ciclo ideal en un diagrama P vs v, T vs s en EES.</p>

- Compare los ciclos Otto para gasolina y diésel en un diagrama P vs v.

2.3.5 Informe

- i. Discuta si las eficiencias y presiones medias efectivas de los dos ciclos de combustión son razonables y ¿por qué?
- ii. Describa los factores críticos de diseño que afectan el ciclo ideal Otto.
- iii. Identifique el consumo medio de combustible de los dos modelos de generación evaluados y compara la relación eficiencia costo de combustible.
- iv. Analice que generador de potencia eléctrica por ciclo reprocicante recomendaría para ser adquirido.
- v. Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista

DYNA(<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>) incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias

2.4 Práctica N° 4: Ciclos de potencia de gas

2.4.1 Marco teórico

Las turbinas de gas generalmente operan en un ciclo abierto, donde se introduce aire fresco en condiciones ambiente dentro del compresor, donde su temperatura y presión se eleva. El aire de alta presión sigue hacia la cámara de combustión, donde el combustible se quema a presión constante. Los gases de alta temperatura que resultan, entran a la turbina, donde se expanden hasta la presión atmosférica, produciendo potencia. Los gases de escape que salen de la turbina se expulsan fuera del dispositivo. Sin embargo, la generación de energía por turbina de gas puede modelarse como un ciclo cerrado, empleando las suposiciones de aire estándar. En este caso el proceso de combustión se sustituye por uno de adición de calor a presión constante desde una fuente externa, mientras que el proceso de escape se reemplaza por otro de rechazo de calor a presión constante hacia el aire ambiente. El ciclo ideal que el fluido de trabajo experimenta en este ciclo cerrado es el ciclo Brayton, el cual está integrado por cuatro procesos internamente reversibles de flujo estable como se describen a continuación.

1-2 Compresión isoentrópica (en un compresor)

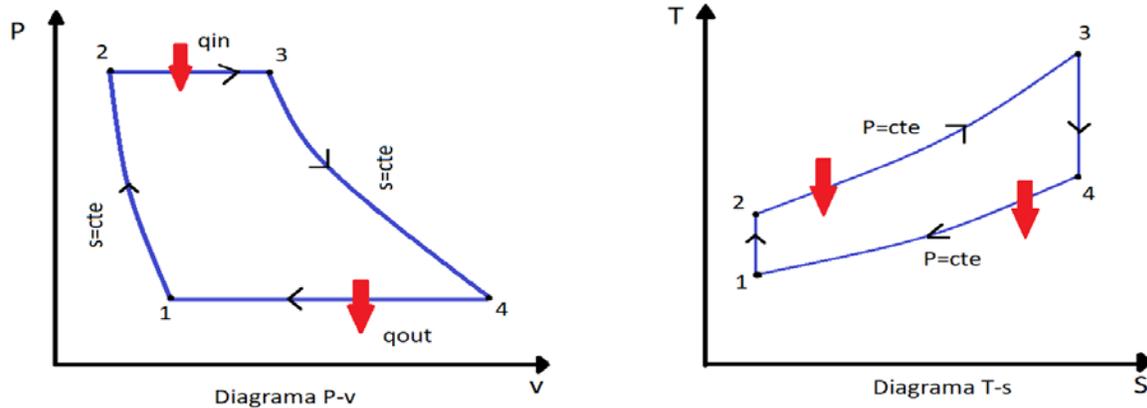
2-3 Adición de calor a presión constante

3-4 Expansión isoentrópica (en una turbina)

4-1 Rechazo de calor a presión constante.

Figura 34

Ciclo ideal de potencia de gas



Cuando los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes, el balance de energía para un proceso de flujo estable puede expresarse, por unidad de masa

$$(q_{ent} - q_{sal}) + (w_{ent} - w_{sal}) = h_{sal} - h_{ent} \quad \text{Ec.1}$$

$$q_{ent} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \quad \text{Ec.2}$$

$$q_{sal} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1) \quad \text{Ec.3}$$

La eficiencia térmica del ciclo Brayton ideal bajo las suposiciones de aire frío estándar se puede escribir como en

$$\eta_{ter,Brayton} = \frac{w_{neto}}{q_{ent}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{ent}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \quad \text{Ec.4}$$

Aplicando relaciones por compresión isentrópicas, es posible establecer la eficiencia

$$\eta_{ter,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad \text{Ec.5}$$

Donde

$$r_p = \frac{P_2}{P_1}$$

Donde r_p es la relación de presión y k la relación de calores específicos. bajo las suposiciones de aire frío estándar la eficiencia térmica de un ciclo Brayton ideal depende de la relación de presiones de la turbina de gas y de la relación de calores específicos del fluido de trabajo. La eficiencia térmica aumenta con ambos parámetros, que también es el caso para las turbinas de gases reales. La temperatura más alta en el ciclo ocurre al final del proceso de combustión (estado 3) y está limitada por la temperatura máxima que los alabes de la turbina pueden resistir.

Las dos principales áreas de aplicación de las turbinas de gas son la propulsión de aviones y la generación de energía eléctrica. Cuando se emplean en propulsión de aviones, la turbina de gas produce la potencia suficiente para accionar tanto al compresor como a un pequeño generador que a su vez acciona al equipo auxiliar. Los gases de escape de alta velocidad son los responsables de producir el empuje necesario para impulsar la aeronave. Las turbinas de gas también se utilizan como centrales eléctricas estacionarias que producen energía eléctrica como unidades independientes o en conjunto con las centrales eléctricas de vapor en el lado de alta temperatura. En estas centrales los gases de escape de las turbinas de gas sirven como fuente de calor para el vapor.

2.4.2 Objetivos

Evaluar el proceso de generación de potencia a través de una microturbina de gas, identificando el efecto de los procesos reversibles y no-reversibles en el ciclo de potencia.

2.4.3 Equipos e insumos

- Ficha técnica de microturbinas
- Software de propiedades térmicas de fluidos

2.4.4 Procedimiento

Una microturbina trabaja en un ciclo abierto donde el aire entra a la unidad y es comprimido aproximadamente a 35psi (241Kpa). Este aire entra en el recuperador, donde los gases de escape lo precalientan alrededor de 1000°F(540°C), al entrar a la cámara de combustión, la energía suministrada al aire en forma de calor es dada mediante una flama continua de Biogas con un contenido entre 90 y 50% de mentano.

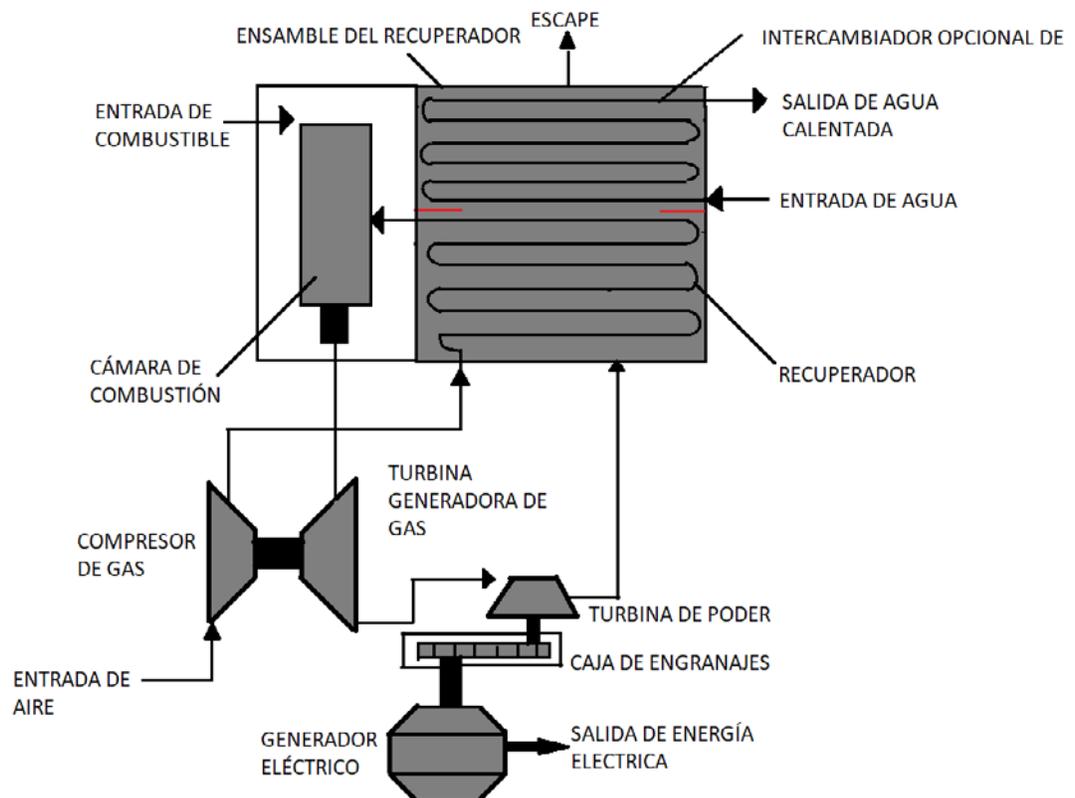
El gas caliente comprimido de la cámara de combustión se expande cuando pasa a través de la turbina de gas de esta manera se acciona el compresor de gas. Durante el paso del gas caliente a través de la turbina se acciona el generador eléctrico mediante una caja de engranes.

En el escape de la turbina se encuentra el recuperador de calor, donde el aire es precalentado para la combustión y el aire de salida posee una temperatura promedio de

592°F(311°C). Si la unidad es equipada para la recuperación de calor, los gases del escape pasan a través de un intercambiador de calor de aire-agua. En este intercambiador de calor, los gases de combustión ceden calor adicional a la circulación del agua para calentar agua doméstica, calefacción u otras aplicaciones externas para esta unidad. Los gases finalmente salen a través de la chimenea al medio ambiente.

Figura 35

Esquema de componentes de microturbina comercial, adaptado de Cruz D. [2].



El motor de arranque consta del ensamble del generador de gas y la turbina de poder (Figura 35). En el generador de gas se incluye el compresor generador de gas, la

turbina generadora de gas y el arrancador. Cabe señalar que la flecha del generador de gas y la flecha de la turbina de poder rotan independiente una de otra con el objetivo de reducir los esfuerzos en el motor y extender su vida.

2.4.5 Informe

- i. Construya el ciclo ideal de la microturbina descrita anteriormente, realizando las consideraciones necesarias, considerando que se va usar biogás como fuente de energía térmica para la turbina con una composición de entre 90% y 50% metano .

Tabla 3

Densidad de las mezclas y poder calorífico inferior, tomado de [1].

Combustible	Densidad a 15,6°C(kg/m³)	PCI (kJ/kg)
Gasolina	739	46522,5
90% metano 10% CO ₂	0,8	38258,81
70% metano 30% CO ₂	1,037	22927,41
50% Metano 50% CO ₂	1,275	13319,73

Tabla 4

Relaciones estequiométricas en masa y volumen para diferentes combustibles, tomado de [1].

Combustible	Relación A/F en volumen	Relación A/F en masa-
Gasolina	59,5	15,1
100%deCH₄	9,5	17,2
90%deCH₄	8,56	13,2
70%deCH₄	6,6	7,9
50%deCH₄	4,76	4,6

- ii. Evaluar el trabajo producido por la turbina, si se considera compresión y expansión politrópica del gas (Ciclo no ideal) con un $n = 1.5$, en lugar de compresión isentrópica.
- iii. Evaluar la sensibilidad de la potencia máxima obtenida en función de la temperatura T_2 para ciclo ideal y ciclo de compresión politrópica, compare los resultados obtenidos, con las expresiones presentada por Cruz D.[1] en las ecuaciones 1.12-1.14, justifique los resultados.
- iv. Compare en un diagrama T-s y P-v el ciclo ideal Brayton y el ciclo no ideal. Es clara la diferencia del trabajo producido por los ciclos desde los diagramas propuestos, justifique su respuesta aire estándar para generación de energía con turbina.
- v. La relación de compresión implementada en la microturbina permitirá la mayor generación de potencia, diserte acerca de ¿por qué cree usted que se fijó esta relación de presión?

- vi. Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista

DYNA

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>

incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones

2.5 Práctica N° 5: Ciclo Rankine ideal

2.5.1 Marco teórico

El ciclo Rankine, el cual es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor. El ciclo Rankine ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto de los siguientes cuatro procesos [1]:

1 -2 *Compresión isentrópica en una bomba*: El agua entra a la *bomba* en el estado 1 como líquido saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera. La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso de compresión isentrópica debido a una ligera disminución en el volumen específico de agua (ver **Figura 36**).

2 -3 *Adición de calor a presión constante en una caldera*: El agua entra a la *caldera* como líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. En este se pueden implementar diversas fuentes de energía como gases de combustión de carbón, gas natural, biomasa, reactores nucleares y/o energía solar (ver **Figura 36**).

3 -4 *Expansión isentrópica en una turbina*: El vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la *turbina* donde se expande isentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores en el estado 4, donde el vapor entra

al *condensador*. En este estado el vapor es por lo general una mezcla saturada de líquido y vapor con una alta calidad preferiblemente (ver **Figura 36**).

4 -1 *Rechazo de calor a presión constante en un condensador*. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, el cual es básicamente un gran intercambiador de calor que rechaza a éste hacia un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmósfera. El vapor sale del condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando así el ciclo de potencia (ver **Figura 36**).

Cuando los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes, el balance de energía específica para un proceso de flujo estable puede expresarse por la Ec. 1.

$$(q_{ent} - q_{sal}) + (w_{ent} - w_{sal}) = h_{sal} - h_{ent} \quad \text{Ec.1}$$

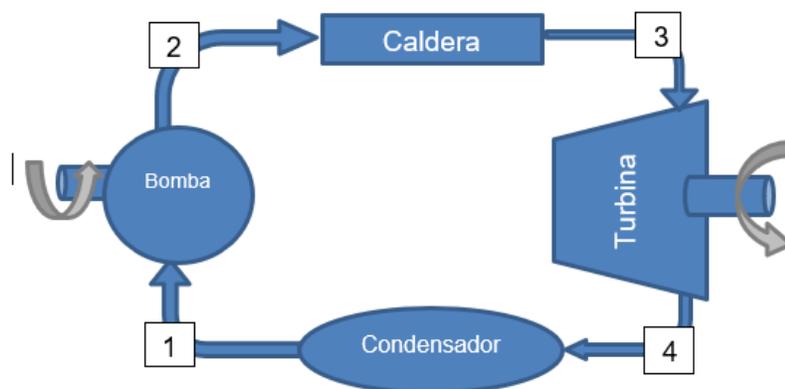
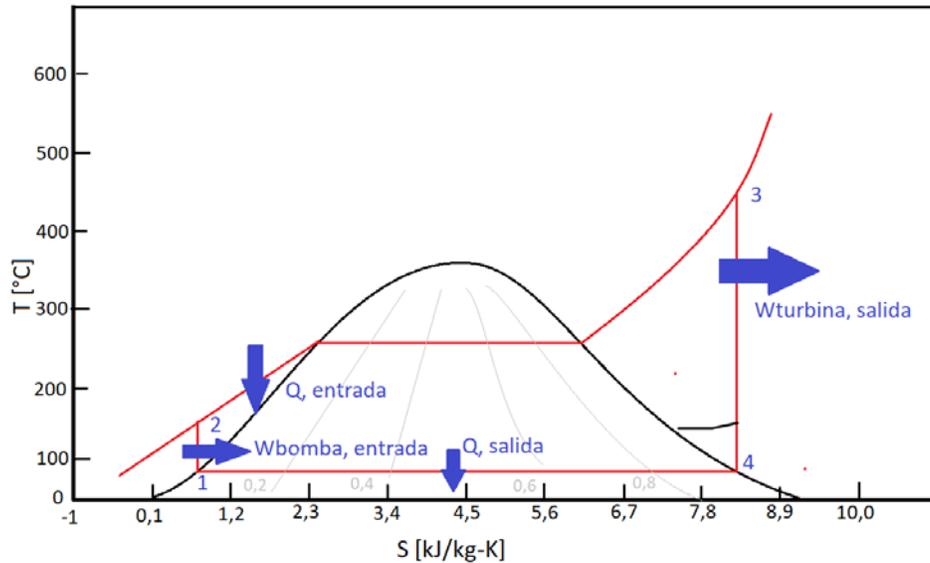


Figura 36

Ciclo Rankine Ideal



La caldera y el condensador no incluyen ningún trabajo y se supone que la bomba y la turbina son isentrópicas, entonces la relación de conservación de la energía para cada dispositivo puede expresarse como:

$$w_{Bomba,ent} = h_2 - h_1 = v(P_2 - P_1) \quad \text{Ec.2}$$

$$q_{Caldera,ent} = h_3 - h_1 \quad \text{Ec.3}$$

$$w_{Turbina,sal} = h_4 - h_1 \quad \text{Ec.4}$$

$$q_{Cond,sal} = h_1 - h_4 \quad \text{Ec.5}$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine ideal se determina a partir de:

$$\eta_{ter} = \frac{w_{neto}}{q_{ent}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{ent}} \quad \text{Ec.6}$$

Donde

$$w_{neto} = q_{ent} - q_{sal} = w_{Turbina,sal} - w_{bomba,ent} \quad \text{Ec.7}$$

2.5.2 Objetivos

Dimensionar el tamaño de la central de generación eléctrica que implementa un ciclo de vapor simple y por recalentamiento.

2.5.3 Equipos e insumos

- Descripción de central
- Software de propiedades térmicas de fluidos

2.5.4 Procedimiento

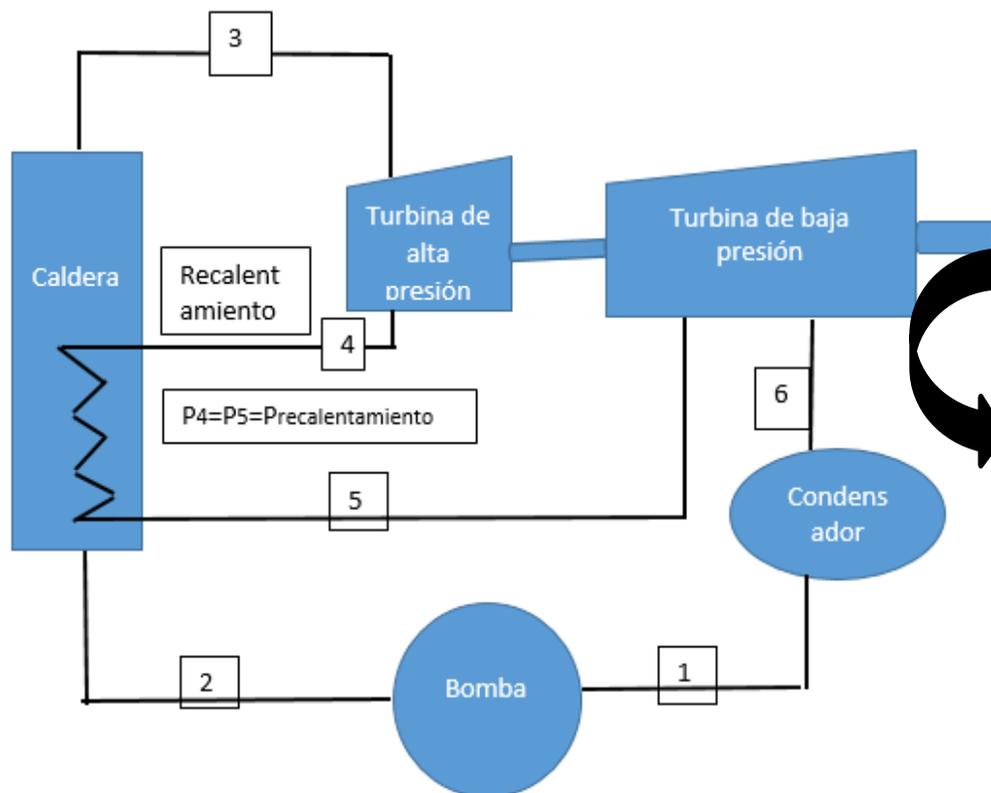
La Central Térmica SINU S.A. E.S.P es un ambicioso proyecto para generar energía eléctrica que usa la tecnología de lecho fluidizado en la caldera, utilizando como fuente de energía carbón mineral sub-bituminoso (alto contenido de azufre) y caliza para controlar los niveles de azufre. En esta central se evaporarán 500T/h de agua desmineralizada para generar 164MW netos de potencia, el agua será tomada del río Sinú (en la ciudad de Montería) el cual debe pasar por un proceso de remoción de lodo, tratamiento químico y desmineralización.

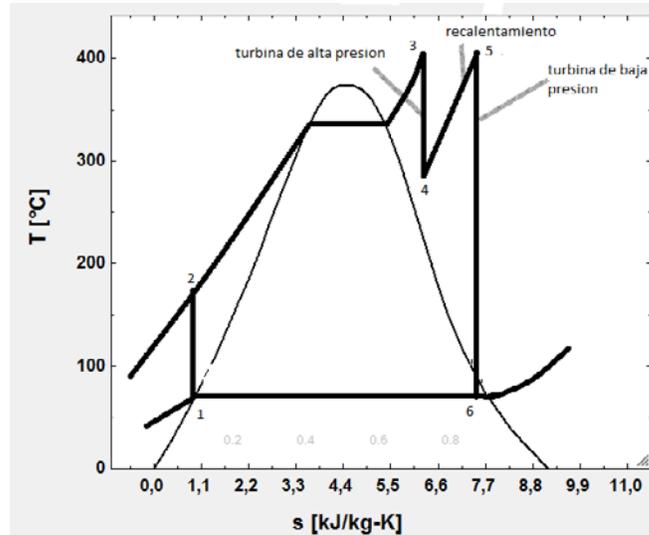
La central puede ser construida con turbinas de vapor de 41MW que soportan presiones de trabajo entre 4MPa y 10 kPa con una temperatura máxima de operación 600°C. La gerencia del proyecto desea evaluar la posibilidad de usar un ciclo con recalentamiento, implementando una turbina de alta presión que permite alcanzar hasta

11Mpa. Por tanto, se requiere una evaluación técnica del proyecto que permita definir la eficiencia térmica, el consumo de combustible, consumo de bombeo y el número de turbinas necesarias bajo los dos escenarios del ciclo de potencia: Ciclo Rankine de Vapor y Ciclo Rankine de vapor con recalentamiento.

Figura 37

Ciclo Rankine de vapor con recalentamiento





2.5.5 Informe

- Construya dos ciclos de potencia teóricos (Rankine y Rankine con Recalentamiento) que respondan a los requerimientos energéticos del problema.
- En una tabla comparativa entre las dos alternativas presente los requerimientos energéticos y/o Energía entregada por cada una de las etapas del ciclo térmico.

Etapal ciclo	Rankine	Rankine sobrecalentato
Etapa 1-2		
Etapa 2-3		

- Presente los dos ciclos de vapor propuesto en un diagrama termodinámicos de P vs v , y T vs s .
- Concluya sobre qué tipo de ciclo de vapor recomendaría según las restricciones del proceso.

- Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA

(<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>)

incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones

2.6 Práctica N° 6: Implementación de tabla psicrométrica en balances de energía

2.6.1 Marco teórico

El aire, no es un vapor saturado que esté cercano a temperaturas donde pueda ser condensado. Es siempre un gas altamente sobrecalentado, o más precisamente, es una mezcla de gases altamente sobrecalentados. Así, cuando calentamos o enfriamos aire seco, solamente estamos agregando o quitando calor sensible que genera un cambio de su volumen específico. El aire atmosférico es una mezcla de oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, hidrógeno, vapor de agua, y un porcentaje muy pequeño de gases raros como argón, neón, ozono, etc. En la **Tabla 5**, se muestran los porcentajes de estos gases, tanto en peso, como en volumen, para el aire seco (sin vapor de agua).

Tabla 5

Composición química de aire seco

Nombre	Símbolo Químico	Aire seco	
		% en Peso	% en Volumen
Nitrógeno	N ₂	75.47	78.03
Oxígeno	O ₂	23.19	20.99
Bióxido de carbono	CO ₂	0.04	0.03
Hidrógeno	H ₂	0.00	0.01
Gases raros	– ...	1.30	0.94

El aire seco tiene peso, densidad, temperatura, calor específico y además siendo considerado como una pseudo sustancia pura, cuando está en movimiento, tiene momento e inercia. Retiene sustancias en suspensión y en solución. La humedad es un

término utilizado para describir la presencia de vapor de agua en el aire, ya sea a la intemperie, o dentro de un espacio. A diferencia del aire seco, el vapor de agua a condiciones normales (0°C y $p_0 = 105 \text{ Pa}$) está en sus condiciones de saturación o no muy lejos de ellas. Así pues, el vapor de agua o “humedad” en un espacio, puede estar en una condición de saturación o ligeramente arriba de ella. Si lo enfriamos unos cuantos grados, hacemos que se condense, y si le aplicamos calor, lo sobrecalentamos.

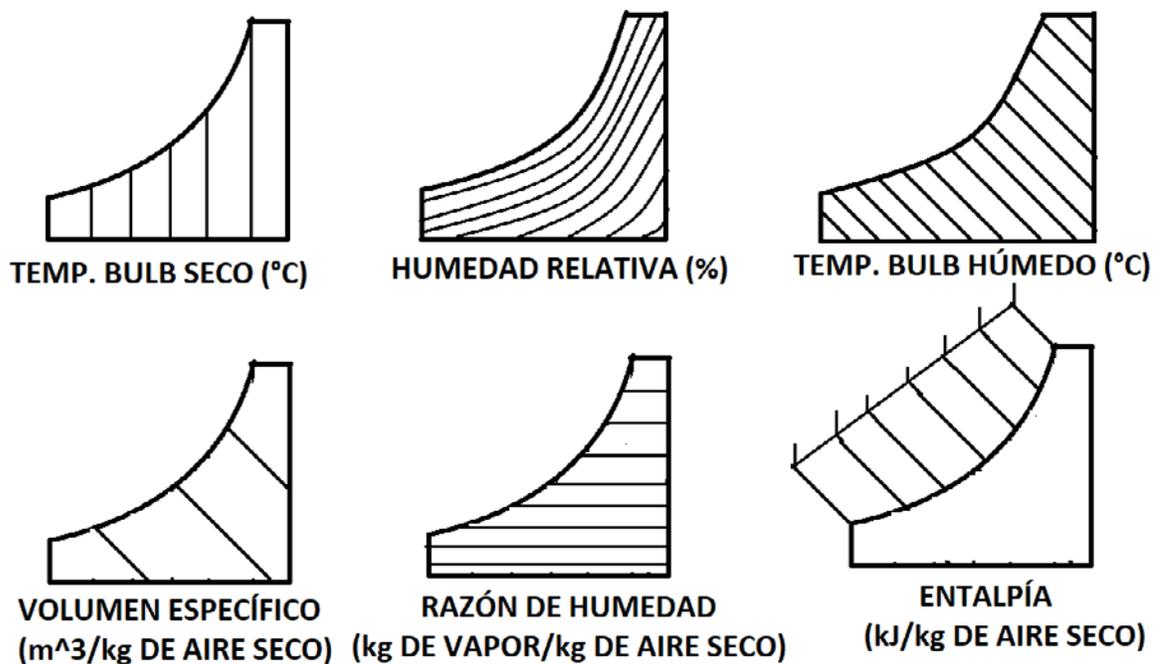
Psicrometría es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. Ampliando aún más, incluiríamos el método de controlar las propiedades térmicas del aire húmedo. Lo anterior, se puede llevar a cabo a través del uso de tablas psicrométricas o de la carta psicrométrica. Las tablas psicrométricas ofrecen una gran precisión, ya que sus valores son de hasta cuatro decimales; sin embargo, en la mayoría de los casos, no se requiere tanta precisión; y con el uso de la carta psicrométrica, se puede ahorrar mucho tiempo y cálculos. La tabla psicrométrica reúne la siguiente información en una sola figura.

Los instrumentos de medida de la humedad por lo general se basan en las mediciones de alguna otra magnitud como la temperatura, la presión, la masa o un cambio mecánico o eléctrico en una sustancia cuando absorbe la humedad. Mediante la calibración y el cálculo del funcionamiento del higrómetro, una vez conocidas estas otras magnitudes es posible deducir la medición de la humedad. Los dispositivos electrónicos

modernos usan la *temperatura de condensación* (el punto de rocío), o cambios en la capacitancia o en la resistencia eléctrica para medir las diferencias de humedad

Figura 38

Propiedades presentadas en la tabla psicrométrica



2.6.2 Objetivo

- Realizar un balance de masa y energía para un proceso de secado de material poroso.

2.6.3 Equipo e insumos

- Túnel de viento.

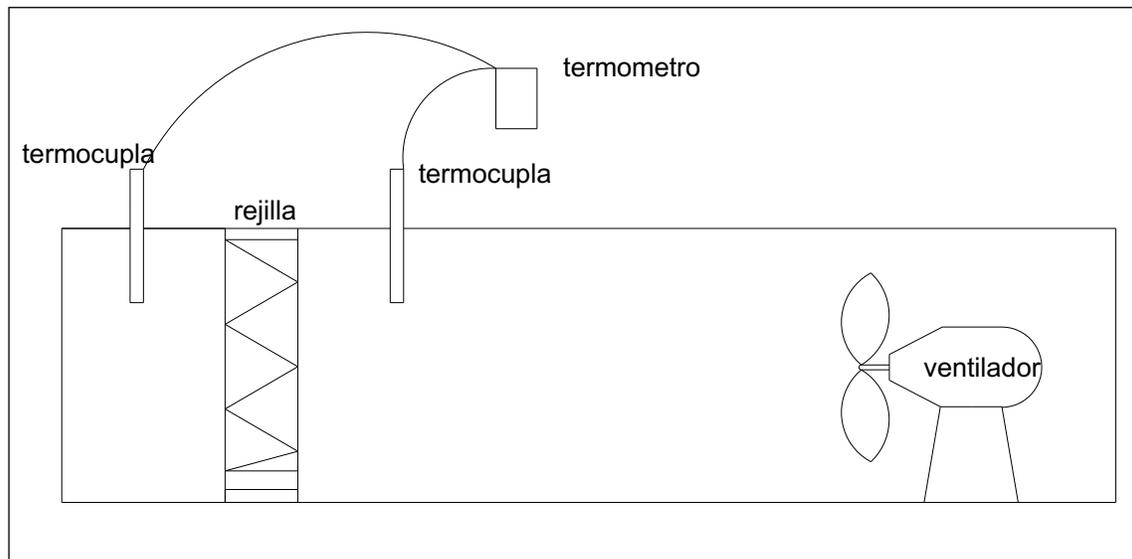
- Estropajo y/o algodón (debe ser suministrado por el estudiante)
- Cronómetro.
- Balanza.
- Anemómetro.
- 2 Termocuplas
- Higrómetro
- Recipiente
- Pie de rey

2.6.4 Procedimiento

- Encienda el túnel de viento a 0.8 m/s y una temperatura de 35°C, espere hasta se alcance la condición estacionaria del sistema.
- Tome el peso del estropajo y/o Algodón seco. Moje el estropajo y/o algodón permitiendo que la humedad aumente el peso, retire el exceso de humedad superficial y pésela de nuevo y registre este valor. Realice el montaje en el túnel de viento, ubique el estropajo y/o algodón en el extremo del túnel a la descarga.
- Registre la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco antes de su paso por el material a secar y después del material a secar cada 30 segundos o en su caso la temperatura bulbo seco y humedad relativa si dispone de un hidrómetro.

Figura 39

Esquema del montaje experimental implementado



Datos y resultados

Calcule la cantidad de agua evaporada mediante el uso de la psicometría. Esta cantidad evaporada debe ser igual a la diferencia de pesos antes y después del secado, calcule el error y analice. Grafique humedad absoluta Vs tiempo antes y después de pasar por el material y analice qué significado tiene el área entre las dos curvas.

Realice un balance de masa y energía (primera ley de la termodinámica, utilizando la tabla psicrométrica para establecer las propiedades del gas húmedo) para el proceso de secado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La temperatura del material y del agua absorbida se mantiene constante durante todo el proceso de secado, es decir la energía aportada por el aire caliente es solo para evaporar el agua y no para calentar el material (asuma $T=T_{amb}=28$)
- Para el balance tenga en cuenta el volumen de control sin incluir el ventilador ni la resistencia.

$$C_{p_{esputma}} = 840 \text{ KJ / Kg } ^\circ\text{K}$$

$$C_{p_{estropajo}} = 1.250 \text{ KJ / Kg } ^\circ\text{K}$$

2.6.5 Informe

Realice una discusión de los resultados obtenidos y considere las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la máxima cantidad de agua que puede retirar el aire a cada una de las condiciones del aire antes de la rejilla de secado?
- ¿Cuánto calor se requiere para calentar un gramo de algodón y/o uno de estropajo con un contenido de agua del 18%?
- ¿Qué pasaría con las variables durante el proceso si el aire de entrada estuviera a una temperatura de 60 °C?

Referencias

Cengel and M. Boles, (2006) *Termodinámica - Cengel 5th*, 5th ed. Mc. Graw Hill

Cruz D. Práctica de turbina de gas para el laboratorio de máquinas térmicas. Universidad Nacional Autónoma de México TDG.2016
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10518/tesis.pdf?sequence=1>

Mantilla J., Aguirre B., Sarmiento L. Revista de ingeniería e investigación vol. 28 No 2, Pag 131-141 http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092008000200016

Pandey, A. 2013. "Exergy Analysis and Exergoeconomic Evaluation of Renewable Energy Conversion System." Shri Mata Vaishmo Devi University.

<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

http://www.generatorkipor.com/uploads/_productos_kipor/id19/FICHA_TECNICA_KDE6500E3.pdf

<https://www.manualslib.es/manual/381822/Bauker-Gg2800.html#manual>

3

**CAPÍTULO
TRES**

3. Laboratorio de transferencia de calor

Las guías de laboratorio aquí descritas son un complemento práctico de la metodología de aprendizaje de curso de transferencia de calor. El cual tiene como propósito desarrollar en el estudiante la capacidad para aplicar los principios de la ecuación de la conducción del calor y los mecanismos de transferencia por convección, conducción y radiación en balances de energía de acuerdo con la primera ley de la termodinámica aplicado en estado estacionario y transitorio en procesos industriales, comerciales y cotidianos.

Con el desarrollo teórico practico se busca que el estudiante tenga la capacidad de diseñar, evaluar y proponer sistemas de generación y transformación de energía optimizando los recursos, reconociendo la importancia de las energías renovables como un factor clave para alcanzar la sostenibilidad de procesos industriales, comerciales y cotidianos.

Competencias específicas

- Distingue y relaciona los procesos de transferencia de calor estacionario y transitorios en procesos industriales y cotidianos.
- Resuelve problemas de conducción de calor unidimensional en procesos estacionarios y transitorios en lengua nativa y/o extranjera.

- Valora la importancia del mecanismo de transferencia de calor por conducción para la evaluación del uso de la energía en procesos industriales, comerciales y cotidianos.
- Deduce mecanismos físicos de convección de calor para representar el proceso de enfriamiento y calentamiento de cuerpos como una función de los balances de energía, masa y cantidad de movimiento.
- Usa analogías y correlaciones empíricas para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección como una función características físicas del sistema.
- Valora la importancia del mecanismo de transferencia de calor por convección para la evaluación del uso de la energía en procesos industriales y cotidianos.
- Identifica aplicaciones prácticas y procesos industriales en los que interviene la transferencia de calor por radiación.
- Resuelve problemas y desarrolla estrategias para el aprovechamiento o mitigación de la transferencia de calor por radiación.
- Valora la importancia de la radiación térmica en procesos industriales y cotidianos.

3.1 Práctica N° 1: Propiedades térmicas de materiales - Conductividad.

3.1.1 Marco teórico

Las soluciones de la Ley de Fourier en su formulación diferencial, empleando las condiciones de borde adecuadas, permite resolver el problema de conducción de calor unidimensional y estacionario para geometrías planas, cilíndricas y esféricas. Conocidas estas soluciones, podrían usarse dispositivos basados en las mencionadas geometrías para determinar el coeficiente de conductividad térmica del medio que se requiera. Para ello, deberá tenerse la precaución de estar bajo un régimen de conducción estacionaria y unidimensional, lo cual en algunos casos constituye una aproximación, como se verá más adelante.

Medición empleando geometría esférica

El dispositivo experimental (**Figura 40**), consta de dos esferas metálicas concéntricas, de espesor muy pequeño a fin de minimizar la capacidad calorífica del sistema. La esfera exterior está formada por casquetes semiesféricos que facilitan el montaje y desmontaje de estas y del medio a testear. Uno de los casquetes dispone de una tapa rebatible que posibilita la finalización del llenado de material. Dentro de la esfera más pequeña se encuentra una resistencia calefactora, que puede ser de Níquel – Cromo para temperaturas superiores a los 500 °C, o de Platino para temperaturas menores. El espacio entre las esferas aloja el material a testear, que debe ser homogéneo. Haciendo

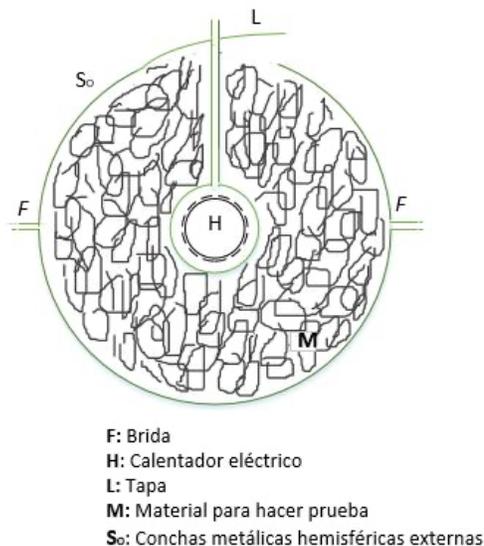
unas mediciones de temperatura a dos distancias radiales r_1 y r_2 con las termocupas T_1 y T_2 , se obtiene la conductividad térmica con:

$$\dot{Q} = \bar{V}I = 4\pi k \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad (1.1)$$

Donde \bar{V} es la tensión aplicada en bornes de la resistencia, e I es la corriente que circula a través de ella.

Figura 40

Esquema de dispositivo de medición de la conductividad empleando geometría esférica



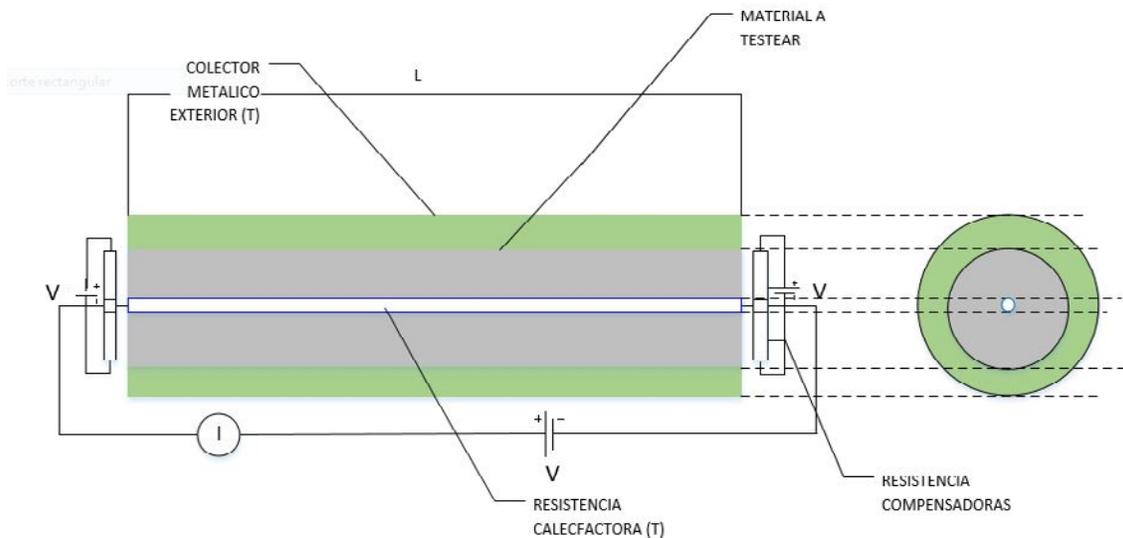
Medición empleando geometría cilíndrica

El método es similar al anterior, y fue usado por primera vez hacia principios de siglo XX. Se emplean dos cilindros concéntricos, alojando el material a testear entre ellos. En el interior del cilindro de menor diámetro se coloca la resistencia calefactora, la cual está cubierta con otro cilindro para homogenizar la temperatura superficial. La medición

de temperatura se efectúa sobre los cilindros exterior e interior, empleando termocuplas para ello. El método se emplea para medir conductividad en materiales tales como sólidos, aislantes, refractarios y para construcción, para líquidos, gases y metales a altas temperaturas. A diferencia del método de geometría esférica, en este caso se tienen pérdidas de calor por los extremos de los cilindros. Una forma de solucionar esto es construyendo cilindros tan largos como sea posible, transferir calor en toda su longitud y efectuar la medición en la central respecto a la longitud. Si la longitud del cilindro del dispositivo es relativamente pequeña, se disponen termocuplas en el sentido del eje axial del cilindro, de modo de determinar las pérdidas en los extremos, conocida la conductividad térmica del material del tubo. Otro método de solucionar el inconveniente consiste en colocar sistemas de calentamiento auxiliares en el extremo para compensar las pérdidas. Para medir la conductividad térmica en gases y líquidos, el dispositivo a emplear es un tubo capilar lleno del fluido a evaluar (**Figura 41**), en el cual se introduce un elemento calefactor, formado por un muy buen conductor eléctrico. La resistencia debe ser ubicada según el eje axial del tubo capilar. La temperatura del capilar se asume igual a la del líquido, y se mide empleando una termocupla. La temperatura del calefactor se conoce indirectamente midiendo la resistencia eléctrica del mismo y conociendo su coeficiente de variación con la temperatura.

Figura 41

Esquema del dispositivo de medición de la conductividad empleando geometría cilíndrica



Para todos los casos, el valor de la conductividad térmica se calcula con:

$$\dot{Q} = \bar{V}I = 2\pi kL \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \quad (1.2)$$

Donde L es la longitud del cilindro, r_1 y r_2 la posición medida de la temperatura interior y exterior del material respectivamente. La temperatura T_1 y T_2 las temperaturas medidas en el dispositivo.

Medición empleando geometría plana

Dentro de una caja metálica convenientemente aislada y de tamaño adecuado, se coloca una resistencia calefactora, que va cubierta por arriba y por debajo, con dos placas del material a testear, ambas con el mismo espesor. Las placas van cubiertas con dos placas huecas en la superficie más exterior, por el interior de las cuales se hace circular

un fluido frío a fin de evacuar el calor generado en el calefactor. Con este arreglo se consigue dividir el calor aportado en dos mitades.

El conjunto formado por las placas, la resistencia calefactora y las placas enfriadoras se abulona, empleando separadores contruidos de material aislante para la correcta fijación entre ellos, y luego el conjunto es sujetado a la caja metálica que sirve de envuelta.

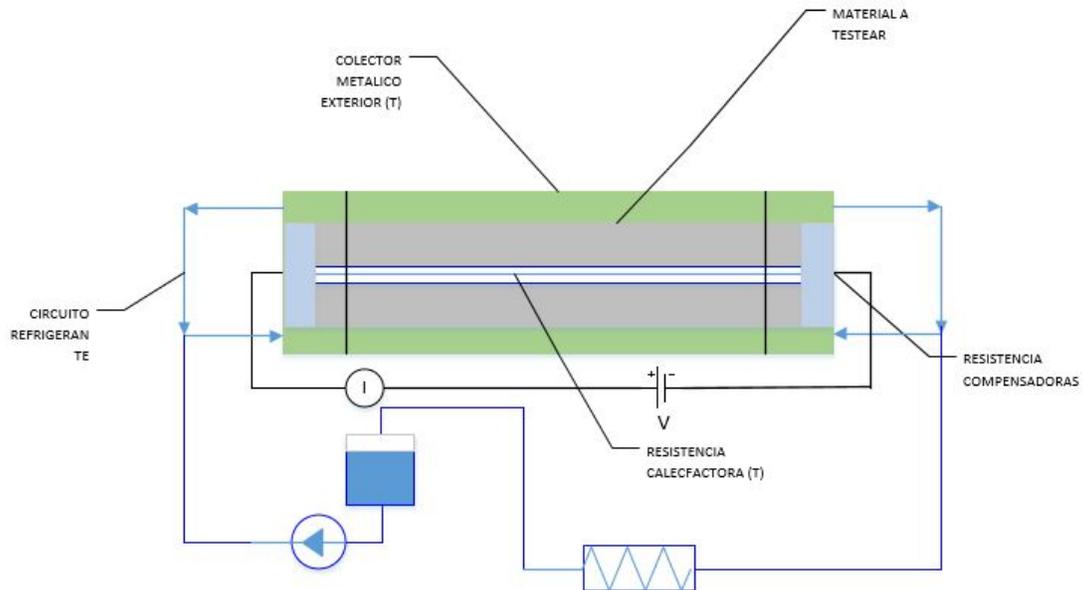
La conductividad térmica se obtiene de:

$$\frac{\dot{Q}}{2} = \frac{\bar{V}I}{2} = kA \frac{T_1 - T_2}{e}$$

Donde **e** es el espesor de la placa y **A** el área de esta, perpendicular al flujo de calor. El dispositivo se muestra en la **Figura 42**.

Figura 42

Dispositivo para medición empleando geometría plana



3.1.2 Objetivo

Identificar y calcular propiedades térmicas tales como:

- Capacidad calórica
- Conductividad
- Difusividad térmica

Para distintos materiales tales como:

- Aceite mineral
- Etanol

- Arena
- Metal

3.1.3 Equipos e insumos

- Plancha de calentamiento.
- Resistencia eléctrica (Deben conseguirla los estudiantes)
- Fuente de voltaje
- Voltímetro digital para medición de corriente, voltaje y resistencia.
- Material aislante
- 3 termocuplas o termómetros datalogger.
- Dispositivo (Deben construirlo los estudiantes)

3.1.4 Procedimiento

Cada grupo de trabajo debe escoger un material a ser analizado, seleccione diseñar el montaje más adecuado y realizar prueba experimental proponiendo un protocolo experimental.

- Disponga del material a evaluar en el dispositivo
- Encienda la resistencia eléctrica del dispositivo
- Con el multímetro mida el voltaje y corriente del sistema en operación
- Mida las temperaturas de T_1 y T_2 en el dispositivo
- Asegúrese que el material alcanza el estado estacionario

3.1.5 Informe

Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>, incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias

3.2 Práctica N° 2: Flujo de calor en aletas longitud infinita

3.2.1 Marco teórico

Cuando se desea aumentar el flujo de calor entre un cuerpo y el fluido en el que está inmerso, se suele actuar sobre el fluido aumentando su turbulencia o sobre la superficie aumentando su rugosidad y su emisividad. En algunos casos no basta con esta solución, por lo cual hay que aumentar el área de transferencia de calor haciendo más grande la superficie del cuerpo en cuestión.

No obstante, esta solución en algunos casos puede resultar engorrosa o imposible por el tamaño del nuevo cuerpo y la dificultad en el montaje. Para evitar estas grandes extensiones de material, se pueden utilizar las superficies extendidas o aletas. Así la superficie aleteada transfiere más calor que la superficie sin aletas, y el cociente de calores entre ambas (superficie sin aletear y aleteada) permite evaluar la solución que se proponga.

Para hallar la ecuación que describe el comportamiento de la temperatura en la aleta se aplica la ecuación de conservación de energía al elemento diferencial en estado estacionario unidimensional, para un sistema con conducción homogénea $k=\text{cte}$ (Ver **Figura 43**).

$$\dot{Q}|_{cod,z} = \dot{Q}|_{cod,z+\Delta z} + \dot{Q}|_{conv} \quad \text{Ec. 1}$$

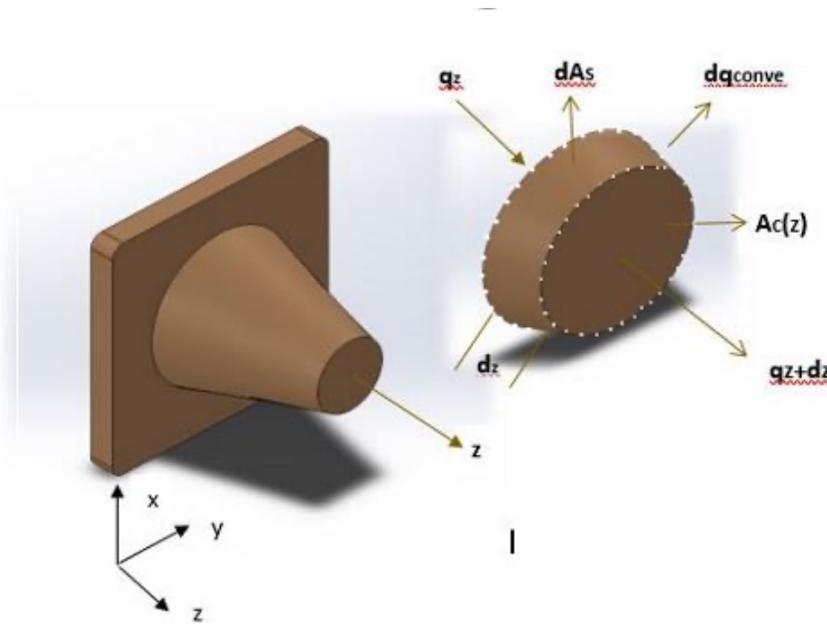
La transferencia de calor por convección se puede calcular como: $\dot{Q}_{conv} = h_c P dz (T - T_\infty)$ Donde h_c es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, T es la temperatura del medio donde se encuentra la aleta o superficie P el perímetro del elemento diferencial y dz el espesor del elemento.

Al sustituir y dividir por un diferencial $\Delta z \rightarrow \infty$ obtenemos la ecuación diferencial de energía, a partir de la cual podemos encontrar la distribución de temperaturas en una superficie extendida a lo largo de la dirección z , ya que se consideró que el flujo de calor unidireccional. Debe anotarse que para solucionar la ecuación es necesario ser más específico acerca de la geometría de la aleta y definir P .

$$\frac{d^2 T}{dz^2} - \frac{h_c P}{k A_c} (T - T_\infty) = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

Figura 43

Aleta y elemento diferencial de volumen de una aleta en extendida en el eje z, con longitud dz, área seccional A_c y perímetro P



Si la sección transversal, la conductividad del material y el perímetro son constantes, la ecuación diferencial Ec. 2 que representa la transferencia de calor en el eje z, se puede simplificar en una ecuación diferencial lineal, homogénea, de segundo orden con coeficientes constantes como la presentada por la ecuación 3.

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} - m^2(T - T_\infty) = 0 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

$$m^2 = \frac{hp}{kA_c}$$

$$\theta = (T - T_\infty)$$

La solución analítica de la ecuación 3 es una solución común, y es presentada por la ecuación 4, sin embargo, las constantes C_1 y C_2 tomarán distintos valores en función de la condición de frontera impuesta en la aleta. Para el caso de una aleta infinitamente larga, las condiciones de frontera estarían definidas por las ecuaciones 5 y 6, con una temperatura en la base de la aleta T_b y alcanzando la temperatura del ambiente T_∞ en la punta de la aleta con longitud L .

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\theta(0) = (T_b - T_\infty) \quad z = 0 \quad \text{Ec. 5}$$

$$\theta(0) = (T(L) - T_\infty) = 0 \quad z = L \rightarrow \infty \quad \text{Ec. 6}$$

La solución analítica de la ecuación diferencial puede ser definida por la ecuación 7[1].

$$\frac{T(z) - T_\infty}{T_b - T_\infty} = e^{-mz} \quad \text{Ec. 7}$$

3.2.2 *Objetivos*

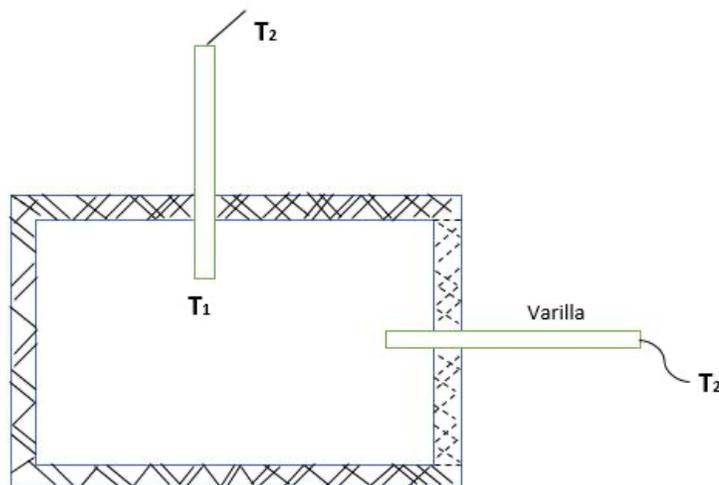
Analizar la conducción de calor en aletas infinitas con diferentes geometrías y materiales.

3.2.3 Equipos e insumos

Aletas de longitud infinita: Para este montaje se utilizará un horno o mufla como fuente de la energía. En la parte frontal y superior del horno hay agujeros en los cuales se instalarán barras de distintas configuraciones geométricas, como se ilustra en la **Figura 44**.

Figura 44

Esquema experimental de laboratorio de Calor



3.2.4 Procedimiento

- I. Seleccione una de las aletas disponible para la práctica.
- II. Fije la temperatura del horno alrededor de 120-150 °C y espere que alcance la condición en estado estacionario.
- III. Instale la aleta con una longitud fija dentro del horno (En la parte frontal y superior del horno hay agujeros en los cuales se instalarán barras de distintas configuraciones geométricas, como se ilustra en la **Figura 44**).

IV. Mida la longitud expuesta al ambiente de la aleta.

V. Para análisis de aletas registre los siguientes datos:

- Temperatura ambiente ____ °C
- Diámetro de la Varilla _____ m²
- Longitud de varilla expuesta al ambiente ____ m
- Longitud de varilla expuesta al horno _____ m
- Longitud de varilla en zona de aislante _____ m
- Consulte la conductividad k del material con base en la información disponible en el laboratorio.

Tomando una separación equidistante entre todos los puntos registre los siguientes datos:

	Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Posición											
(m)											
Geometría 1											
Temp.											
Geometría 2											
Temp.											
Geometría 3											
Temp.											

Cálculos para Aletas de longitud infinita.

Para cada tipo de aleta:

- Trazar curva de temperatura contra distancia con los datos experimentales, con su respectiva ecuación para la línea de tendencia.
- Hallar el flujo de calor conducido por la aleta a partir de la ley de Fourier de la conducción de calor en la base del elemento:

$$\dot{Q} = -k \cdot A_{transv} \cdot \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}$$

Donde el gradiente de la temperatura respecto x se determina a partir de la ecuación ajustada anteriormente.

- Hallar el coeficiente convectivo promedio a partir de:

$$\bar{h} = \frac{\dot{Q}}{\int_{A_{lateral}} (T(x) - T_{\infty}) dA_{lateral}}$$

- Con el coeficiente convectivo hallado en el paso anterior trazar la curva teórica de distribución de temperatura y de distribución de flujo de calor como funciones de la longitud x. Evalúe el efecto de utilizar el coeficiente convectivo previamente utilizado y la solución teórica en función de las condiciones de contorno que mejor representen el comportamiento del sistema experimental.
- Realice un análisis térmico del elemento, implementado software computacional solid Works, describiendo las condiciones de contorno utilizadas para alcanzar una representación del comportamiento experimental medido.

3.2.5 Informe

Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>, incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias.

3.3 Práctica N° 3: Ley de enfriamiento de Newton – Análisis térmico de sistema de Masa concentrado

3.3.1 Marco teórico

Isaac Newton (1641-1727) es reconocido por sus numerosas contribuciones a la ciencia. Entre otras cosas estudió el movimiento y estableció las leyes de la dinámica, enunció la ley de la gravitación universal, explicó la descomposición en colores de la luz blanca cuando pasa por un prisma, etcétera. A los 60 años, aceptó un puesto como funcionario nacional y se desempeñó como responsable de la Casa de La Moneda de su país. Allí tenía como misión controlar la acuñación de monedas.

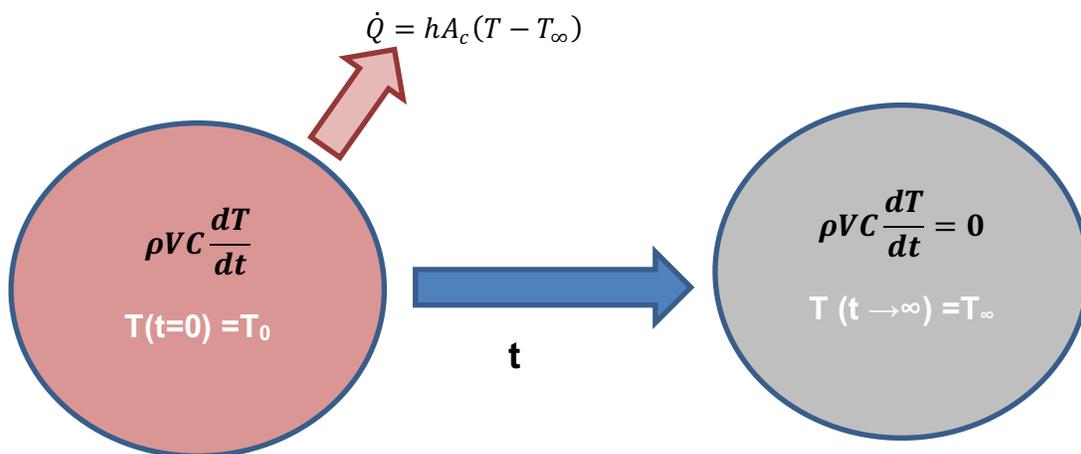
Probablemente se interesó por la temperatura, el calor y el punto de fusión de los metales motivado por su responsabilidad de supervisar la calidad de la acuñación. Utilizando un horno a carbón de una pequeña cocina, Newton realizó el siguiente experimento. Calentó a rojo una moneda de hierro. Al retirarlo del fuego lo colocó en un lugar frío y observó cómo este se enfriaba (Ver) y estableció su dinámica térmica. Si se asume que el sistema (Moneda) tiene una conductividad térmica infinita y/o la resistencia térmica por convección-radiación es mucho mayor a la resistencia por conducción en el sistema ($R_{\text{cov-rad}} > R_{\text{cond}}$), la variación de temperatura será 0 en cualquier dirección axial $\left(\frac{dT}{dx,y,z} = 0\right)$ y la temperatura del sistema será uniforme en cualquier instante de tiempo. Por lo tanto el sistema se puede definir como un sistema de masa concentrada. Despreciando cualquier cambio de energía cinética u potencial de la

moneda, la transferencia de calor por convección Q_{conv} solo ocasionará el cambio de la energía interna del sistema como se presenta en la ecuación.

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{dU}{dt} = \rho VC \frac{dT}{dt} \quad \text{Ec. 1}$$

Figura 45

Esquema de cuerpo enfriándose en un medio a temperatura T_{∞} .



Así, el calor transferido $[\dot{Q}_{conv}]$ por el medio en estado transitorio es igual al cambio en la energía interna $[U]$ del sensor. Si se considera que la masa posee unas temperaturas mayores $T > T_{\infty}$ o menores $T < T_{\infty}$ que el ambiente podemos considerar un calentamiento o enfriamiento por convección desde el medio $\dot{Q} = hA_c(T - T_{\infty})$ como se muestra en la **Figura 45**, donde:

- h es el coeficiente de transferencia de calor por convección – radiación $[W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}]$.
- A_c es el área de contacto del cuerpo con del medio $[m^2]$
- T la temperatura del cuerpo $[^\circ C]$.

- T_{∞} la temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$].
- ρ la densidad del material [kg m^{-3}]
- V el volumen del sistema [m^3]
- C capacidad calorífica del material [$\text{J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$]

De acuerdo con lo anterior y tomando propiedades térmicas constantes para el sistema, la ecuación diferencial resultante, es conocida con el nombre de ley de enfriamiento de Newton, que se describe como:

$$\rho V C \frac{dT}{dt} = -h A_c (T - T_{\infty}) \quad \text{Ec. 2}$$

Aplicando separación de variables a la ecuación diferencial anterior, se obtiene la ecuación diferencial de primer grado:

$$\frac{dt}{\frac{\rho V C}{h A_c}} = \frac{dt}{\tau} = \frac{dT}{(T - T_{\infty})} \quad \text{Ec. 3}$$

El término $\frac{\rho V C}{h A_c} = \tau$ se denomina tiempo de respuesta, la solución analítica de la Ec. 3 es obtenida por la integración por separación de variables, obteniendo la Ec. 4. El valor τ representa el tiempo en el cual la diferencia de temperaturas entre el medio y el elemento se reduce al valor $1/e = 0.368$ de la diferencia inicial, o sea que es el tiempo necesario para lograr el 63.2% de la diferencia inicial de temperatura, esto ocurre porque ningún cuerpo físico responde inmediatamente a un cambio de temperatura en su ambiente debido a su inercia térmica.

$$\ln(T - T_0) = -\frac{t}{\tau} + C1 \quad \text{Ec. 4}$$

Finalmente, considerando la condición inicial del sistema donde para $t = 0$, la temperatura inicial es T_0 , se encuentra la solución particular como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\ln\left(\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}\right) = -\frac{t}{\tau} \quad \text{Ec. 5}$$

3.3.2 *Objetivos*

Evaluar la validez de la ley de enfriamiento de Newton para la representación de procesos de enfriamiento de un sistema simple o de masas concentrada.

- Encontrar el tiempo de respuesta térmica τ de diferentes sensores de temperatura.

3.3.3 *Equipos e insumos*

- Beaker de 200 ml
- 100g de Hielo (Suministrado por el estudiante)
- Recipiente aislante
- Plastilina
- Plancha de calentamiento
- Tres sensores de temperatura con diferentes termoposos.
- Balanza de masa

3.3.4 Procedimiento

- Deposite en un recipiente aislado un baño de hielo fundente.
- Tome los termopares y termómetros que se han de emplear y verifique su correcto funcionamiento.
- Introduzca el termopar en el baño de hielo
- Registre tiempo y temperatura hasta que se alcance la temperatura del medio.
- Vierta agua en un beaker y caliente hasta lograr el punto de ebullición.
- Introduzca el termopar en el beaker con agua hirviendo y tome el tiempo
- Repita los pasos anteriores de calentamiento para los diferentes sensores con el proceso inverso, es decir, para el caso donde el termopar va de la temperatura del medio a temperatura ambiente.
- Tome plastilina y realice alguna forma geométrica sobre los sensores y realice el procedimiento anterior (solo en temperaturas bajas, esto es, desde temperatura ambiente hacia temperatura de fusión y desde temperatura de fusión hasta temperatura ambiente).

3.3.5 Informe

- Encuentre el valor que toma la constante C_1 en la ecuación 1, enfriamiento usando métodos gráficos y analíticos aplicando la ley de enfriamiento de Newton.
- Calcule la constante τ para todos los sensores utilizados en los diferentes casos.

- Explique cómo es la variación de la constante de tiempo para todos los casos.
- Analice el comportamiento del sensor en los diferentes medios.
- Analice el efecto de la plastilina en el sensor.
- Analice el comportamiento del sensor con las diferentes geometrías de plastilina.
- Determine el coeficiente de convección
- Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>

es) incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones

3.4 Práctica N° 4: Calentamiento y enfriamiento de cuerpos

3.4.1 Marco teórico

Estimación de coeficiente global pérdidas – la variación temporal de la temperatura interna de un cuerpo que se enfría o calienta por el intercambio de calor con el ambiente puede ser representado por la siguiente ecuación diferencial:

$$M_C * C_S * \frac{dT_C}{dt} = -U * A_S * (T_C - T_\infty) \quad \text{Ec. 1}$$

El lado izquierdo de la ecuación 1 representa la dinámica de la temperatura en el tiempo para la masa del sistema de interés M_C (kg), C_S (KJ/kg) calor específico del sistema, T_C (K) temperatura del sistema, y t tiempo. El lado derecho de la ecuación 1 representa las pérdidas y/o ganancias térmicas del sistema, por medio de un coeficiente global transferencia U ($W \text{ m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), A_S área específica de transferencia, T_∞ temperatura ambiente y T_C temperatura del cuerpo. La solución de analítica de la ecuación 1 se logra a partir de la separación de variables y su integración, junto con la estimación de las constantes de integración. La ecuación 2 presenta la solución analítica obtenida.

$$T_C - T_\infty = (T_0 - T_\infty) * \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{Ec. 2-a}$$

$$\ln[(T_C - T_\infty)] = -\frac{t}{\tau} + \ln(T_0 - T_\infty) \quad \text{Ec. 2-b}$$

Donde T_0 representa la temperatura inicial del cuerpo y τ el factor de respuesta térmica definido como:

$$\tau = \frac{M_C * C_s}{U * A_s} \quad \text{Ec. 3}$$

Para para estimar el coeficiente global de transferencia de calor es necesario registrar datos experimentales de la variación de la temperatura con el tiempo, graficar $\ln(T_r - T_\infty)$ vs t de los datos experimentales y obtener el valor de τ a partir de la pendiente de la línea recta obtenida (Ver Ec. 2-b). A partir de τ se estima el coeficiente global de transferencia de energía U utilizando la ecuación 3 en función de la masa del cuerpo M_C , calor específico del cuerpo y el área de transferencia efectiva del sistema A_s .

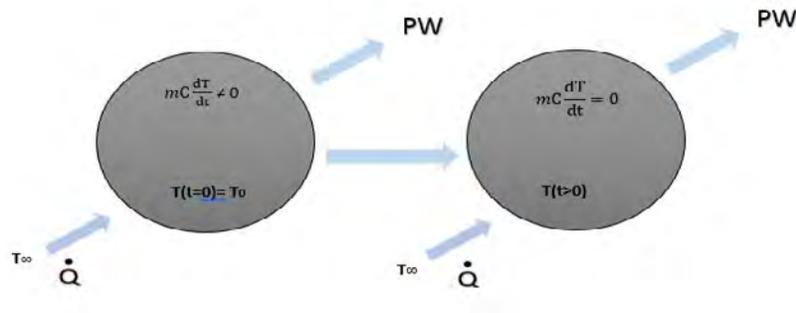
Estimación de potencia de calentamiento y/o enfriamiento de un cuerpo- ahora considere la variación temporal de la temperatura interna de un sistema en contacto con el ambiente, que posee una interacción una energía por transferencia de calor en función de una potencia térmica bien sea entrado o saliendo PW . La dinámica térmica de este sistema puede ser representada por la ecuación 4. Donde M_c representa la masa en el recinto (Kg), C_s el calor específico de cuerpo (KJ/Kg °C), A_s área específica (m²), T_c temperatura del sistema (°C), T_∞ temperatura en el ambiente (°C), PW representa la potencia calor suministrada o removida del cuerpo (kW) y U el coeficiente global de transferencia del sistema (kW/m² °C).

Figura 46

Cuerpo sometido a proceso de calentamiento o enfriamiento

Ec. 4

$$M_c C_s \frac{dT_c}{dt} = U * A_s * (T_c - T_\infty) \pm PW$$



El término de lado izquierdo de la ecuación 4 representa la acumulación de energía en el sistema; mientras el primer término del lado derecho representa la ganancia de energía desde el ambiente o calor transferido desde el ambiente \dot{Q} , y el último término representa la potencia térmica suministrada o removida del sistema por otros medios PW (Figura 46). La solución analítica de la Ec. 4 es presentada por la ecuación 5.

$$(T - T_\infty) = (T_0 - T_\infty)e^{(-t/\tau)} + \frac{\pm PW}{U * A_s} (1 - e^{(-t/\tau)}) \quad \text{Ec. 5}$$

Agrupando las variables de la ecuación anterior y definiendo nuevas variables como:

$$X = e^{(-t/\tau)} \quad \text{Nuevas variables}$$

$$Y = (T - T_\infty)$$

$$C_0 = (T_0 - T_\infty)$$

$$K_0 = \frac{PW}{U * A_S}$$

La ecuación 5 y se puede reescribir de una manera más simple e intuitiva como una función de línea recta ver Ec. 6

$$Y = (C_0 - K_0)X + K_0 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde K_0 [°C] es una variable de agrupamiento que nos permite relacionar el cambio de la temperatura del sistema, debido a la relación entre la potencia suministrada o removida del sistema PW [W] y las pérdidas o ganancias de calor con el ambiente UA_S [W °C⁻¹]. La representación de los datos experimentales $(T - T_\infty)$ vs $e^{\left(\frac{t}{\tau}\right)}$ nos arroja una línea recta en el plano cartesiano, cuyo intercepto es K_0 . Una vez determinado el coeficiente global de transferencia U es posible encontrar la potencia suministrada o removida del sistema a partir de los datos experimentales.

3.4.2 **Objetivos**

Estimar coeficiente de transferencia global y potencia de calor a partir de datos experimentales de enfriamiento y calentamiento de cuerpos.

3.4.3 **Equipos e insumos**

Parrilla eléctrica de calentamiento.

- Beaker de 250 ml o Lata aluminio 355 ml.

- Balanza analítica digital.
- 2 termocuplas y tarjeta de adquisición de datos.
- Ventilador.

3.4.4 Procedimiento

- Agregue 200ml de agua al recipiente seleccionado y péselo.
- Proceda a calentar el agua hasta una temperatura definida 50,70, o 90 °C.
- Registre los datos T vs t con una frecuencia adecuada
- Una vez alcance la temperatura el agua, debe retirarla de la parrilla y dejarla enfriar con ventilación asistida hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- Registre los datos de (T vs t) del agua.
- Tome los datos durante el tiempo que sea necesario.
- Una vez termine la prueba, realice nuevamente el calentamiento con ventilación asistida hasta temperaturas de 50 ,70 o 90 °C.
- Registre los datos T vs t con una frecuencia adecuada

3.4.5 Informe

- Encuentre la potencia y coeficiente global de transferencia al ambiente del sistema experimental para el caso de convección natural y forzada.
- Presente una metodología gráfica a partir de la cual estime los coeficientes de transferencia y la potencia de calentamiento.

- Verifique la validez de la ecuación 5 para predecir el comportamiento de cuerpos durante calentamiento y enfriamiento.
- Estime el coeficiente de transferencia por convección para los dos casos (Calentamiento - Enfriamiento) una vez planteada la analogía de resistencias térmicas del sistema.
- Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA

(<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>) incluyendo las siguientes secciones.

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias

3.5 Práctica N° 5: Análisis transitorio de transferencia de calor en sistemas no concentrados

3.5.1 Marco teórico

En los sistemas en régimen transitorio, las temperaturas cambian con el tiempo, así como con la posición.

El estado inestable o transitorio aparece también en la determinación del tiempo de procesado de muchos artículos sólidos. Por ejemplo, el tiempo de curado de objetos de plástico moldeado, dependen frecuentemente del tiempo requerido para que el centro alcance una temperatura especificada, para poder manipular el objeto sin causar daño físico al material de la superficie. El tiempo de cocción de productos cárnicos depende de alcanzar una temperatura de cocción específica en el centro del alimento, y mantenerlo en un intervalo de tiempo definido para garantizar la esterilización del alimento.

La teoría de la conducción no estable tiene también aplicación en el tratamiento térmico y templado de metales. Un tipo de problema ligeramente diferente se caracteriza por la variación periódica de la temperatura. Las máquinas de combustión interna, los compresores, las armas automáticas, generan calor periódicamente; la disipación de este calor causa fluctuaciones periódicas de temperatura en los alrededores. Otro ejemplo es el efecto de las variaciones diurnas de la temperatura atmosférica en estructuras grandes como puentes o pequeñas como plantas en crecimiento.

La formulación de problemas de conducción de calor para la determinación de la distribución unidimensional transitoria de temperatura en una pared plana, un cilindro o una esfera conduce a una ecuación diferencial en derivadas parciales como la que se presenta en la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{d^2 T}{dz^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Bajo las siguientes suposiciones:

- Conducción Unidimensional.
- Propiedades termofísicas constantes.
- No generación ni consumo de calor en el volumen.
- Coeficiente constante de convección.
- Temperatura inicial uniforme

La solución de este tipo de ecuación está relacionada con series infinitas y ecuaciones implícitas, bajo condiciones de contorno simples ver, las cuales son difíciles de evaluar. Por lo tanto, existe una motivación para simplificar las soluciones analíticas, y aproximarlas a un solo término, sacrificando exactitud, pero facilitando su uso. Para números de Fourier $\left(Fo = \frac{\alpha t}{L^2}\right)$ mayores de 0.2 la aproximación del valor de la temperatura $T(z, t)$ con el primer término de la serie infinita genera errores menores al 2%. Por lo que es posible aproximar la temperatura $T(z, t)$ de geometrías simples a partir de la ecuación 2 [1].

Placa plana $\theta_{pared} = \frac{T(z, t) - T_2}{T_1 - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \cos(\lambda_1 x/L)$ Ec. 2-a

Cilindro $\theta_{cil} = \frac{T(r, t) - T_2}{T_1 - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} J_0(\lambda_1 r/r_0)$ Ec. 2-b

Esfera $\theta_{esf} = \frac{T(r, t) - T_2}{T_1 - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \frac{\text{Sen}(\lambda_1 r/r_0)}{\lambda_1 r/r_0}$ Ec. 2-c

Esta aproximación puede ser aún más simplificado evaluando solo la temperatura a en el centro de la geometría donde la solución de las ecuaciones se simplifica a:

Placa plana $\theta_0 = \frac{T(0, t) - T_2}{T_1 - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$ Ec. 2-a

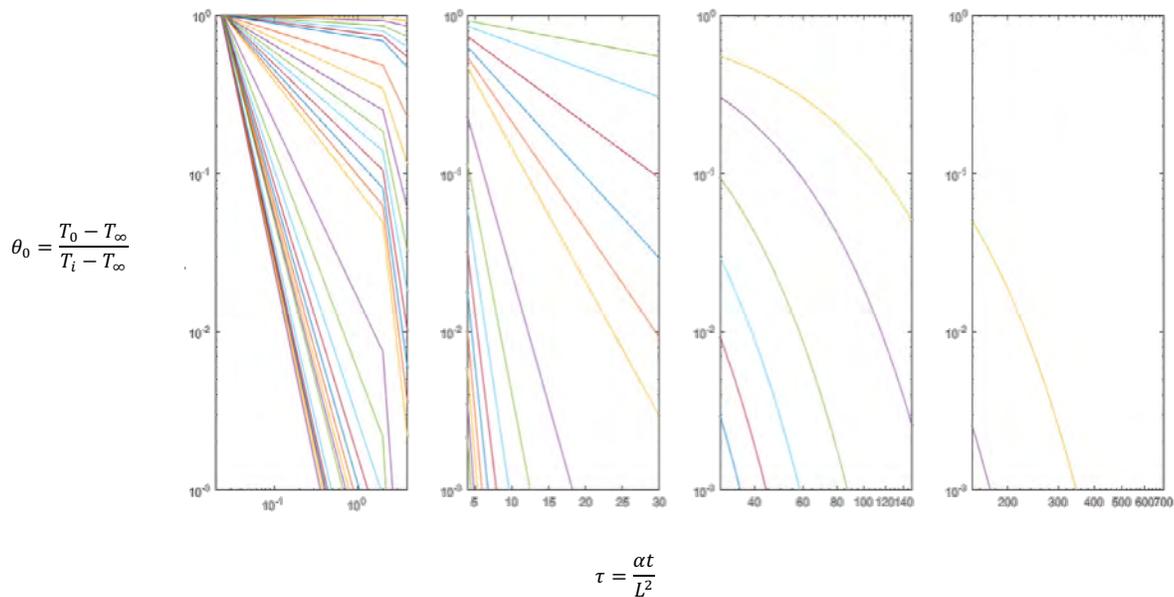
Cilindro $\theta_0 = \frac{T(0, t) - T_2}{T_1 - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$ Ec. 2-b

Esfera $\theta_0 = \frac{T(0, t) - T_2}{T_1 - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$ Ec. 2-c

Así es posible encontrar las soluciones de tabuladas y/o gráfica, de estas aproximaciones. Siendo posible construir gráficas con las soluciones analíticas para diferentes valores de números adimensionales como $\text{Bi}\left(\frac{hL}{k}\right)$, $\text{Fo}\left(\frac{\alpha t}{L^2}\right)$ como se presenta en la **Figura 47**. Un ejemplo común son las gráficas de Heisler, para pared plana grande, cilindro largo y esfera; estas fueron presentadas por M.P. Heisler, en 1947 (Cengel and Ghajar, 2011).

Figura 47

Diagrama Heisler para pared plana



3.5.2 Objetivos

Validar el uso de aproximaciones analíticas simples para la predicción de la evolución de la temperatura en estado transitorio de sistemas de masa no concentrada.

3.5.3 Equipos e insumos

- Parrilla eléctrica de calentamiento.
- Beaker de 800 ml u olla de aluminio.
- 2 termocuplas tipo punzón y tarjeta de adquisición de datos.
- Elementos con forma geométricas simples como cilindros y esferas (Productos cárnicos, frutas, verduras, bloques, etc.) – Suministrados por el estudiante.

- Agua.
- Cronómetro.
- Soporte Universal con pinza para probeta.

3.5.4 Procedimiento

- Agregue la cantidad de agua necesaria para sumergir el elemento en el recipiente y/o beaker.
- Proceda a calentar el agua hasta la temperatura de ebullición.
- Inserte la termocupla tipo punzón en el elemento de tal manera que quede justo en el centro geométrico del elemento (esfera o cilindro).
- Sumerja el elemento en el agua hirviendo.
- Registre los datos de (T vs t) para el agua y el elemento.
- Tome los datos durante el tiempo que sea necesario hasta alcanzar la temperatura de ebullición y/o temperatura definida por el grupo de trabajo.
- Una vez termine la prueba de calentamiento, realice el seguimiento de enfriamiento del mismo elemento a temperatura ambiente.
- Registre los datos T vs t con una frecuencia adecuada hasta que se alcance la temperatura ambiente.

3.5.5 Informe

- Identifique las propiedades termo físicas necesarias para aplicar el metodología analítica y gráfica en la predicción del el calentamiento y enfriamiento

por conducción en cuerpos geométricos simples (placa, cilindro y esferas) en estado transitorio $T(z,x)$.

- Prediga la evolución temporal de la temperatura en el centro del material evaluado durante el calentamiento utilizando el método analítico y/o gráfico aquí propuesto.
- Compare la predicción obtenida con los resultados experimentales y discuta los resultados.
- Estime el término convectivo de transferencia de calor durante el proceso de enfriamiento al ambiente utilizando los métodos analíticos y gráficos aquí propuestos.
- Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>
incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones

3.6 Set N° 6: Thermal and energy analysis of solar photovoltaic model

3.6.1 Theory

Pandey A. at 4 chapter [1] of his work, proposed a methodology to analyze solar photovoltaic module's energy and exergy). Its methodology starts to measure the input energy i.e., the energy of solar radiation is given by

$$\dot{Q}_{in} = I_s A \quad \text{Eq. 1}$$

Where I_s is the intensity of solar radiation (that can be measured with a pyranometer), and A is the area of SPV module. The actual output of the SPV module may be defined as below:

$$Q_0 = V_{OC} I_{sc} FF \quad \text{Eq. 2}$$

Where V_{OC} is open circuit voltage, I_{sc} is short circuit current and FF is fill factor. The fill factor (FF) of the SPV system can be defined as the ratio of the product of voltage corresponding to maximum power (V_m) and the current corresponding to maximum power (I_m) to the product of open circuit voltage and short circuit current and can be expressed as below:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{OC} I_{sc}} \quad \text{Eq. 3}$$

Using the above definition, Eq. (2) can also be expressed as below:

$$Q_0 = V_m I_m \quad \text{Eq.4}$$

The input exergy i.e. exergy of solar radiation is given by:

$$\dot{E}x_{solar} = \dot{E}x_{in} = \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) I_s A \quad \text{Eq.5}$$

T_s is the sun's temperature which is taken as 5777 K and T_a is the environmental temperature. The exergy output of the SPV systems can be given as follows:

$$E_{x_{out}} = E_{x_{elec}} + E_{x_{d_{therm}}} + E_{x_d} = E_{x_{elec}} + I' \quad \text{Eq.6}$$

Where $I' = \sum E_x = E_{x_{d_{therm}}} + E_{x_{d_{elect}}}$ which includes internal as well as external losses, Internal losses are electrical exergy destruction i.e. $E_{x_{d_{elect}}}$ and external losses are heat loss, $E_{x_{d_{therm}}}$ which is numerically equal to $E_{x_{d_{therm}}}$ for PV system. For the calculation of electrical exergy of the PV system i.e. $E_{x_{elec}}$ it has been assumed that exergy content received by the photovoltaic surface is fully utilized to generate maximum electrical exergy ($V_{oc} I_{sc}$).

$$\dot{E}x_{elec} = E_{elc} - I' = V_{oc} I_{sc} - (V_{oc} I_{sc} - V_m I_m) \quad \text{Eq.7}$$

Where, $V_{oc} I_{sc}$ represents the electrical energy and $(V_{oc} I_{sc} - V_m I_m)$ represents the electrical exergy destruction. Therefore from the above equation, we find the electrical exergy as below:

$$\dot{E}x_{elec} = V_m I_m \quad \text{Eq.8}$$

The thermal exergy of the system ($Ex_{d.therm}$) which is defined as the heat loss from the photovoltaic surface to the ambient can be represented as below:

$$\dot{Ex}_{therm} = \left(1 - \frac{T_a}{T_{cell}}\right) Q \quad \text{Eq.9}$$

Where $\dot{Q} = h_{ca}A(T_{cell} - T_A)$ where h_{ca} the combine (convective-radiative) heat transfer coefficient and its is a function of is the wind speed [2]. Using the above equations exergy of SPV system can be written as below:

$$\dot{Ex}_{PV} = V_m I_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_{cell}}\right) h_{ca} A (T_{cell} - T_A) \quad \text{Eq.10}$$

The solar cell power conversion efficiency (η_{pce}) can be defined as the ratio of actual electrical output to the input solar radiation ($I_s A$) on the PV surface and can be given as below:

$$\eta_{pce} = \frac{V_m I_m}{I_s A} \quad \text{Eq.11}$$

The power conversion efficiency can also be written in the terms of FF using the above equation as follows:

$$\eta_{pce} = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{I_s A} \quad \text{Eq.12}$$

In general the exergy efficiency (ψ) is defined as the ratio of output exergy to that of the input exergy and given as follows;

$$\psi = \frac{\text{Output Exergy}}{\text{Input Exergy}} \quad \text{Eq.13}$$

Using the above equations, the exergy efficiency (ψ) can be expressed as follows:

$$\psi = \frac{V_m I_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_{cell}}\right) h_{ca} A (T_{cell} - T_a)}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) I_s A} \quad \text{Eq.14}$$

3.6.2 Object

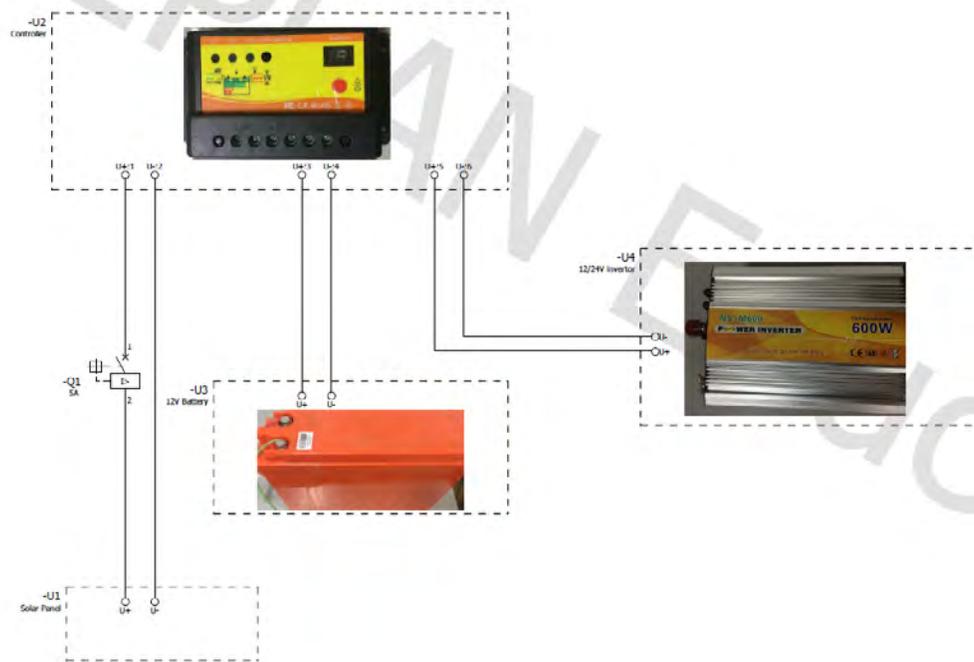
- Evaluate the effect of heat transfer in solar photovoltaic cell energy and exergy production in real operational conditions in the UPB Montería campus.
- Develop a thermal analysis of SPV in function of the transient conditions of heat mass transfer.

3.6.3 Equipment and supplies

- Solar Photovoltaic cell (2 Technologies).
- Multitest VOM.
- Electric resistance.
- Electric Supplies.
- Air temperature and humidity sensor.
- Pyranometer (Enable in Energy renewable laboratory -UPB).
- Anemometer.

Figura 48

Schematic diagram of electric configuration



3.6.4 Methodology

Each work group should plan the experimental process and methodology (measure factor, time to record data, day, etc) to evaluate the energy and exergy production of the Solar Photovoltaic module implemented on UPB campus.

3.6.5 Procedure

- Assemble and prepare the circuit as shown in the image; Later.
- Measure the wind speed.
- Measure the solar radiation in the area of the panel.

- Record the temperatures of the solar panel surfaces. (Front and rear)
- Measure the voltage and amperage at the connections going from the panel to the battery.
- Record the voltage and amperage coming from the battery to the inverter.

3.6.6 Final report

- Present the data of both energy and exergy production by the experimental set implemented.
- Determine the combined convective-radiation heat transfer coefficient as a function of operational condition.
- Estimate the heat loss from SPV.
- Develop a stationary and transient thermal analysis of SPV with computational simulation (SolidWorks) w
- Evaluate the energy and exergy efficient of Solar photovoltaic module on the environmental conditions of UPB campus.
- The results of the test must be presented in scientific paper style with maximum 5 pages following the written format of the journal DYNA (<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>).

3.7 Práctica N° 7: Estimación del coeficientes de transferencia de calor por convección para flujo forzado

3.7.1 Marco teórico

La transferencia de calor por convección se expresa por la ley de Newton del enfriamiento como $Q_{Conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$ donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura superficial y T_∞ es la temperatura de la corriente libre. El coeficiente h no es una propiedad termodinámica, la cual es una correlación simplificada entre el estado del fluido y las condiciones de flujo, que permite describir el transporte de calor en el fluido, por lo cual generalmente se la conoce como una propiedad de flujo. La convección está ligada al concepto de una capa de contorno que es una delgada capa de transición entre una superficie, que se supone adyacente a las moléculas estacionarias, y el flujo de fluido en el entorno. El coeficiente de convección también se expresa como:

$$h = \frac{-k_{fluido} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde $-k_{fluido} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}$ representa el flujo de calor por conducción en esa primera capa de moléculas estacionarias adyacentes a la superficie. Para el cálculo del flujo de calor por conducción en la capa adyacente es necesario la solución simultánea de las ecuaciones de continuidad, de la cantidad de movimiento y de la energía en las condiciones físicas de interés. Mediante las aproximaciones de las capas límite y una

variable de semejanza, las ecuaciones diferenciales de continuidad, cantidad de movimiento y energía se pueden resolver para el flujo incompresible, estacionario para diferentes condiciones experimentales. Este proceso permite correlacionar los procesos de transferencia de calor por convección a partir de números adimensionales como:

- El número de Nusselt, que es el coeficiente de transferencia de calor adimensional, mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por el flujo del fluido (Transporte de calor convectivo) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción. Este número se llama así en honor a Wilhelm Nusselt, ingeniero alemán que nació el 25 de noviembre de 1882 en Núremberg, y lo define como:

$$Nu = \frac{hL}{k_{fluido}} = \frac{\text{Transferencia de calor por conveccion}}{\text{Transferencia de calor por conducción}} \quad \text{Ec. 2}$$

- El número de Prandtl, que es la relación entre la capa límite de velocidad (hidrodinámica) y térmica en el fluido

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular de calor}} \quad \text{Ec. 3}$$

- El número de Reynolds, que es una relación entre las fuerzas inerciales y viscosas del fluido

$$Re = \frac{\vec{V}_c}{\nu} = \frac{\rho \vec{V}_c L_c}{\mu} = \frac{\text{Fuerza Inercial}}{DFuerza viscosas} \quad \text{Ec. 3}$$

El número de Nusselt promedio se puede expresar por una simple relación de la ley de la potencia entre los números de Reynolds y Prandtl para algunos sistemas físicos simples donde se da la transferencia de calor por convección, de la forma:

$$\overline{Nu} = C Re^m Pr^n \quad \text{Ec. 4}$$

Donde m y n son exponentes constantes y el valor de la constante C depende de la configuración geométrica. O a partir de combinación lineales más complejas de los números adimensionales como la siguiente ecuación [1]:

$$\overline{Nu} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{0.5} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad Pr > 0.2 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde se ha correlacionado el número de Nusselt local para el flujo cruzado sobre cilindro y esferas, para sistemas físicos con $RePr > 0.2$.

3.7.2 Objetivos

Medir el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada para flujo externo sobre cilindros, esferas y otros sistemas simples.

3.7.3 Equipos e insumos

- Túnel de viento (incluye ventilador, resistencia eléctrica y demás accesorios)
- Interfaz de datos
- Probeta de metal o sistema físico para calentamiento
- Anemómetro
- Termopar con datalogger
- Beaker
- Plancha de calentamiento
- Pinza

3.7.4 Procedimiento

Enfriamiento

- Ajuste la frecuencia del variador de velocidad para obtener una velocidad de flujo entre 0.5 – 2.0 m/s, ajuste el set point de temperatura a 20°C, para mantener la temperatura del aire constante.
- Mida la velocidad promedio y temperatura del aire a la salida de la tubería.
- Espere hasta obtener el estado estable del equipo.
- Caliente agua en un beaker hasta alcanzar la ebullición.
- Instale la termocupla en el interior de la probeta metálica, introdúzcala en el agua hirviendo y espere hasta que la probeta alcance el equilibrio térmico.

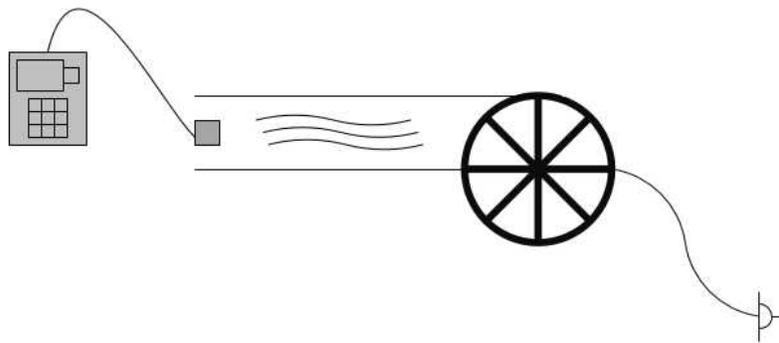
- Una vez alcanzado el equilibrio térmico, retire rápidamente la probeta del agua y someta a enfriamiento en el túnel de viento.
- Mida la evolución temporal de la temperatura hasta que la probeta metálica alcance el equilibrio térmico con el aire en el túnel.
- Estime el coeficiente convectivo del sistema a partir del enfriamiento de la probeta considerándolo como un sistema concentrado y no concentrado.

Calentamiento

- Ajuste la frecuencia del variador de velocidad para obtener una velocidad de flujo entre 0.5 – 1.5 m/s, ajuste el set point de temperatura a 50°C, para mantener la temperatura del aire constante.
- Mida la velocidad promedio y temperatura del aire a la salida de la tubería.
- Espere hasta obtener el estado estable del túnel de viento.
- Instale la termocupla en el interior de la probeta metálica fría e introdúzcala en el túnel de viento.
- Mida la evolución temporal de la temperatura hasta que la probeta metálica alcance el equilibrio térmico con el aire en el túnel.
- Estime el coeficiente convectivo del sistema a partir del calentamiento de la probeta considerándolo como un sistema concentrado y no concentrado.

Figura 49

Esquema de montaje experimental



3.7.5 Informe

- Calcule el coeficiente convectivo a partir de los datos experimentales, describa la metodología utilizada y las suposiciones tomadas.
- Proponga al menos dos correlaciones empíricas para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección a través de las probetas metálicas en función del número de Reynolds y Prandtl.
- Evalúe el error obtenido al calcular el coeficiente convectivo por medio de aproximaciones empíricas (Teoría vs Experimento).
- Analice el origen de las diferencias entre el coeficiente convectivo experimental y teórico.

- Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas, siguiendo el formato escrito de la revista DYNA

(<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>) incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias

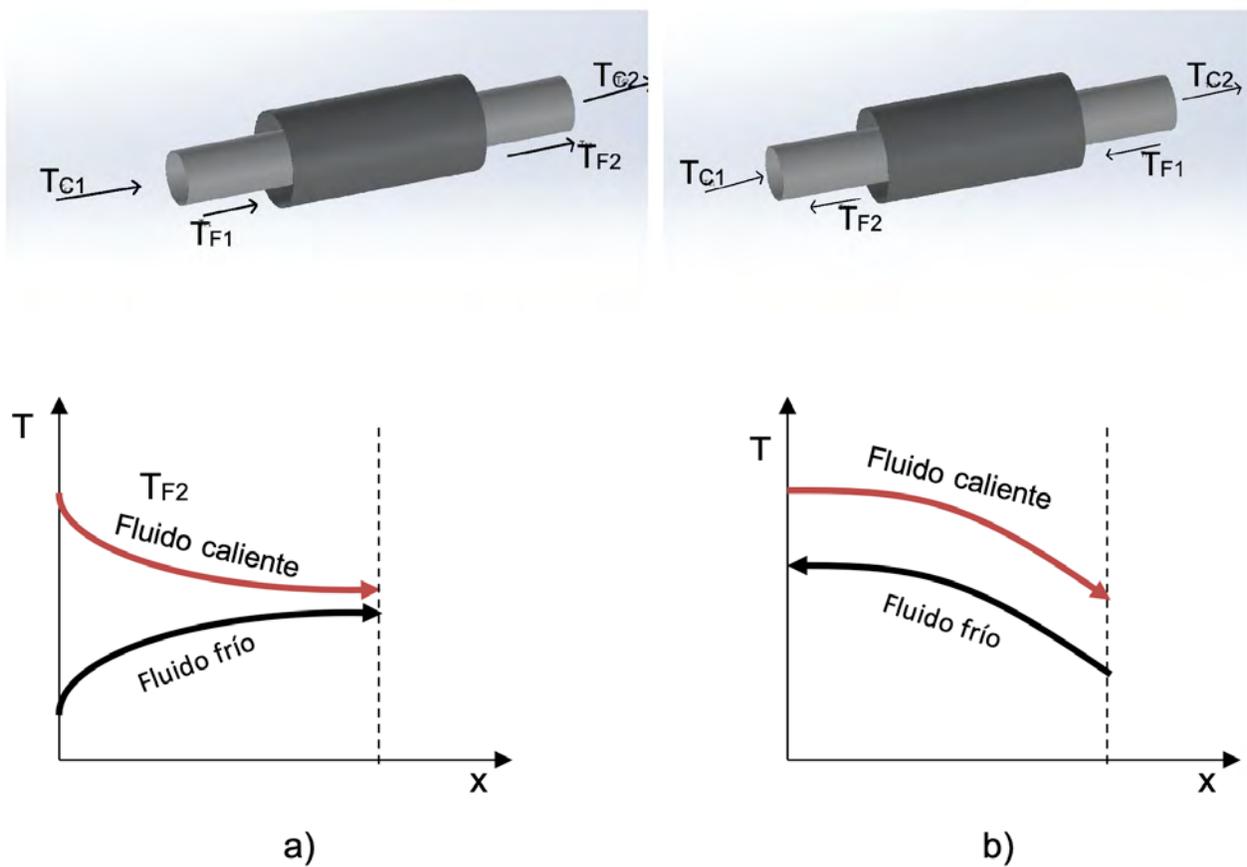
3.8 Práctica N° 8: Intercambiador de calor de tubo concéntrico

3.8.1 Marco teórico

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para que dos corrientes de fluido en movimiento intercambien energía térmica (calor) sin mezclado. Son elementos fundamentales en dispositivos de calefacción, refrigeración, pasteurización, cocción, entre otros. Aplicado en innumerables procesos industriales, comerciales y cotidianos. El intercambiador de calor de tubos concéntricos hace referencia al intercambiador de calor más simple, donde existen dos tubos concéntricos; que permite configurar el paso de dos fluidos, uno caliente y otro frío a través de dispositivo (ver **Figura 50**). Desde el punto de vista de la eficiencia energética, la disposición recomendada para este sistema ubica el fluido caliente por tubo interno y el fluido frío en anulo entre ambos tubos (ver **Figura 50**). Siguiendo la recomendación anterior, se logra una buena transferencia de calor, con una reducción de las pérdidas de calor al ambiente. Dos regímenes de flujo son aplicados en este dispositivo, régimen de flujo paralelo, donde ambos fluidos entran al intercambiador en el mismo sentido, ocasionando una diferencia de temperatura máxima en la entrada, que se reduce a medida que avanza en el equipo (ver **Figura 50**). En un segundo régimen de flujo, se introduce en direcciones opuestas, así se mueven en contra flujo, esto propicia que el gradiente de temperatura se mantenga casi constante durante todo el intercambiador (ver **Figura 50**).

Figura 50

Configuraciones de flujo en intercambiador de doble tubo a) régimen de flujo paralelo b) régimen de flujo contracorriente adaptado de [1]



3.8.2 Objetivos

- Determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección teórica para cada fluido en el intercambiador en función de las condiciones experimentales.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador.

- Validar la metodología de cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para el intercambiador de tubo concéntrico con datos experimentales.

3.8.3 Equipos e insumos

El laboratorio de térmicas de la Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con un banco de intercambiadores de calor que está constituido por 4 tipos de intercambiadores (ver Figura 51):

- I. Calor de tubo y coraza horizontal
- I. Calor de tubo y coraza vertical
- I. Calor de tubo concéntrico
- I. Calor tipo serpentín

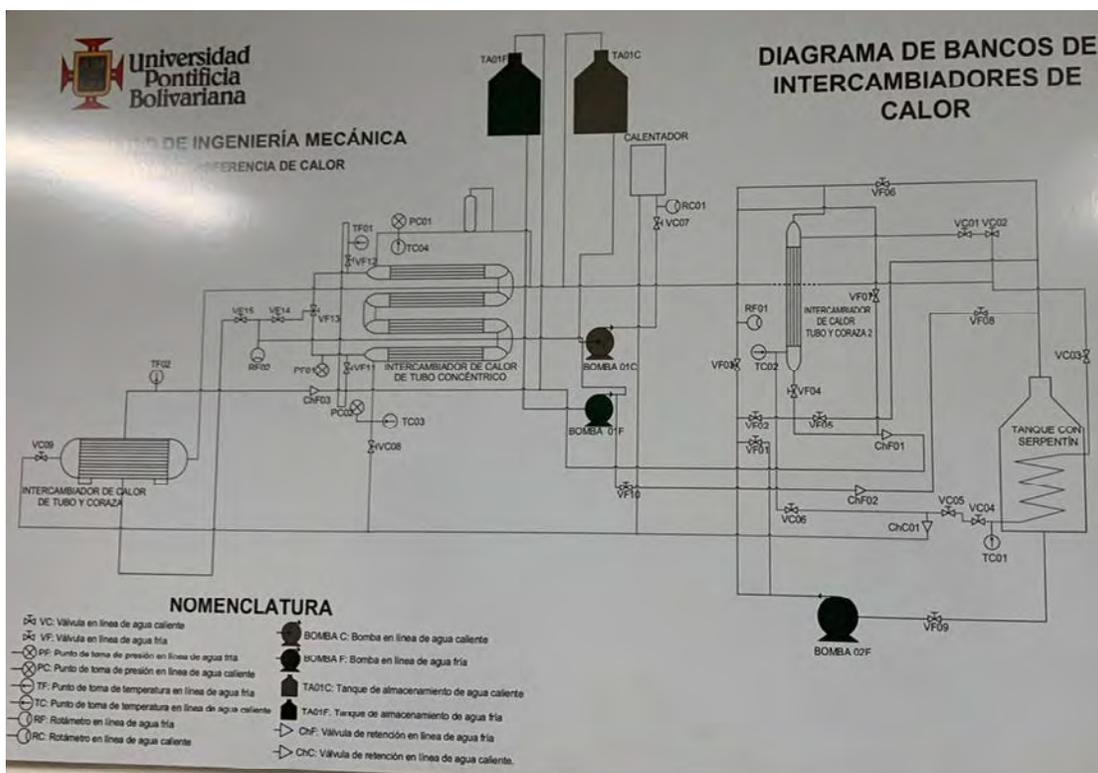
El sistema cuenta con dos líneas de fluido independientes, que puede ser alimentadas al banco y cada uno de los intercambiadores de calor de manera independiente (ver esquema) permitiendo el análisis de térmico del proceso de intercambio de calor entre dos fluidos

En la línea de alta temperatura (Tubería de color gris), fluye agua con una temperatura específica, controlada por medio de un sistema de calentamiento de tiro forzado. Con el que se permite controlar la temperatura del agua entre la temperatura ambiente y hasta una temperatura de 72°C. En la línea de baja temperatura (Tubería de

color verde) fluye agua, que se mantiene a temperatura ambiente, por medio de un tanque de amortización que se encuentra en la parte externa del laboratorio.

Figura 51

Esquema de los Intercambiadores de calor del laboratorio de transferencia de calor.



El intercambiador de tubo concéntrico del laboratorio de térmicas de la Universidad Pontificia Bolivariana (**Figura 52**), está constituido por una línea de tubos concéntricos con una longitud total de 100cm por tubo, construido con tubos de acero inoxidable, con diámetro nominal de 3.3cm del tubo interno y 6.5cm del tubo externo. Para un mayor detalle ver la tabla de características geométricas del intercambiador.

Figura 52

Intercambiador de calor de tubos concéntricos



Tabla 6

Características geométricas de intercambiador de calor de tubos concéntricos

Tubería	Largo (h) [cm]	Diámetro tubería [cm]	Área [cm ²]	Radio curvatura [cm]	Distancia entre tubos [cm]	Espesor de tubo
Tubo exterior	100	6,5	2108.40	6,75	15,4	3mm
Tubo interior	100	3,3	1053.83	6,75	15,4	2mm

Tabla 7

Propiedades térmicas del material de construcción

Material	Pf [°C]	Cp [J/Kg*K]	K [W/m*K]	r (Kg/m ³)
Acero inoxidable 304	1454	510	16.3	8000

- $A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r+h)$ (área del cilindro en unidades cuadradas)
- Cp = Calor específico

- Pf = Punto de fusión
- K = Conductividad térmica

3.8.4 Procedimiento

Para el correcto funcionamiento y puesta en marcha del intercambiador de tubos concéntricos siga los siguientes pasos:

- Se conecta la bomba de agua que alimenta el flujo frío del intercambiador de calor a la corriente.
- Se cierra la válvula VF-10, esto para aislar el fluido frío de cualquier otra tubería.
- Cierre de la válvula VF-15, previene que el flujo frío entre a una tubería no deseada.
- Se abre VF-14, lleva el fluido frío a través del tubo donde interactuará con el caliente.
- Se abre VF-13 con el fin de determinar en qué dirección irá el flujo frío con respecto al caliente, en paralelo o contra (ver **Figura 50**).
- Abra VF-12, donde el agua fría y caliente comienzan a interactuar durante 1600cm no continuos.
- Se conecta el calentador y posteriormente se conecta la bomba que funciona junto con el calentador permitiendo así el flujo de agua caliente.

Nota: El material por donde circula el agua caliente es una tubería de PVC hasta donde se encuentra con el agua fría, del resto es aluminio, por lo cual, después de 82°C el PVC comienza a deformarse plásticamente, causando que por prevención a los 75°C se apague el calentador automáticamente. Para evitar lo anterior se debe regular manualmente la potencia suministrada al agua (caliente) hasta llegar a un estado estacionario. Se cierra la válvula VF-09 para evitar que el agua que se calentó (que antes era fría) siga circulando y se abre la VF-08 permitiendo el desalojo del agua del intercambiador de calor.

Figura 53

Flujómetros del banco de intercambiadores de calor a) línea de baja temperatura y b) línea de alta temperatura



a)



b)

3.8.5 Informe

- Reporte los datos de operación; flujos volumétricos de las dos líneas y temperaturas alcanzadas en estado estable
- Presente una metodología para la estimación de coeficientes de transferencia de calor por convección para la corriente de alta y baja temperatura en función de las condiciones operacionales medidas
- Estime el coeficiente global de transferencia, característico del intercambiador bajo las condiciones operacionales medidas.
- Prediga el comportamiento del intercambiador de calor en condiciones de corriente y contracorriente implementando el coeficiente global antes calculado.
- Valide los resultados teóricos vs los resultados experimentales y discuta.
- Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>, incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados

- Conclusiones
- Referencias

3.9 Práctica N° 9: Intercambiador de calor de tubos y coraza

3.9.1 Marco teórico

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos están compuestos por tubos cilíndricos, montados dentro de una carcasa también cilíndrica, con el eje de los tubos paralelos al eje de la carcasa. Son uno de los intercambiadores de más populares en la actualidad en la industria. Los componentes básicos de este intercambiador son:

- El haz de tubos (o banco de tubos)
- Carcasa
- cabezal fijo
- Cabezal removible (o trasero),
- Deflectores
- Coraza y Placa tubular.

Se usa una amplia variedad de configuraciones en los intercambiadores de calor de carcasa y tubos, dependiendo del desempeño deseado de transferencia de calor, caída de presión y los métodos empleados para reducir los esfuerzos térmicos, prevenir fugas, fácil mantenimiento, soportar las presiones y temperaturas de operación, y la corrosión[1]. Estos intercambiadores se construyen de acuerdo a las normas de la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores de Calor Tubulares [2], con algunas modificaciones, dependiendo del país.

Figura 54

Isométrico de intercambiador de calor de tubos y coraza horizontal



Tubos- Los tubos son los componentes fundamentales, proporcionando la superficie de transferencia de calor entre el fluido que circula por el interior de los tubos, y la carcasa. Los tubos pueden ser completos o soldados y generalmente están hechos

de cobre o aleaciones de acero. Otras aleaciones de níquel, titanio o aluminio pueden ser requeridas para aplicaciones específicas.

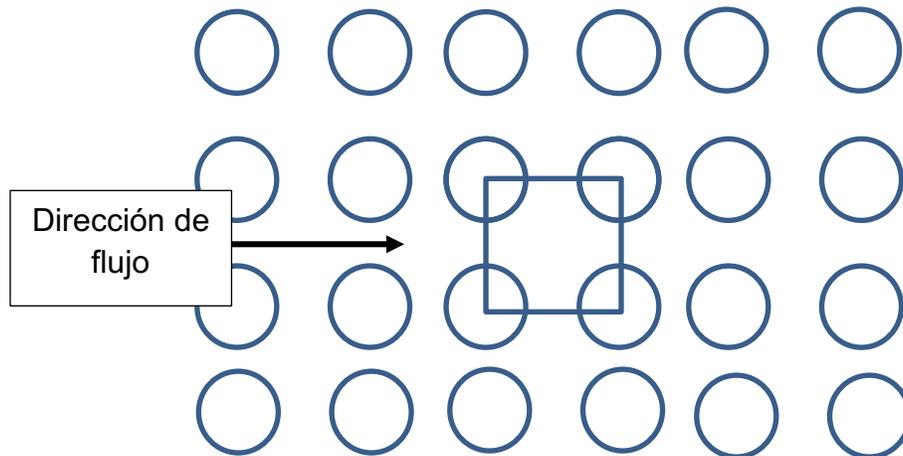
Los tubos pueden ser desnudos o aleteados. Las superficies extendidas se usan cuando uno de los fluidos tiene un coeficiente de transferencia de calor mucho menor que el otro fluido. Los tubos doblemente aleteados pueden mejorar aún más la eficiencia. Las aletas proveen de dos a cuatro veces el área de transferencia de calor que proporcionaría el tubo desnudo. La cantidad de pasos por los tubos y por la carcasa dependen de la caída de presión disponible. A mayores velocidades, aumentan los coeficientes de transferencia de calor, pero también las pérdidas por fricción y la erosión en los materiales.

Los tubos pueden presentar diferentes distribuciones:

- Ajuste cuadrado. Esta configuración permite una mejor limpieza de los tubos. También hace que haya una menor caída de presión a través de banco de tubos.
- Ajuste triangular. Se consigue una mayor superficie de transferencia de calor que con el ajuste cuadrado no se consigue. Si la distancia de centro a centro de los tubos es muy pequeña, no se puede limpiar.

Figura 55

Distribución de tubos cuadrado



Ajuste cuadrado girado. Las ventajas de esta distribución es la misma que el anterior.

Figura 56

Distribución de tubos cuadrado inclinado

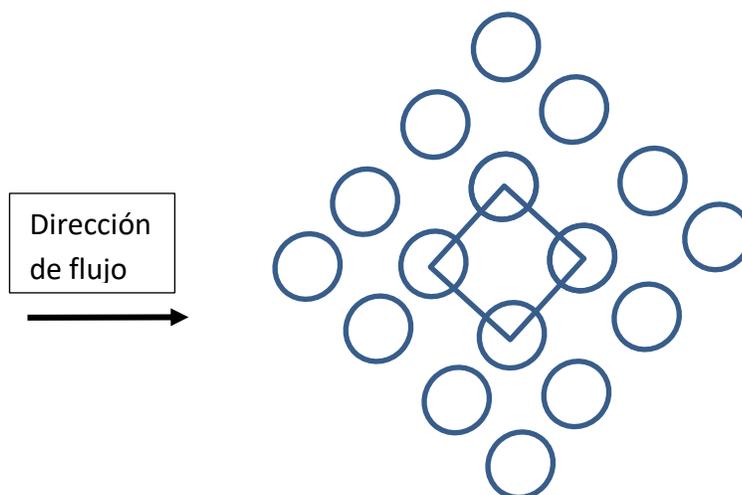
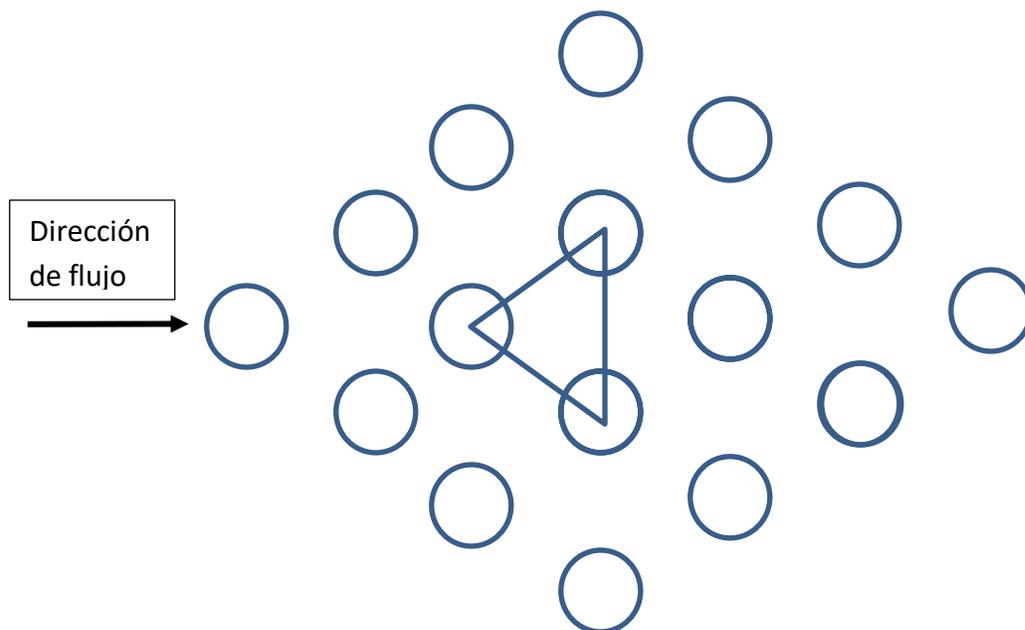


Figura 57

Distribución de tubos triangular



Placa tubular-Los tubos se mantienen en su lugar al ser insertados dentro de agujeros en la placa tubular, fijándose mediante expansión o soldadura. La placa tubular es generalmente una placa de metal sencilla que ha sido taladrada para albergar a los tubos (en el patrón deseado), las empacaduras y los pernos. En el caso de que se requiera una protección extra de las fugas puede utilizarse una doble placa tubular.

Deflectores-Hay dos tipos de deflectores, transversales y longitudinales. El propósito de los deflectores longitudinales es controlar la dirección general del flujo del lado de la carcasa. Los deflectores transversales tienen dos funciones, la más importante es la de mantener a los tubos en la posición adecuada durante la operación y evita la

vibración producida por los vórtices inducidos por el flujo. En segundo lugar, ellos guían al fluido del lado de la carcasa para acercarse en lo posible a las características del flujo cruzado. También tienen la función de hacer que el fluido que circula por la carcasa lo haga con mayor turbulencia para que aumente el coeficiente convectivo (o coeficiente de película) exterior de los tubos, es decir, para que aumente la cantidad de calor transferido.

Coraza y boquillas -La coraza es la envolvente del segundo fluido, y las boquillas son los puertos de entrada y salida. Esta generalmente es de sección circular y está hecha de una placa de acero conformado en forma cilíndrica y soldado longitudinalmente. Las corzasas de pequeños diámetros ($24 < \text{in}$) pueden ser construidos a partir de tubos comerciales del diámetro deseado.

La boquilla de entrada suele tener una placa justo debajo de ella para evitar que la corriente choque directamente a alta velocidad en el tope del haz de tubos. Ese impacto puede causar erosión, cavitación, y vibraciones. Con el objetivo de colocar esta placa y dejar suficiente espacio libre entre este y la carcasa para que la caída de presión no sea excesiva puede ser necesario omitir algunos tubos del patrón circular completo.

3.9.2 Objetivos

- Determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección teórica para cada fluido en el intercambiados en función de las condiciones experimentales.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador.

- Validar la metodología de cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para el intercambiador de tubos y corazas con datos experimentales.

3.9.3 Equipos e insumos

El laboratorio de térmicas de la Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con un banco de intercambiadores de calor que está constituido por 4 tipos de intercambiadores:

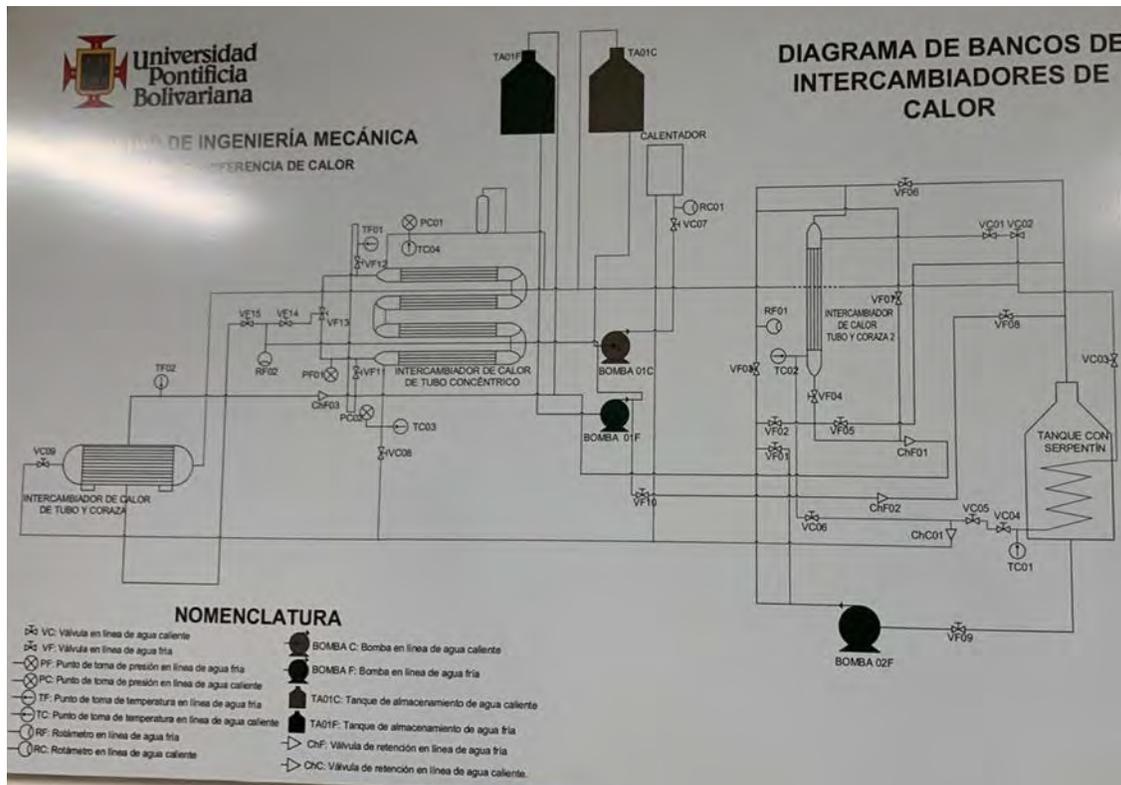
- I. Calor de tubo y coraza Horizontal
- I. Calor de tubo y coraza vertical
- I. Calor de tubo concéntrico
- I. Calor tipo serpentín

El sistema cuenta con dos líneas de fluido independientes, que puede ser alimentadas al banco y cada uno de los intercambiadores de calor de manera independiente (ver esquema) permitiendo el análisis de térmico del proceso de intercambio de calor entre dos fluidos

En la línea de alta temperatura (Tubería de color gris), fluye agua con una temperatura específica, controlada por medio de un sistema de calentamiento de tiro forzado. Con el que se permite controlar la temperatura del agua entre la temperatura ambiente y hasta una temperatura de 72°C. En la línea de baja temperatura (Tubería de color verde) fluye agua, que se mantiene a temperatura ambiente, por medio de un tanque de amortización que se encuentra en la parte externa del laboratorio.

Figura 58

Esquema de los Intercambiadores de calor del laboratorio de transferencia de calor



El intercambiador de tubos y coraza del laboratorio de térmicas está constituido por Coraza externa de acero A36 con diámetro nominal de 8.66142 in SCH 40 y 7 tubos de acero inoxidable de diámetro nominal 15/16 in, SCH 10s distribuidos radialmente (ver Figura 54), con tres baffles para mezclado de fluido externo. El intercambiador solo permite la evaluación de flujo de corriente, pues solo posee una configuración para el ingreso de agua fría y caliente. Las dimensiones detalladas del equipo son descritas en la **Tabla 8**.

Tabla 8

Dimensiones detalladas del equipo

	Diámetro nominal(cm)	SCH	Longitud(cm)	Área (in²)
Coraza	22	40	60	266.26
Tubos internos	2.38125	10s	44	110.22

Tabla 9

Propiedades térmicas del material del equipo.

Propiedades térmicas del equipo (acero a 36)	
Conductividad térmica	52.5 (w/(m*k))
Punto de fusión	3000 c
Dilatación	$11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Densidad	7850kg/ m ³
Capacidad calorífica	0.502 /kg -c

3.9.4 Procedimiento

- Se cierra la válvula VF10 para que el agua circule solo para nuestro sistema de tubería donde se encuentra el intercambiador de tubo y coraza.
- Posteriormente se tiene en cuenta que la válvula VF14 se encuentre cerrada y que la VF15 se encuentre abierta para que circule el fluido de agua fría hacia el intercambiador.

- Seguidamente se conecta la bomba que se encarga de impulsar el agua fría dentro de las tuberías.
- Se verifica en el rotámetro el caudal que se desea trabajar, el cual está entre las válvulas VF14 y VF15.
- Después de todo ese proceso se deja trabajando el agua fría solamente por unos minutos.

Para el agua caliente se realiza lo siguiente:

- Se cierra la válvula VC08 y se abre la válvula VC07 que permite el paso de agua al calentador, ya que este se enciende apenas siente el flujo de agua calentando el agua a diferentes temperaturas, cabe aclarar que este calentador se le pueden controlar el flujo de agua que ingresa y también la intensidad de la llama y además tener en cuenta que dicho calentador se apaga por protección a los 70 °C debido al material del sistema de tuberías que tiene.
- Se abre la válvula VC09 que la permite la entrada del flujo al intercambiador de tubo y coraza.
- Se conecta la bomba de agua caliente para que comience a circular el agua en todo nuestro sistema de tuberías.

Figura 59

Flujómetros del banco de intercambiadores de calor a) línea de baja temperatura y b) línea de alta temperatura



a)



b)

3.9.5 Informe

- Reporte los datos de operación; flujos volumétricos de las dos líneas y temperaturas alcanzadas en estado estable
- Presente una metodología para la estimación de coeficientes de transferencia de calor por convección para la corriente de alta y baja temperatura en función de las condiciones operacionales medidas
- Estime el coeficiente global de transferencia, característico del intercambiador bajo las condiciones operacionales medidas.

- Prediga el comportamiento del intercambiador de calor en condiciones de co-corriente y contracorriente implementando el coeficiente global antes calculado.
- Valide los resultados teóricos vs los resultados experimentales y discuta.
- Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA(<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>) incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias

3.10 Práctica N° 10: Intercambiador de calor de tubos y coraza 2

3.10.1 Marco teórico

Intercambiador de calor de coraza y tubos

Este tipo de intercambiador se emplea en grandes aplicaciones industriales. Contienen un gran número de tubos empacados en un casco con sus ejes paralelos al de éste. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, por lo cual el otro se mueve por fuera de estos, pasando por el casco. Por lo general se emplean desviadores en el casco, lo cual fuerza al fluido a moverse en dirección transversal a dicho casco con el fin de mejorar la transferencia de calor, y también para mantener un espacio uniforme entre los tubos. En la **Figura 60** podemos observar este tipo de equipo:

Figura 60

Isométrico de intercambiador de calor de tubos y coraza 2



Sabemos que estos equipos son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclado. El intercambiador de calor de tubos y coraza o intercambiador de calor de tubo doble, se compone de dos tubos concéntricos de diámetros distintos, lo podemos observar en la Figura 60. Un fluido se desplaza por el tubo interno mientras otro lo hace en el espacio anular entre ambos tubos. El calor se transfiere del fluido caliente al frío a través de la pared que los separa. Están diseñados para la transferencia de calor entre dos fluidos dentro del dispositivo, por lo que normalmente la coraza externa está bien aislada para evitar cualquier pérdida de calor hacia el medio circundante [1].

Los Intercambiadores de calor de coraza y tubos son los más ampliamente utilizados en la Industria Química y con las consideraciones de diseño mejor definidas. Consisten en una estructura de tubos pequeños colocados en el interior de un casco de mayor diámetro.

Características y aplicaciones

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos, son uno de los diseños más utilizados en la industria, ya que cuentan con una buena relación costo-eficiencia, se pueden fabricar dentro de un rango amplio de tamaños donde se puede variar el diámetro y/o el largo y la capacidad, se pueden elaborar en diferentes materiales, flexibilidad, instalación (vertical u horizontal), fácil mantenimiento y reparación, facilidad instalación, es decir se pueden adaptar a las necesidades de la industria. En los intercambiadores

de calor de coraza y tubos se presentan algunas aplicaciones, las cuales se ven reflejadas en los diversos usos como lo son: condensación, el enfriar aceite en sistemas de lubricación o hidráulicos y transformadores eléctricos, ayuda a calentar combustóleo en tanques de almacenamiento, en fosas de recepción y estaciones de bombeo, para enfriar aire como Post-enfriadores de compresos de aire (after - coolers), en la condensación de refrigerantes, en los intercambiadores de calor para procesos químicos y/o petroquímicos, en los Chillers que son Intercambiadores de calor que enfrían agua con gas refrigerante para unidades de agua helada, en los Inter – Enfriadores y Post – Enfriadores para compresores Atlas Copco, en los Inter – enfriadores y Post – Enfriadores para compresores Ingellson Rand. Además de tener muchas combinaciones con diferentes fluidos como: el vapor con el agua, el aceite con el agua, el vapor con combustóleo, el aire con agua, refrigerante y agua, entre otros.

3.10.2 Objetivos

- Determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección teórica para cada fluido en el intercambiados en función de las condiciones experimentales.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador.
- Validar la metodología de cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para el intercambiador de tubos y corazas con datos experimentales.

3.10.3 Equipos e insumos

El laboratorio de térmicas de la Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con un banco de intercambiadores de calor que está constituido por 4 tipos de intercambiadores:

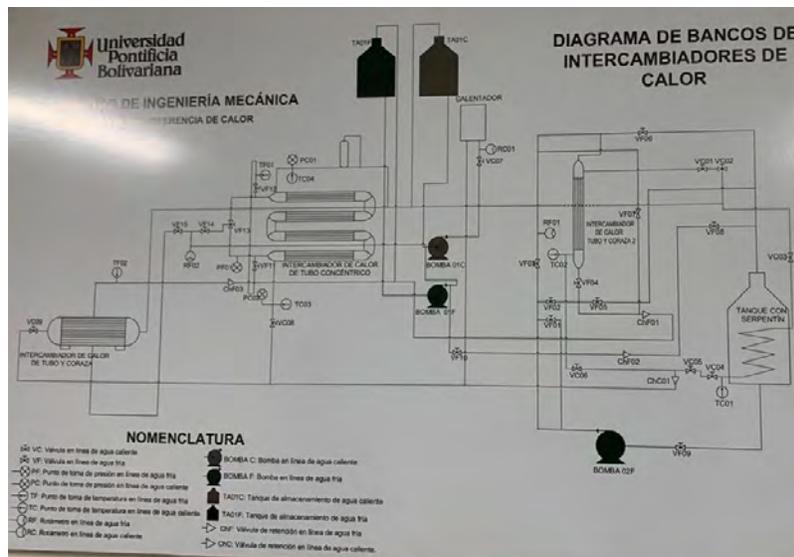
- I. Calor de tubo y coraza horizontal
- I. Calor de tubo y coraza vertical
- I. Calor de tubo concéntrico
- I. Calor tipo serpentín

Que permite el análisis de térmico del proceso de intercambio de calor entre dos fluidos. El sistema cuenta con dos líneas de fluido independientes, que puede ser alimentadas al banco y cada uno de los intercambiadores de calor de manera independiente (ver **Figura 61**).

En la línea de alta temperatura (Tubería de color gris), fluye agua con una temperatura específica, controlada por medio de un sistema de calentamiento de tiro forzado. Con el que se permite controlar la temperatura del agua entre la temperatura ambiente y hasta una temperatura de 72°C. En la línea de baja temperatura (Tubería de color verde) fluye agua, que se mantiene a temperatura ambiente, por medio de un tanque de amortización que se encuentra en la parte externa del laboratorio.

Figura 61

Esquema de los Intercambiadores de calor del laboratorio de transferencia de calor



El intercambiador de tubos y coraza del laboratorio de térmicas está constituido por Coraza externa de acero inoxidable con diámetro nominal de 2.5 in, AISI 316

(Fe/Cr18/Ni10/Mo3) y 24 tubos de acero inoxidable de diámetro nominal 0.1958 in sch distribuidos radialmente (Ver **Figura 60**), El intercambiador permite la evaluación de regímenes de flujo paralelo y contraflujo. Las dimensiones detalladas del equipo son descritas en la **Tabla 10**.

Tabla 10

Las dimensiones detalladas de intercambiador de tubos y coraza 2

Elemento	Pasos o número	Diámetro Nominal	sch	Longitud	Área In
Coraza	1	2.5 in	acero inoxidable AISI 316 (Fe/Cr18/Ni10/Mo3)	23.622	185.53in ²
Tubos	24	0.19685 in	acero 1020	23.622 in	28.94in ²

3.10.4 Procedimiento

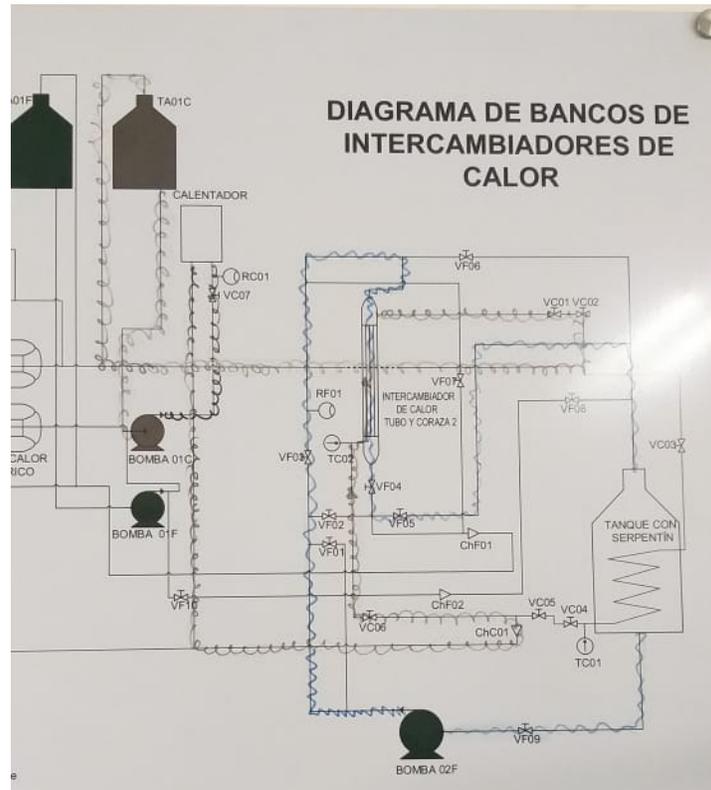
Configuración de la operación en contraflujo del intercambiador

- Inicialmente se cierra la válvula VF14 y VF15 para restringir el flujo a otras líneas y abrir la válvula VF10 y la VF08.
- Se ingresa agua al sistema de tuberías donde a través de la bomba 02F se llena el sistema tanque serpentín hasta el límite marcado.
- Una vez lleno apagar la bomba y cerrar las válvulas VF10 y la VF08.

- Se cierra la válvula VF01, VF02 y se abre la válvula VF03 Para poder pasar por el caudalímetro donde se mide el volumen de agua por instante de tiempo.
- Se cierra la válvula VF06 para que pueda pasar por el intercambiador de calor y refrigerar el agua caliente.
- Después se abre la válvula VF04, VF05 Para que pase por el tanque del Serpentín.
- Se abre la válvula VF09 y el agua otra vez retorna a la bomba 02F.
- Posteriormente, se enciende la bomba 01C que es la que introduce el agua caliente al sistema de tuberías, se abre la válvula VC07, Pasa por el caudalímetro RC01, después pasa por el calentador para aumentar su temperatura.
- Se cierra la válvula VC08, VC09, Se abre la válvula Chc01.
- Se abre la válvula VC06 y entra al intercambiador bajando su temperatura por la acción de refrigeración del agua fría.
- Asegúrese de que VC05 esté en dirección hacia VC06.
- Asegúrese que la válvula VC02 este en dirección de flujo hacia VC02 y que la válvula VC03 esté cerrada, para que el agua retorne al tanque TA01C y otra vez llega a la bomba 01C para seguir siendo calentada.

Figura 62

Diagrama del proceso de flujo contraflujo con el intercambiador de tubo y coraza 2



Configuración de la operación en flujo paralelo

- Se enciende la bomba 02F para ingresar agua al sistema de tuberías y se cierran las válvulas VF01, VF03.
- Se abre la válvula VF02 y se cierra VF05 y Chf01.
- Se abre la válvula VF04, el agua pasa por el intercambiador refrigerando el agua fría, se abre la válvula VF06 así el agua pasa por el serpentín, se abre la válvula VF09 y el agua retorna a la bomba e inicia otra vez el ciclo.

- Después, se prende la bomba 01C que es la que introduce el agua caliente al sistema de tuberías si abre la válvula VC07, pasa por el caudalímetro RC01, después pasa por el calentador para aumentar su temperatura.
- Se cierra la válvula VC08, VC09, asegúrese que la válvula VC05 este en dirección de flujo a VC06.
- Se abre la válvula VC06 y entra al intercambiador bajando su temperatura por la acción de refrigeración del agua fría.
- Se abren las válvulas VC01 y asegúrese que la válvula VC02 este en dirección de flujo a la válvula VC01, Cierra la válvula VC03 después el agua retorna al tanque TA01C, y otra vez llega a la bomba 01C para seguir siendo calentada.

Figura 63

Diagrama del proceso de flujo paralelo con el intercambiador de tubo y coraza 2



Figura 64

Flujómetros del banco de intercambiadores de calor a) línea de baja temperatura y b) línea de alta temperatura



a)



b)

3.10.5 Informe

- Reporte los datos de operación; flujos volumétricos de las dos líneas y temperaturas alcanzadas en estado estable.
- Presente una metodología para la estimación de coeficientes de transferencia de calor por convección para la corriente de alta y baja temperatura en función de las condiciones operacionales medidas.
- Estime el coeficiente global de transferencia, característico del intercambiador bajo las condiciones operacionales medidas.

- Prediga el comportamiento del intercambiador de calor en condiciones de co-corriente y contracorriente implementando el coeficiente global antes calculado.
- Valide los resultados teóricos vs los resultados experimentales y discuta.
- Los resultados de la prueba deben ser presentados en formato de presentación de artículo científico de máximo 5 páginas siguiendo el formato escrito de la revista DYNA

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/about/submissions#authorGuidelines>,
incluyendo las siguientes secciones:

- Abstract
- Introducción
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias

Referencias

Cengel and A. Ghajar (2011) *Transferencia de Calor y Masa - Cengel 4th*, 4 ed: Mc. Graw Hill.

Cengel, Yunus, and Michael Boles. (2006). *Termodinámica - Cengel 5th*. 5th ed: Mc. Graw Hill.

Autores

Diego Alejandro Camargo Trillos (Yopal, Casanare, Colombia, 1985)

Ph.D. en Ingeniería de Sistemas Energéticos e Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Colombia. Es Docente Asociado de la Universidad Pontificia Bolivariana. Ha publicado artículos en revistas especializadas, nacionales e internacionales, en el área de energía y nuevos materiales. Hace parte del grupo de Investigación en *Optimización de Procesos y Uso Racional de la Energía y Biomasa – OPUREB*.

diego.camargo@upb.edu.co.

Fernando Javier Calvo Silva (Barranquilla, Atlántico, Colombia, 1987)

Ph.D. en Ingeniería de la Universidad de los Andes e Ingeniero Químico de la Universidad del Atlántico. Es Docente Catedrático de la Universidad de los Andes. Ha publicado artículos en revistas especializadas, nacionales e internacionales, en el área de energía y nuevos materiales. Hace parte del grupo de *Diseño de Productos y Procesos – GDPP*.

fj.calvo@uniandes.edu.co

Rafael David Gómez Vásquez (Chinu, Córdoba, 1983)

Ph.D. en Ingeniería Mecánica e Ingeniero Mecánico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Es Docente Asociado en la Universidad Pontificia Bolivariana. Ha publicado artículos en revistas especializadas, nacionales e internacionales, en el área de energía y nuevos materiales. Hace parte del grupo de Investigación en *Optimización de Procesos y Uso Racional de la Energía y Biomasa – OPUREB*.

rafael.gomezv@upb.edu.co

Mario Andrés Palacio Vega (Montería, Córdoba, Colombia, 1993)

M.sc en Ingeniería Mecánica e Ingeniero Mecánico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Es Docente Asistente en la Universidad Pontificia Bolivariana. Ha publicado artículos en revistas especializadas, nacionales e internacionales, en el área de energía y nuevos materiales. Hace parte del grupo de investigación en *Optimización de Procesos y Uso Racional de la Energía y Biomasa – OPUREB*.

mario.palaciov@upb.edu.co

El presente documento busca orientar a los docentes y estudiantes de ingeniería en prácticas experimentales y simuladas que analizan la transformación de la energía en sus distintas formas. Se vivencia las propiedades de la materia como densidad, capacidad calorífica y conductividad y su efecto en el proceso de transformación de la energía. Así mismo se comparten guías técnicas para la evaluación de operaciones unitarias en el aprovechamiento de la energía, como lo son los intercambiadores de calor y sistemas solares fotovoltaicos.

This document seeks to guide engineering teachers and students in experimental and simulated practices that analyze energy transformation in its different forms. The properties of matter such as density, heat capacity, and conductivity are experienced although following their effect on the energy transformation process. Likewise, technical guides are shared for following and evaluating unit operations in the use of energy, such as heat exchangers and solar photovoltaic systems.

Colección Textos Académicos

978-958-722-916-5



Editorial UTP