



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PROPUESTA PARA EL TEXTO PARALELO, VIRTUAL, DEL CURSO DE
TERMODINÁMICA 2**

Juan Carlos García Alvarado

Asesorado por el Ing. Walter Guillermo Castellanos Rojas

Guatemala, noviembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA EL TEXTO PARALELO, VIRTUAL, DEL CURSO DE
TERMODINÁMICA 2**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUAN CARLOS GARCÍA ALVARADO

ASESORADO POR EL ING. WALTER GUILLERMO CASTELLANOS ROJAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Julio César Molina Zaldaña
EXAMINADOR	Ing. Walter Guillermo Castellanos Rojas
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA PARA EL TEXTO PARALELO, VIRTUAL, DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 24 de octubre de 2010.

Juan Carlos García Alvarado

Guatemala, 27 de junio de 2011.

Ingeniero:

Julio César Campos Paiz

Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Julio Campos:

Atentamente me dirijo a usted deseándole éxitos en sus actividades, hago de su conocimiento que el trabajo de graduación titulado **“PROPUESTA PARA EL TEXTO PARALELO, VIRTUAL, DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2”**, realizado por el estudiante Juan Carlos García Alvarado, identificado con el número de carné 1998-10883, ha sido revisado y aprobado por mi persona.

Sin otro particular, se suscribe de usted

Atentamente,



Ing. Walter Guillermo Castellanos Rojas

Colegiado No. 8522

Walter Guillermo Castellanos Rojas
INGENIERO MECÁNICO
COLEGIADO No. 8522



El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado PROPUESTA PARA EL TEXTO PARALELO, VIRTUAL, DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2, del estudiante Juan Carlos García Alvarado, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Molina Zaldaña
Coordinador de Área



Guatemala, julio de 2011.

/behdei.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria al Trabajo de Graduación titulado PROPUESTA PARA EL TEXTO PARALELO, VIRTUAL, DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2, del estudiante Juan Carlos García Alvarado, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Julio', written over a vertical line.

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, noviembre de 2012

JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA PARA EL TEXTO PARALELO, VIRTUAL, DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Carlos García Alvarado**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Decano en funciones

Guatemala, 16 de noviembre de 2012

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Que me regalo la oportunidad de vivir y una maravillosa familia.
- Mi madre** Por todo el amor y apoyo incondicional que recibí desde el inicio de mis estudios y la confianza de creer en mí para llegar a cumplir un sueño que empezó un día dándome la oportunidad de estudio.
- Mi esposa** Por ser una fuente de motivación e inspiración en estos últimos años de mi vida para poder lograr esta meta.
- Mi hijo** Por ser mi razón de vivir y superarme.
- Mis hermanos** Por sus consejos y por compartir este éxito conmigo. En especial a mi hermano Osman por ser un ejemplo a seguir y por su apoyo incondicional durante toda mi vida, para que yo lograra alcanzar esta meta.
- Mis tíos** Gonzalo y Cony, por haberme apoyado y albergado en su casa como un hijo más, durante mis años de estudio universitario.
- Mi familia** Por el apoyo incondicional durante mis estudios.

Mis amigos

A los que han pasado y a los que se han quedado,
porque todos ustedes son parte de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por haberme albergado durante mis años de estudios en tan gloriosa casa de estudios.

Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Por darme la oportunidad de prepararme profesionalmente y participar durante mi formación académica.

Cada una de las personas que hicieron posible este trabajo de graduación Por guiarme durante el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. PROGRAMA DEL CURSO	1
1.1. Objetivo del curso	1
1.1.1. Objetivo específico	1
1.2. Contenido programático	1
1.2.1. Ciclo de potencia	2
1.2.2. Mezcla de gases y vapores	2
1.2.3. Aspectos termodinámicos del flujo de fluidos	3
2. CICLOS DE POTENCIA	5
2.1. Ciclos de vapor	9
2.1.1. Rankine simple	10
2.1.2. Rankine sobrecalentado	20
2.1.3. Rankine recalentado	24
2.1.4. Rankine regenerativo	28
2.2. Ciclo de aire	33
2.2.1. Ciclo Otto	35
2.2.2. Ciclo Diesel	40
2.2.3. Ciclo Brayton	48

2.2.4.	Ciclo de refrigeración	56
3.	MEZCLA DE GASES Y VAPORES.....	67
3.1.	Leyes termodinámicas.....	71
3.2.	Mezcla de gases ideales con un vapor condensable	76
3.3.	Propiedades del aire atmosférico	78
4.	PRINCIPIOS DE COMBUSTIÓN	79
4.1.	Ecuación química de la combustión	81
4.2.	Poder calorífico de los combustibles	83
4.3.	Calor de la combustión.....	84
4.4.	Temperatura teórica de la flama.....	87
5.	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	91
5.1.	Introducción.....	91
5.2.	Transferencia por conducción	98
5.2.1.	Ecuación general	103
5.2.2.	Pared plana	106
5.2.3.	Sistemas radiales	107
5.2.4.	Resistencia en paredes en serie	112
5.3.	Transferencia por convección.....	115
5.3.1.	Ecuación general	116
5.3.2.	Condiciones de contorno	116
5.3.3.	Coeficiente global de transferencia	125
5.3.4.	Aislamiento térmico.....	129
5.4.	Transferencia por radiación.....	132
5.4.1.	Ecuación general	133
5.4.2.	Intercambio por radiación.....	133
5.4.2.1.	Cuerpos negros.....	135
5.4.2.2.	Cuerpo gris	138

5.5. Intercambiadores de calor	139
CONCLUSIONES	143
RECOMENDACIONES	145
BIBLIOGRAFÍA.....	147

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diferencia entre un ciclo real y un ciclo ideal	6
2.	La representación gráfica del ciclo de Carnot en un diagrama P-v	10
3.	Ciclo de Rankine simple e idealizado	11
4.	Diagrama P-V de un ciclo de Rankine simple e idealizado	12
5.	Efecto de la presión en el ciclo de Rankine simple	16
6.	Ciclo modificado de Rankine simple	17
7.	Diagrama temperatura-entropía	18
8.	Diagrama de Máquinas	18
9.	Rankine sobrecalentado	22
10.	Diagrama T-s	25
11.	Trabajo real de bomba	27
12.	Ciclo regenerativo	30
13.	Ciclo Otto	38
14.	Ciclo Diesel	46
15.	Ciclo Bryton	50
16.	Ciclo de Refrigeración	64
17.	Transferencia de calor en paredes en serie	114
18.	Transferencia de calor en paredes en paralelo	114

TABLAS

I.	Temperatura, entalpía y entropía	26
II.	Propiedades del aire	31

III.	Propiedades del aire	51
IV.	Propiedades del aire	52
V.	Entropía y entalpía R-134 ^a	65
VI.	Entalpía y presión	66

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
hi	Altura medida desde un nivel de referencia hasta un punto deseado.
H	Altura neta
x	Calidad de vapor
Q	Calor
Cp	Calor específico a presión constante
Cv	Calor específico a volumen constante
Q	Caudal en m ³ /min
ρ	Densidad del agua, en kg / m ³
Δ	Diferencial
η	Eficiencia
Ec	Energía cinética
E	Energía en forma general
Eh	Energía hidráulica
u	Energía interna
Ep	Energía potencial
h	Entalpia
S	Entropía
γ	Peso específico del agua, N/m ³
P	Presión
r	Relación de compresiones
T	Temperatura
W	Trabajo

Wb	Trabajo de bomba
Wt	Trabajo de turbina
π	Valor de pi = 3.1416
V	Volumen
V	Volumen en m ³

GLOSARIO

Adiabático	Se dice al recinto cuyo interior y exterior no es posible el intercambio térmico.
Bomba	Máquina para elevar el agua u otro líquido y darle impulso en una dirección determinada.
Caldera	Recipiente metálico cerrado que se emplea para calentar o evaporar líquidos.
Condensador	Recipiente que tienen algunas máquinas de vapor para que éste se licúe en él por la acción del agua fría.
Cuasiestático	Sistema que se mantiene oscilante entre dos vapores y se asume un valor fijo para comprender su naturaleza.
Eficiencia	La cantidad de energía que es aprovechada en relación a la cantidad de entrada con la salida.
Entalpia	Magnitud termodinámica de un cuerpo, igual a la suma de energía interna más el producto de volumen por la presión exterior.

Entropía	Magnitud termodinámica que mide la parte no utilizable de la energía contenida en un sistema.
Flujo	Acción y efecto de fluir.
Isotérmico	Se dice del proceso en que la temperatura permanece constante.
Isobárico	Se dice el proceso en que la presión permanece constante.
Isovolumétrico	Se dice del proceso en que el volumen permanece constante.
Isoentrópico	Se dice del proceso en que la entropía permanece constante.
Radiación	Energía ondulatoria o partículas materiales que se propagan a través del espacio.
Turbina	Rueda hidráulica, con paletas curvas colocadas en su periferia, que recibe el agua por el centro y la despide en dirección tangente a la circunferencia, con lo cual aprovecha la mayor parte de la fuerza motriz.

RESUMEN

Este proyecto va encaminado a solucionar la necesidad existente de una guía práctica del curso de Termodinámica 2, debido a que los objetivos de éste son muy dispersos y que la información obtenida en los sistemas de datos son muy escasos o especializados en un sólo tema, además sus pilares se basan en recopilación de experiencias de ingenieros de mucha experiencia en el tema, con problemas resueltos y viables, teniendo como finalidad absoluta ser una herramienta total para resolver todas las dudas, problemas o contenidos inconclusos dentro de los estudiantes del de este curso.

Con esta propuesta para el texto paralelo, virtual, del curso de Termodinámica 2, se solucionaría los problemas por falta de infraestructura dentro del campus central, debido a que al colocarlo en una plataforma virtual cualquier persona puede acceder a esta información, incluso en la comodidad de su casa y comprender perfectamente el contenido de dicho curso.

OBJETIVOS

General

Proponer un texto paralelo para el curso de Termodinámica 2, capaz de sufragar todas las inquietudes de los alumnos que reciben este curso, así como introducirlos a las nuevas tendencias de clases virtuales o clases en línea.

Específicos

1. Brindar apoyo escrito a los alumnos del curso de Termodinámica 2, en forma clara y concisa, además de proveerles ejercicios prácticos para un mejor entendimiento de los puntos programáticos del curso, basado en el programa de estudio establecido por la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala.
2. Proporcionar una herramienta primaria para solucionar las dudas generadas en el curso de Termodinámica 2, recopiladas en un entorno propio y natural.
3. Proponer una base lógica en la guía del curso de Termodinámica 2, en forma digital para las nuevas oportunidades en plataformas de páginas de Internet, como la de la Facultad de Ingeniería, principalmente en la de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con ello generar nuevas tendencias educativas, como son los cursos virtuales.

INTRODUCCIÓN

La presente propuesta de texto paralelo para el curso de Termodinámica 2, ha sido formulada con la finalidad de integrar una herramienta sustanciosa en el tema de Termodinámica y las formas de transferencias de energía, que es una necesidad ineludible, si se quiere asegurar la calidad y la eficiencia dentro la industria y los campos de producción, es altamente viable con una aplicación práctica que beneficiará ineludiblemente a los estudiantes del curso mencionado.

La eficiencia es una medida de valor agregado de los servicios integrados de producción limpia, ya que se debe orientar, no sólo a la conservación del ambiente, sino también de implementar procesos de mejoras continuas en la eficiencia de equipos y el entorno, debe conceptualizarse como una inversión, no como un gasto financiero sin retorno, la condición fundamental es crear una necesidad para asegurar la calidad y la competitividad, radicando especialmente en la alta dirección general y administrativa, como se describe a detalle en esta guía de estudio.

En su contexto se encuentran los nuevos parámetros propuestos para el curso de Termodinámica 2, en tal sentido, se presenta un todo, de los ciclos, procesos y control de los gastos másicos, logrando criterios aceptables en la toma de decisiones de factibilidad térmica, basado en sistemas modernos de control, implementación y aseguramiento de funcionalidad, para complementar las nuevas propuestas de producción de energía, con medios eficaces donde el estudiante podrá asegurar la eficacia y competitividad dentro del área de

producción, proporcionando los aportes, observaciones y comentarios que apunten a mejorar la planificación de los procesos.

1. PROGRAMA DEL CURSO

Este es el actual programa para el curso de Termodinámica 2, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad San Carlos de Guatemala, el cual describiremos a continuación.

1.1. Objetivo del curso

Proporcionar al alumno los conocimientos teóricos-básicos para el cálculo de fenómenos de transformación de energía en los procesos cuyo destino implica el beneficio directo de la humanidad mediante aplicaciones de la ingeniería.

1.1.1. Objetivo específico

Que el alumno pueda calcular los fenómenos que tienen lugar en motores de combustión interna, calderas, equipos de refrigeración y aire acondicionado y otros equipos utilizados en la industria.

1.2. Contenido programático

Este es el contenido programático que aparece en el actual programa del curso de Termodinámica 2, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala.

1.2.1. Ciclo de potencia

- De vapor
- De aire
- De refrigeración

1.2.2. Mezcla de gases y vapores

- Leyes termodinámicas
- Mezcla de gases ideales con un vapor condensable
- Propiedades del aire atmosférico
- Principios de combustión
- Ecuación química de la combustión
- Poder calorífico de los combustibles
- Calor de combustión
- Temperatura teórica de flama
- Transferencia de calor
- Introducción a conducción, convección y radiación
- Conducción
- Ecuación general
- Pared plana
- Sistemas radiales
- Resistencia de paredes en serie
- Convección
- Ecuación general
- Condiciones de contorno
- Coeficiente global de transferencias
- Aislantes térmicos

- Radiación
- Propiedades y definiciones
- Diferencia media de temperatura
- Cálculo de transferencia de calor

1.2.3. Aspectos termodinámicos del flujo de fluidos

- Velocidad del sonido
- Flujo isentrópico
- Condiciones de choque normal

2. CICLOS DE POTENCIA

Los ciclos de potencia de gas o dispositivos cíclicos generadores de potencia revisten de gran importancia en el estudio de la termodinámica, ya que varios sistemas y máquinas se basan en su funcionamiento. Los modernos motores automotrices, camiones, barcos, turbinas de gas, son ejemplo de aplicaciones extremadamente útiles de estos procesos.

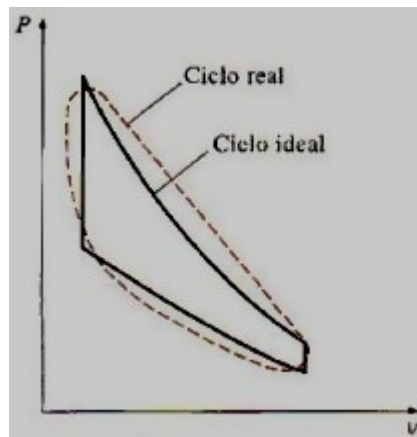
Los motores endotérmicos son máquinas motrices cíclicas en las que la energía interna que posee un fluido se transforma parcialmente en energía mecánica, dicho fluido es el medio al que se le proporciona o sustrae en adecuados puntos del ciclo operativo. Los dispositivos que se utilizan se llaman generalmente motores o máquinas térmicas y los ciclos termodinámicos en los que operan se llaman ciclos de potencia. Los ciclos termodinámicos se pueden, también, clasificar como ciclos de gas y de vapor, dependiendo de la fase del fluido de trabajo.

La mayor parte de los dispositivos de potencia operan en ciclos y el estudio de los ciclos de potencia es una parte importante e interesante de la termodinámica. Los ciclos que se llevan a cabo en los dispositivos reales son difíciles de analizar debido a la presencia de efectos complicados, como la fricción y la falta de tiempo suficiente, para establecer las condiciones de equilibrio durante el ciclo.

Para que sea factible el estudio analítico de un ciclo, es necesario mantener estas complejidades en un nivel manejable y utilizar estas idealizaciones, cuando al ciclo ideal se le eliminan todas las irreversibilidades y complejidades

internas, se consigue finalmente un ciclo que se parece, en gran medida al real, pero que está formado en su totalidad de procesos internamente reversibles, el cual es llamado ciclo ideal.

Figura 1. **Diferencia entre un ciclo real y un ciclo ideal**



Fuente: YUNUS A., Cengel. Termodinámica. México: McGraw-Hill, 2009. 568 p.

Ignorar los cambios de las energías cinética y potencial del fluido de trabajo es otra simplificación, comúnmente empleada en el análisis de ciclos de potencia.

La eficiencia de un ciclo en una máquina térmica, depende en gran medida de cómo se ejecutan los procesos individuales que integran el ciclo, el trabajo neto, por consiguiente la eficiencia del ciclo, puede maximizarse al utilizar procesos que requieran la menor cantidad de trabajo y entreguen la mayor, es decir, empleando procesos reversibles, por lo tanto no es una sorpresa que los ciclos más eficientes sean reversibles, compuestos; por completo de procesos reversibles. Los ciclos reversibles no pueden alcanzarse

en la práctica debido a que las irreversibilidades asociadas con cada proceso no pueden eliminarse.

Es conveniente recordar que en determinadas máquinas, la sustancia de trabajo no regresa a su estado original, una ilustración muy clara de esto es cualquier motor de gasolina o diesel; en la etapa final del ciclo los gases de la combustión salen por la válvula de escape, entonces no se realiza el ciclo termodinámico propiamente dicho, para los fines prácticos, la nueva inyección del fluido de trabajo se utiliza como el retorno al punto de partida.

Si se consideran máquinas térmicas operando entre dos depósitos de calor que tienen temperaturas diferentes, se pueden extraer dos conclusiones sobre las máquinas reversibles e irreversibles que se conocen como principios de Carnot:

- La eficiencia de una máquina irreversible siempre será menor que la de la máquina reversible.
- Dos máquinas operando entre depósitos de iguales y temperaturas diferentes tendrán la misma eficiencia.

Para estudiar los ciclos de potencia es conveniente utilizar esquemas o diagramas de bloque y los diagramas: presión-volumen o temperatura-entropía. Los esquemas ayudarán a visualizar los elementos físicos del proceso y las variaciones en el estado del fluido de trabajo. Los diagramas de presión-volumen y temperatura-entropía, mostrarán los cambios en estas variables en cada parte del ciclo. Los diagramas temperatura-entropía, son particularmente útiles para comprender los intercambios de calor, valorar irreversibilidades y comparar con los ciclos de Carnot correspondientes, además, el área encerrada

dentro de un ciclo representa el calor intercambiados con el exterior en el ciclo en cada parte de este; recordando el cálculo integral, esto se debe a que si la evolución es reversible, se cumple que el diferencial de calor es igual al diferencial de la entropía por una temperatura dada.

Las máquinas de combustión interna utilizan los productos de combustión en la expansión, son dispositivos que producen trabajo mecánico y que no operan en un ciclo termodinámico: el combustible se dispersa finamente con los inyectores en la cámara de combustión y se quema, se produce un aumento de volumen al producirse gases en la presión y la temperatura aumenta bruscamente, esa presión se emplea:

- Directamente en la expansión, motores alternativos: ciclo de Otto (encendido chispa) y ciclo de diesel (encendido compresión).
- Transformado en energía cinética para mover una turbina: ciclo de Brayton (motores de turbina de gas).

Motores de encendido de chispa: la mezcla aire-combustible se comprime hasta una temperatura inferior a la temperatura de autoencendido del combustible, y el proceso de combustión comienza al encender una bujía.

Motores de encendido por compresión: el aire se comprime hasta una temperatura superior a la de autoencendido del combustible, y la combustión se inicia al contacto, cuando el combustible se inyecta dentro de ese aire caliente.

Los ciclos de potencia de gases reales son bastante complejos, las suposiciones de aire estándar permiten simplificar considerablemente el análisis de las máquinas de combustión interna, sin apartarse significativamente de los

ciclos reales, permite estudiar de forma cualitativa la influencia de los parámetros principales de las máquinas reales.

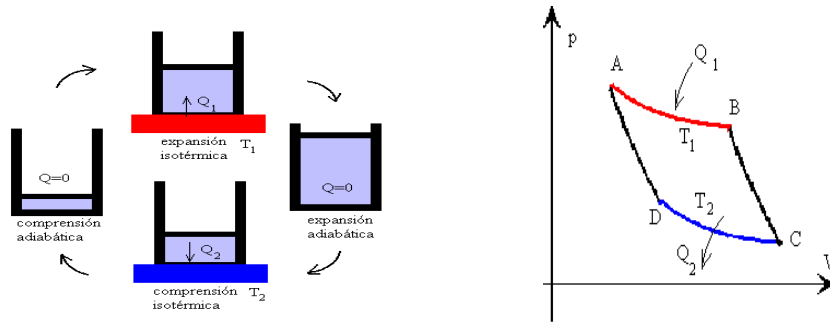
Suposiciones de aire estándar:

- El fluido de trabajo es aire que circula de modo continuo en un circuito cerrado y se comporta como un gas ideal.
- Todos los procesos que integran el ciclo son reversibles.
- El proceso de combustión es sustituido por un proceso de adición de calor desde una fuente externa.
- El proceso de escape es sustituido por un proceso de rechazo de calor que devuelve al fluido su estado inicial, para simplificar más el análisis, se supone que el aire tiene calor específico constante e igual al de temperatura ambiente

2.1. Ciclos de vapor

Se define ciclo de vapor como un proceso cíclico reversible que utiliza un gas perfecto, y que consta de dos transformaciones isotérmicas y dos adiabáticas.

Figura 2. **La representación gráfica del ciclo de Carnot en un diagrama P-v**



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 438 p.

En cualquier ciclo, se debe obtener, a partir de los datos iniciales lo siguiente:

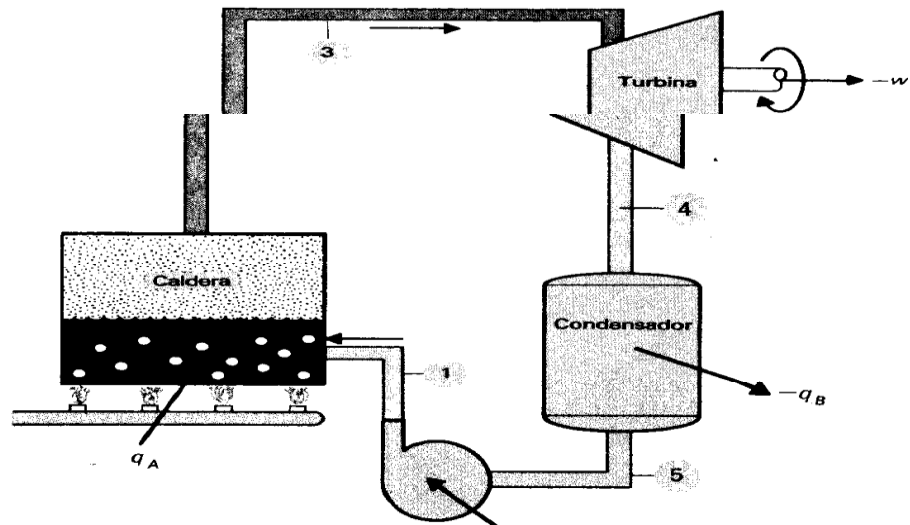
- La presión y volumen de cada uno de los vértices.
- El trabajo, el calor y la variación de energía interna en cada una de los procesos.
- El trabajo total, el calor absorbido, el calor cedido y el rendimiento del ciclo.

2.1.1. Rankine simple

El Rankine simple es el ciclo que comúnmente emplean todas las plantas generadoras de potencia con vapor. Este ciclo se concibe como un recurso para emplear las características del agua como fluido de trabajo y manejar el cambio de fase entre el líquido y el vapor. Naturalmente resulta posible usar muchas otras sustancias como fluidos de trabajo, en lugar del agua; la elección depende de varios factores, incluyendo la necesidad de

ajustar las temperaturas de transferencia de calor a los estados de vapor y líquido, en tanto que se mantienen bajas las presiones de vapor en el sistema.

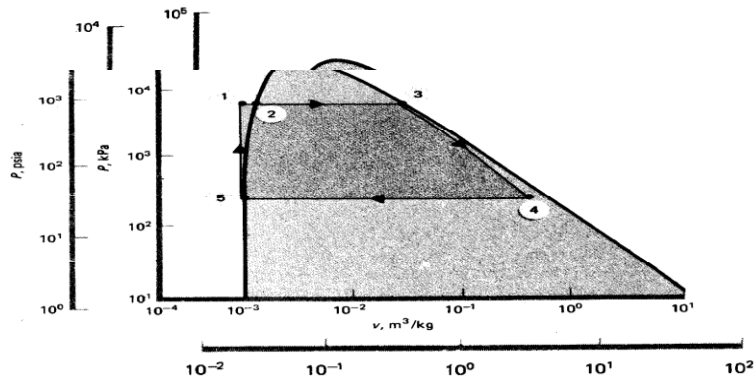
Figura 3. **Ciclo de Rankine simple e idealizado**



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 601 p.

La transferencia de calor en la caldera tiene lugar hacia el fluido de trabajo, en un proceso a presión constante. Se presenta el diagrama $P - v$, en la figura 4.

Figura 4. Diagrama P-V de un ciclo de Rankine simple e idealizado



Fuente: YUNUS A., Cengel. Termodinámica. México: McGraw-Hill, 2009. 562 p.

El líquido entra a la caldera desde la bomba, a una temperatura relativamente baja (estado 1), y se calienta hasta saturación a lo largo de la línea 1 - 2. El líquido experimenta un ligero aumento de volumen debido a la expansión térmica. En el punto 2 se ha alcanzado la temperatura de saturación.

Como la caldera opera efectivamente a presión constante, una transferencia de calor posterior tiene lugar a temperatura constante y la energía agregada al fluido de trabajo se transforma en calor de vaporización, produciendo un vapor que llega a tener una calidad del 100% en el punto 3. Entonces, el vapor se expande (en un proceso que se considera isentrópico para el ciclo simple), produciendo trabajo en la turbina, de donde sale al estado 4.

La expansión está limitada en el ciclo práctico por la aparición de condensación del vapor en la turbina y por la presión de saturación disponible a la temperatura del medio de enfriamiento empleado en el condensador. Si se permite que una condensación excesiva tenga lugar, las gotas del líquido condensado rápidamente erosionarían los álabes de la turbina. Al final del

proceso de expansión (estado 4), el vapor baja de temperatura, pero con calidad bastante alta, sale de la turbina y es condensado hasta líquido al ponerlo en contacto con las superficies del condensador, que están frías.

Puesto que el condensador opera casi a la temperatura del agua de enfriamiento, el proceso de condensación tiene lugar a una temperatura de ebullición por abajo de la normal (atmosférica) para muchos fluidos de trabajo. La presión del condensador en el lado del fluido de trabajo con frecuencia es subatmosférica. El líquido sale del condensador al estado 5. Después de la condensación, el líquido entra a la bomba y el fluido de trabajo regresa a la alta presión necesaria, para la adición de energía a la temperatura elevada de la caldera, repitiéndose el ciclo.

Debe observarse que el diagrama P - v empleado para representar el ciclo de Rankine tiene escalas logarítmicas; esto es necesario, porque la diferencia de los volúmenes específicos es del orden de diez mil unidades dentro del intervalo de presiones de interés en los ciclos de vapor. Sin embargo, tal gráfica disfraza grandemente el comportamiento P - v del agua con respecto a la presentación en un diagrama P - v lineal. Por ejemplo, en el diagrama lineal, la línea de líquido saturado es esencialmente vertical, en tanto que la línea de vapor saturado está muy curvada.

Para cualquier ciclo de Rankine la eficiencia se define como:

$$\eta_t = \frac{\text{Trabajo útil de salida por kg de fluido}}{\text{Energía suministrada por kg de fluido}}, \text{ o también } \eta_t = \frac{Q_e - Q_s}{Q_e}$$

El trabajo de salida del ciclo de la turbina puede ser determinado por las propiedades del fluido, aplicando la primera ley de la termodinámica a la turbina como un sistema abierto en estado estacionario.

$$\left[u_c + p_c v_c + \frac{V_c^2}{2} + z_c \right] + q = \left[u_d + p_d v_d + \frac{V_d^2}{2} + z_d \right] + W_t$$

Por definición, $u + pv$ es la entalpía específica h , considerando que el cambio de alturas a través de la turbina es insignificante, y que no existe transferencia de calor en la misma se tiene:

$$h_c + \frac{V_c^2}{2} = h_d + \frac{V_d^2}{2} + W_t$$

Normalmente, para plantas de potencia en régimen permanente, el cambio de energía cinética de la entrada a la salida puede ser ignorado; pero cuando esto no es así, se utiliza el término entalpía total o de estancamiento h_0 , es definida por:

$$h_0 = h + \frac{V_c^2}{2}$$

Cuando el cambio de energía cinética es despreciable, el trabajo de la turbina es:

$$W_t = h_c - h_d$$

y para la bomba será:

$$W_b = h_b - h_a.$$

Al considerar que el ciclo trabaja en estado estacionario y aplicando balance de masa y energía al ciclo, se tiene que la potencia desarrollada viene dada como:

$$W_{neta} = W_t - W_b = (h_c - h_d) - (h_b - h_a)$$

El rendimiento del ciclo resulta:

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neta}}{Q_e} = \frac{(h_c - h_d) - (h_b - h_a)}{(h_c - h_b)}$$

Es importante mencionar que el rendimiento del ciclo sin considerar directamente la eficiencia del generador de vapor, se conoce en las centrales como consumo térmico unitario (CTU) y puede estar dado en Kcal/KWh.

Si se considera la eficiencia de la caldera para determinar el rendimiento de la planta, puede ser representada como:

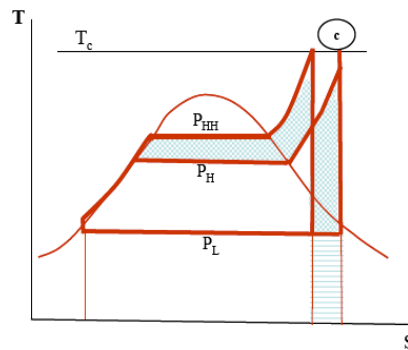
$$\eta_{ciclo\ caldera} = \frac{W_{neta}}{Q_e} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(PC * \dot{m}_g) \eta_{GV}} = \frac{\eta_{ciclo}}{\eta_{GV}}$$

Lo anterior se conoce como régimen térmico (RT), de la central termoeléctrica. La eficiencia del ciclo de Rankine simple, para un fluido de trabajo en particular, es afectada por las presiones de vaporización y condensación (vacío) y el grado de sobre calentamiento del fluido, y la eficiencia de la turbo máquina.

Para el vapor de agua, que se muestra en el diagrama T-s, las áreas que representan el trabajo realizado por el ciclo, prácticamente son las mismas para un incremento de presión. Sin embargo, el calor rechazado es obviamente

menor para el ciclo con una presión más alta, (P_{HH}), provocando que su eficiencia térmica sea más alta.

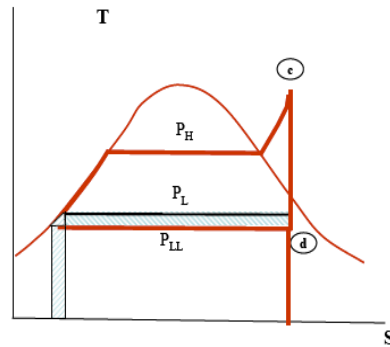
Figura 5. **Efecto de la presión en el ciclo de Rankine simple**



Fuente: YUNUS A., Cengel. Termodinámica. México: McGraw-Hill, 2009. 562 p.

El efecto de la presión del condensador se muestra en el diagrama T-s, el incremento del área que representa el trabajo realizado por el ciclo está muy cerca de ser la misma como el incremento del área que representa el calor suministrado, pero la relación $\frac{W_t}{Q_e}$, el cual representa la eficiencia térmica, que es incrementada.

Figura 6. **Ciclo modificado de Rankine simple**

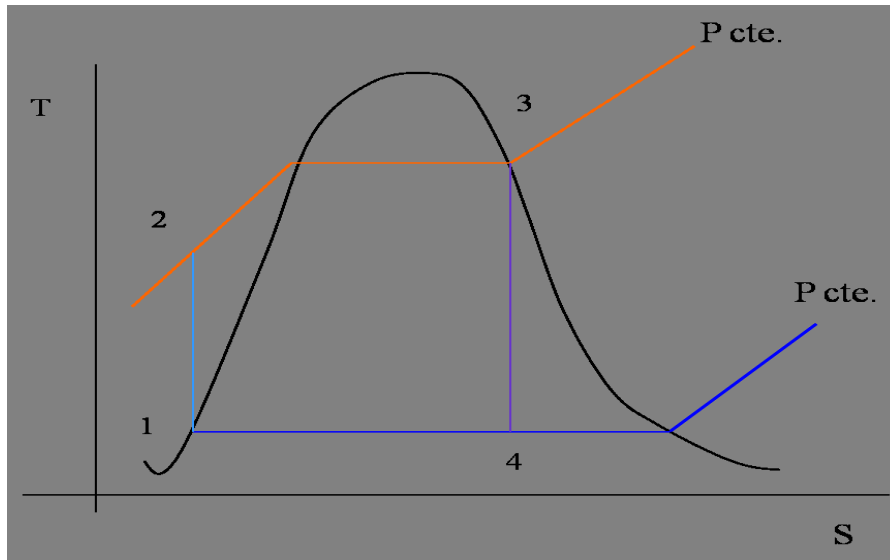


Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 563 p.

El ciclo de potencia analizado es muy sencillo, pero permite visualizar la forma de definir el rendimiento del mismo. Con el fin de lograr un mejor rendimiento del ciclo de potencia se hacen modificaciones, y se les conoce como ciclo modificado de Rankine.

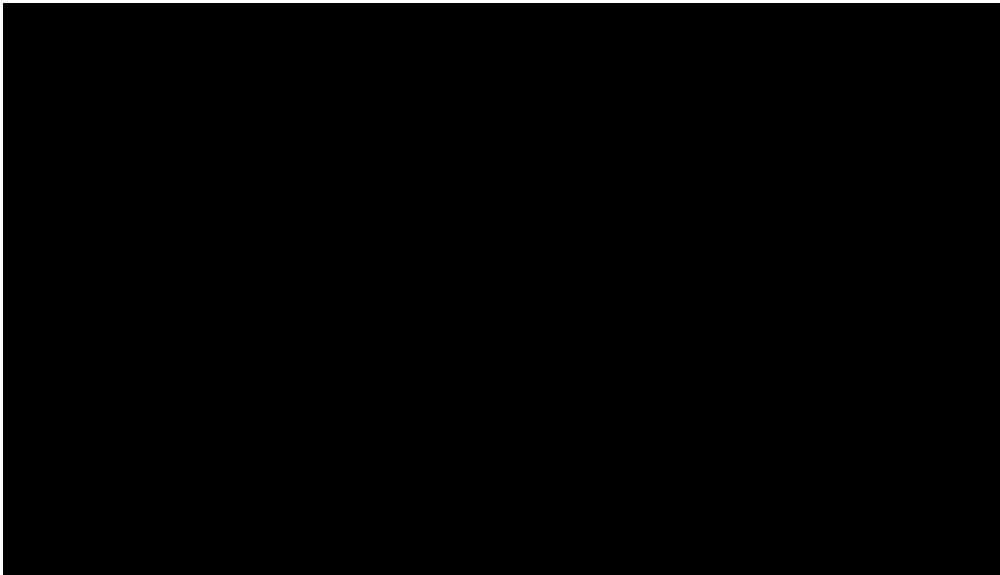
Considerar una central eléctrica de vapor que opera en el ciclo Rankine ideal simple. El vapor de agua entra a la turbina a 3 Mpa y 350 °C y es condensado a una presión de 75 kpa. Determinar la eficiencia térmica de este ciclo.

Figura 7. Diagrama temperatura-entropía



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 567 p.

Figura 8. Diagrama de Máquinas



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 567 p.

Se tiene una central eléctrica de vapor que opera en el ciclo Rankine ideal simple. Se determinará la eficiencia térmica del ciclo.

Suposiciones:

- Existen condiciones estacionarias de operación.
- Los cambios en la energía cinética y potencial son insignificantes.

Análisis: observar en los diagramas que la central opera en el ciclo Rankine ideal, por lo tanto la turbina y la bomba son isentrópicas, no hay caídas de presión en la caldera, ni en el condensador, el vapor sale de este último para entrar a la bomba como líquido saturado a la presión del condensador.

Primero se determinan las entalpías en varios puntos del ciclo, utilizando los datos de las tablas de vapor. (Tablas A – 4, A – 5 y A – 6).

Estado 1

$$P = 75 \text{ kPa (LS)} \quad h = h_f = 384,44 \text{ kJ/kg} \quad V = V_f = 0,001037 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Estado 2

$$P = 3 \text{ MPa} \quad S = S$$

$$W_{\text{bomba entrada}} = V_1(P_2 - P_1) =$$

$$W_{\text{bomba entrada}} = (0,001037) [(3\ 000 - 75)] (1 \text{ kJ} / 1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3)$$

$$W_{\text{bomba entrada}} = 3,03 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + W_{\text{bomba entrada}} = (384,44 + 3,03) = 387,47 \text{ kJ/kg}$$

Estado 3

$$P = 75 \text{ kPa (mezcla saturada)}$$

$$S_3 = S_4 \quad x = (S - S_f) / S_{fg} \quad x = (6,7450 - 1,2132)/6,2426$$

$$x = 0.8861$$

Estado 4

$$h = h_f + xh_{fg} \quad h = (384,44) + 0,8861 (2\,278,0) \quad h = 2\,403,0 \text{ kJ/kg}$$

Por lo tanto,

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad q_{in} = (3\,116,1 - 387,47) \text{ kJ/kg} \quad q_{in} = 2\,728,6 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{sale} = h_4 - h_1 \quad q_{sale} = (2\,403,0 - 387,44) \text{ kJ/kg} \quad q_{sale} = 2\,018,6 \text{ kJ/kg}$$

$$nt = 1 - (q_{sale}/q_{in})$$

$$nt = 1 - [(2\,018,6)/(2\,728,6)] \quad nt = 26\%$$

La eficiencia térmica también podría determinarse a partir de

$$W_{\text{turbina salida}} = h_4 - h_1 = (3\,116,1 - 2\,403,0) \text{ kJ/kg} = 713,1 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{neto}} = q_{in} - q_{sale} = (2\,728,6 - 2\,018,6) \text{ kJ/kg} = 710,0 \text{ kJ/kg}$$

$$nt = (W_{\text{neto}}/q_{in})$$

$$nt = [(710,0)/(2\,728,6)] \quad nt = 26\%$$

Es decir, esta central eléctrica convierte en trabajo neto 26% del calor que recibe de la caldera. Una central eléctrica real que opera entre los mismos límites de temperatura y presión, tendrá una eficiencia menor debido a irreversibilidades como la fricción.

2.1.2. Rankine sobrecalentado

La eficiencia del ciclo Rankine puede incrementarse aumentando la presión de operación en la caldera. Sin embargo, un aumento en la presión de operación de la caldera origina un mayor grado de humedad en los últimos pasos de la turbina. Este problema puede solucionarse haciendo uso de

recalentamiento, en donde el vapor a alta presión procedente de la caldera se expande sólo parcialmente en una parte de la turbina, para volver a ser recalentado en la caldera. Posteriormente, el vapor retorna a la turbina, en donde se expande hasta la presión del condensador. El ciclo Rankine con recalentamiento puede ayudar a elevar mínimamente la eficiencia del ciclo, pero se usa para alargar el tiempo de vida de la turbina. Idealmente se podría usar una cantidad infinita de recalentamientos para continuar elevando la eficiencia, pero en la práctica sólo se usan dos o tres, ya que la ganancia de trabajos es muy pequeña.

El ciclo Rankine recalentado usa una turbina de alta presión, una sección de recalentamiento en un generador de vapor, y una turbina de baja presión. Las eficiencias térmicas de los ciclos con regeneración suelen ser mayores que los ciclos Rankine simples.

En el ciclo, el vapor se expande desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador en dos etapas. El vapor se expansiona en una primera etapa de la turbina hasta una presión intermedia entre turbina y condensador, a continuación el vapor se extrae de la turbina y retorna otra vez a la caldera donde vuelve a calentarse en el recalentador, hasta alcanzar, aproximadamente, la temperatura del vapor vivo. Cuando ya está recalentado el vapor en la caldera se devuelve a la turbina a la misma presión que se extrajo.

Ejemplo:

Considere una central eléctrica de vapor que produce 300 MW. La central opera en un ciclo Rankine ideal sobrecalentado, con condiciones de entrada a la turbina de 5 MPa y 450 °C y una presión en el condensador de 25 kPa.

Determinar:

La eficiencia térmica de la central

El flujo másico requerido

Figura 9. Rankine sobrecalentado



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 577 p.

Estado 3

$$P_3 = 5 \text{ MPa}$$

$$T_3 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 3317,2 \text{ kJ/Kg}$$

$$S_3 = 6,8210 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{K}$$

Estado 4

$$P_4 = 25 \text{ MPa}$$

$$S_3 = S_4 = 6,8210 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{K}$$

$$S_4 = S_f + x S_{fg} \text{ (a } 25 \text{ kPa)}$$

$$6,8210 = 0,8932 + (6,9370)$$

$$X = 0,8545 \text{ o } 85,45\%$$

$$h_4 = h_f + x h_{fg} \text{ (a } 25 \text{ kPa)}$$

$$h_4 = 271,96 + (0,8545)(2345,5)$$

$$h_4 = 2276,1897 \text{ kJ/Kg}$$

Estado 1

$$P_1 = 25\text{MPa}$$

$$h_1 = h_f(a\ 25\ \text{kPa}) = 271,99\ \text{kJ/Kg}$$

Estado 2

$$P_2 = 5\text{MPa}$$

$$h_2 = h_1 + W_b$$

$$W_b = v_{f1} * \Delta P_{res}$$

$$W_b = 5,0745\ \text{kJ/Kg}$$

$$h_2 = 271,76 + 5,0745$$

$$h_3 = 277,0345\ \text{kJ/Kg}$$

$$q_{out} = h_4 - h_1$$

$$q_{out} = 2\ 276,189 - 271,96$$

$$q_{out} = 2\ 004,229\ \text{kJ/Kg}$$

$$q_{in} = h_3 - h_2$$

$$q_{in} = 3\ 317,2 - 277,034$$

$$q_{in} = 3\ 040,166\ \text{kJ/Kg}$$

- $\eta_t = 1 - (2\ 004,229 / 3\ 040,166)$

$$\eta_t = 0,3407$$

$$\eta_t = 34,07\ \%$$

- $\dot{m} = \dot{w}/w$

$$\dot{m} = 3\ 000 / (q_{in} - q_{out})$$

$$\dot{m} = 289\ 592,9$$

2.1.3. Rankine recalentado

La eficiencia del ciclo Rankine puede incrementarse también, aumentando la presión de operación en la caldera. Sin embargo, un aumento en la presión de operación de la caldera origina un mayor grado de humedad en los últimos pasos de la turbina. Este problema puede solucionarse haciendo uso de recalentamiento, en donde el vapor a alta presión procedente de la caldera se expande sólo parcialmente en una parte de la turbina, para volver a ser recalentado en la caldera.

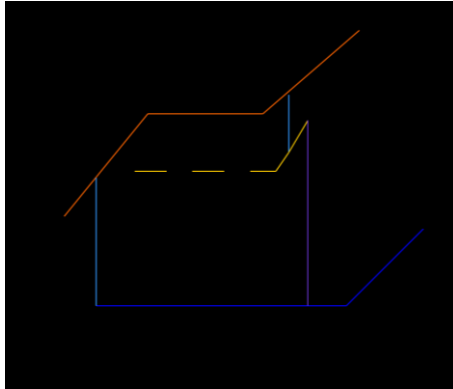
El ciclo Rankine con recalentamiento puede ayudar a elevar mínimamente la eficiencia del ciclo, pero se usa para alargar el tiempo de vida de la turbina. Idealmente podría usarse una cantidad infinita de recalentamientos para continuar elevando la eficiencia, pero en la práctica sólo se usan dos o tres, ya que la ganancia de trabajos es muy pequeña.

Ejemplo:

Un ciclo de vapor que utiliza 75 lbm/s, con presión y temperatura a la entrada de la turbina de 1600 psia y 1000 °F, se expande hasta 80 psia y se recalienta hasta 860 °F, la presión en el condensador es de 1 psia. Tomando en cuenta la eficiencia en la bomba de 75% y en la turbina de 80% para ambas etapas, se determina:

- Rendimiento térmico del sistema
- La potencia neta producida

Figura 10. Diagrama T-s



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw Hill, 2009. 571 p.

Estado 1

$$P = 1 \text{ psia}$$

$$h_1 = h_f = 69,74 \text{ Btu/lbm}$$

$$v_{f1} = 0,016 \text{ p}^3/\text{lbm}$$

$$W_b = v_{f1} (P_2 - P_1) \quad W_b = (0,016)(1\ 600 - 1) \quad W_b = 4,776776 \text{ Btu/lbm}$$

Estado 2

$$P = 1\ 600 \text{ psia} \quad h_2 = W_b + h_1$$

$$h_2 = 4,776776 + 69,74$$

$$h_2 = 74,5167 \text{ Btu/lbm}$$

Estado 3

$$P = 1\ 600 \text{ psia} \quad T = 1\ 000 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$h_3 = 1\ 487,1 \text{ Btu/lbm} \quad S_3 = 1,593 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R}$$

Estado 4

$$\begin{aligned}
 P &= 80\text{psia} & S_3 = S_4 &= 1,593 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} & S_g &= 1,6215 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} \\
 & & S_g &> S_3 \text{ (mezcla)} \\
 S_3 &= S_f + xS_{fg} & S_f &= 0,4534 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} & S_{fg} &= 1,1679 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} \\
 x &= (S_3 - S_f)/S_{fg} & x &= (1,593 - 0,4534)/1,1679 & x &= 0,97431 \\
 h_4 &= h_f + xh_{fg} & h_f &= 282,2 \text{ Btu/lbm} & h_{fg} &= 901,4 \text{ Btu/lbm} \\
 h_4 &= (282,2) + (0,97431)(901,4) & & & h_4 &= 1\ 160,434 \text{ Btu/lbm}
 \end{aligned}$$

Estado 5

$$\begin{aligned}
 P &= 80\text{psia} & T &= 860^\circ\text{F} \\
 h_4 &= 1\ 460,88 \text{ Btu/lbm} & s_4 &= 1,89322 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R}
 \end{aligned}$$

Tabla I. **Temperatura, entalpía y entropía.**

T	H	s
800	1430.4	1.3700
860	h3	s3
900	1481.2	1.9087

Fuente: elaboración propia.

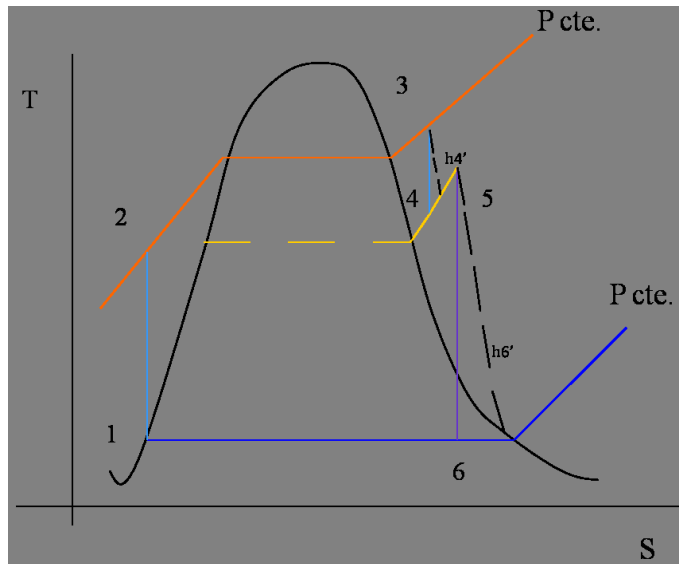
Estado 6

$$\begin{aligned}
 P &= 1\text{psia} & S_6 = S_4 &= 1,89322 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} & S_g &= 1,9779 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} \\
 & & S_g &> S_4 \text{ (mezcla)} \\
 S_4 &= S_f + xS_{fg} & S_f &= 0,1327 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} & S_{fg} &= 1,8453 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{R} \\
 x &= (S_4 - S_f)/S_{fg} & x &= (1,89322 - 0,1327)/1,8453 & x &= 0,954056 \\
 h_4 &= h_f + xh_{fg} & h_f &= 69,74 \text{ Btu/lbm} & h_{fg} &= 1\ 036,0 \text{ Btu/lbm} \\
 h_4 &= (282,2) + (0,97431)(901,4) & & & h_4 &= 1\ 058,142 \text{ Btu/lbm}
 \end{aligned}$$

Nuevo diagrama T – s.

Por las eficiencias de la bomba y la turbina, nuevas entalpías

Figura 11. Trabajo real de bomba



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 567 p.

(Trabajo real de la bomba)

$$WR_b = W_b / nt \quad (h_6' - h_6) = (h_6 - h_6) / nt$$

$$H_6' = [(h_6 - h_6) / nt] + h_1 \quad H_6' = 76,10843 \text{ Btu/lbm}$$

$$WR_b = (h_6' - h_6) \quad WR_b = 6,36893 \text{ Btu/lbm}$$

(Trabajo real turbina alta presión)

$$WR_{tap} = W_{tap} * nt \quad (h_6 - h_5') = (h_6 - h_5) * nt \quad h_6' = h_5 - [(h_6 - h_5) * nt]$$

$$H_6' = 1\,225,7672 \text{ Btu/lbm}$$

(Trabajo real turbina baja presión)

$$WR_{bap} = W_{bap} * nt \quad (h_6 - h_5') = (h_6 - h_5) * nt \quad h_6' = h_5 - [(h_6 - h_5) * nt]$$

$$H_6' = 1\,138,6896 \text{ Btu/lbm}$$

$$WRT = WR_{tap} + WR_{bap} \quad WRT = (h_7 - h_6') + (h_7 - h_5')$$

$$WRT = 583,5232 \text{ Btu/lbm}$$

$$q_{sale} = h_6' - h_5 \quad q_{sale} = 1\,068,9496 \text{ Btu/lbm}$$

$$q_{in} = (h_5 - h_6') + (h_6 - h_5') \quad q_{in} = 1\,646,1039 \text{ Btu/lbm}$$

$$W_{neto} = WRT - WR_B \quad W_{neto} = 577,1542 \text{ Btu/lbm}$$

$$nt = 1 - (q_{sale}/q_{in})$$

$$nt = 1 - [(1\,068,9496)/(1\,646,1039)] \quad nt = 35,06\%$$

$$\text{Potencia} = W_{neto} \cdot \dot{m}$$

$$P = (577,1542) \cdot (75 \text{ lbm/s}) \quad P = 43\,286,57 \text{ Btu/s} \cdot [(1 \text{ kJ}) / (0,948 \text{ Btu})]$$

$$P = 45\,660,94 \text{ kW}$$

2.1.4. Rankine regenerativo

Es aquél en el cual se extrae de la turbina una parte de vapor antes de llegar al condensador para precalentar el agua de alimentación, el recalentamiento de esta agua de alimentación se efectúa mediante calentadores de agua de alimentación, los cuales pueden ser abiertos o cerrados. En los primeros el intercambio de calor se efectúa de manera directa y a la misma presión de los dos fluidos; en el segundo caso, es a través de intercambiadores de tubos cerrados, el intercambio de calor es por conducción principalmente, y en éstos, los fluidos pueden no estar a la misma presión.

Tipos de calentadores:

- Calentador abierto: donde se mezcla el vapor de extracción y el condensado, logrando un líquido saturado.

- Calentador cerrado: es el más común donde se transmite la energía del vapor extraído por convección al líquido saturado.

Es necesario realizar un balance de masa y energía en cada calentador, para poder determinar el porcentaje de masa de extracción de vapor de cada calentador.

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_1$$

Donde \dot{m}_1 es el flujo másico que entra en la primera etapa de la turbina, \dot{m}_2 es el flujo másico extraído y \dot{m}_3 es el flujo másico que sale de la segunda etapa de la turbina. Dividiendo por \dot{m}_1 , queda:

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 1$$

La fracción y se puede determinar aplicando los principios de conservación de masa y energía al volumen de control que define el calentador de agua de alimentación. Asumiendo que no hay transferencia de calor entre el calentador y su entorno e ignorando los efectos de energía cinética y potencial; se tiene.

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5}$$

Tomando en cuenta la fracción de vapor los trabajos de turbina y calores de entrada y salida quedan de la siguiente manera:

$$W_t = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3)$$

$$W_b = (h_7 - h_6) + (1 - y)(h_5 - h_4)$$

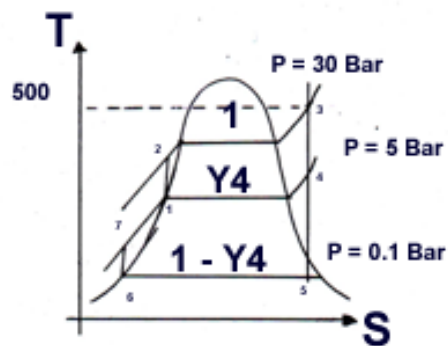
$$Q_{entra} = h_1 - h_7$$

$$Q_s = (1 - y)(h_3 - h_4)$$

Ejemplo:

Un ciclo motriz ideal regenerativo opera de manera que el vapor entra a la turbina a 30 bar y 500 °C y sale a 0.1 bar. Se utiliza sólo un calentador abierto de agua de alimentación que trabaja a 5 bar. Calcular la eficiencia térmica del ciclo.

Figura 12. **Ciclo regenerativo**



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 569 p.

Estado 1

$$P_1 = 5 \text{ bar}$$

$$h_1 = h_f(a \text{ 25 kPa}) = 640,23 \text{ kJ/Kg}$$

Estado 2

$$P_2 = 30 \text{ Bar}$$

$$h_2 = h_1 + W_b$$

$$W_b = v_{f1} * \Delta P_{Pres}$$

$$W_b = (0,1093 \text{ kJ/kg})(30-5)\text{bar}$$

$$W_b = 2,7315 \text{ kJ/Kg}$$

$$h_2 = 640,23 + 2,7315$$

$$h_3 = 642,9615 \text{ kJ/Kg}$$

Estado 3

$$P_3 = 30 \text{ bar}$$

$$T_3 = 500 \text{ °C}$$

$$h_3 = 3456,5 \text{ kJ/Kg}$$

$$S_3 = 7,2338 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{K}$$

Estado 4

$$P_4 = 5 \text{ Bar}$$

$$S_3 = S_4 = 7,2338 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{K}$$

Tabla II. **Propiedades del aire**

T °C	H	S
240	2 939,9	7,2307
T	h4	7,2338
280	3 022	7,3865

Fuente:..elaboración propia.

$$h_4 = 2941,551476 \text{ kJ/Kg}$$

Estado 5

$$P_5 = 0.1 \text{ bar}$$

$$S_3 = S_5 = 7,2338 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{K}$$

$$S_g = 8,1502 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{K}$$

Mezcla

$$S_5 = S_f + x S_{fg}(\text{a } 0.1 \text{ bar})$$

$$7,2338 = 0,6493 + (X)(8,1502 - 0,6493)$$

$$X = 0,87782 \text{ o } 87,782\%$$

$$h_5 = h_f + x h_{fg}(\text{a } 0.1 \text{ bar})$$

$$h_5 = 191,83 + (0,87782)(2\,392,8)$$

$$h_5 = 2\,292,294445 \text{ kJ/Kg}$$

Estado 6

$$P_5 = 0.1 \text{ bar}$$

$$h_5 = h_f(\text{a } 0.1 \text{ bar}) = 191,83 \text{ kJ/Kg}$$

Estado 7

$$P_7 = 5 \text{ Bar}$$

$$h_7 = h_6 + W_b$$

$$W_b = v_{f1} * \Delta P_{res}$$

$$W_b = (0,10102 \text{ kJ/kg})(5 - 0,1) \text{ bar}$$

$$W_b = 0,494998 \text{ kJ/Kg}$$

$$h_2 = 191,83 + 0,494998$$

$$h_3 = 192,324998 \text{ kJ/Kg}$$

Balance Energético en CA

$$h_1 = Y_4 h_4 + (1 - Y_4)h_7$$

$$h_1 = Y_4 h_4 + h_7 - Y_4 h_7$$

$$h_1 - h_7 = Y_4 (h_4 + h_7)$$

$$(h_1 - h_7) / (h_4 + h_7) = Y_4$$

$$Y_4 = (640,23 - 192,3249) / (2\,941,551 - 192,3249)$$

$$Y_4 = 0,162920$$

$$q_{\text{out}} = (h_5 - h_6) (1 - Y_4)$$

$$q_{\text{out}} = (2\,292,2944 - 191,83)(1 - 0,162920)$$

$$q_{\text{out}} = 1\,758,2267 \text{ kJ/Kg}$$

$$q_{\text{in}} = h_3 - h_2$$

$$q_{\text{in}} = 3\,456,5 - 642,9615$$

$$q_{\text{in}} = 2\,813,5385 \text{ kJ/Kg}$$

$$\eta_t = 1 - (1\,758,2267 / 2\,813,5385)$$

$$\eta_t = 0,37507$$

$$\eta_t = 37,507 \%$$

2.2. Ciclo de aire

Resulta útil tratar los procesos termodinámicos basándose en ciclos, procesos que devuelven un sistema a su estado original después de una serie de fases, de manera que todas las variables termodinámicas relevantes vuelven a tomar sus valores originales. En un ciclo completo, la energía interna de un sistema no puede cambiar, puesto que sólo depende de dichas variables. Por tanto, el calor total neto transferido al sistema debe ser igual al trabajo total neto realizado por el sistema.

Los ciclos de potencia de gas o dispositivos cíclicos generadores de potencia revisten de gran importancia en el estudio de la termodinámica, ya que varios sistemas y máquinas se basan en su funcionamiento.

Al estudiar un proceso cualquiera, desde el punto de vista de la Termodinámica, pueden desentenderse de las sustancias que constituyen al

sistema, pero se necesita saber cuántas y cuáles son las magnitudes físicas que pueden determinar unívocamente el estado en que se encuentra dicho sistema. Las magnitudes que sirven para determinar el estado de un sistema, y que pueden variar influencias por causas exteriores, como se describió anteriormente, se llaman parámetros. La cantidad de parámetros necesarios para determinar unívocamente el estado de un sistema, depende de su grado de complejidad. En Termodinámica, para establecer el grado de complejidad de un sistema se introduce el concepto de fase. Se entiende por fase todo cuerpo físico homogéneo o conjunto de cuerpos idénticos y físicamente homogéneos.

Por ejemplo: un sistema formado por agua, sobre la cual hay vapor de agua saturada, es un sistema de dos fases: una fase es el agua y otra el vapor saturado. De la misma forma, si en el agua flotan trozos de hielo se tendrá también un sistema de dos fases: una fase será el agua y la otra el conjunto de los trozos de hielo.

El sistema más simple es el formado por una cantidad determinada de gas perfecto; éste será un sistema monofásico. Los parámetros que determinan unívocamente el estado de este sistema pueden ser dos de las magnitudes siguientes: el volumen, la presión y la temperatura. Están relacionadas entre sí por la ecuación de estado, que para los gases perfectos es la fórmula de Mendeléiev-Clapeyron.

Toda transformación que se cumpla en un sistema está siempre relacionada con una serie de estados de desequilibrio. Pero se puede figurar una transformación que se realice de tal forma, que en cada instante, cada uno de sus parámetros tenga un valor determinado y que las variaciones de estos parámetros con el tiempo sean tan lentas que, durante un pequeño espacio de tiempo tomado arbitrariamente, el sistema pueda considerarse en equilibrio. Las

transformaciones que se efectúan infinitamente despacio se denominan equilibradas y pueden considerarse integradas por una serie de estados de equilibrios sucesivos.

Se dice que una transformación es reversible cuando puede realizarse en ambas direcciones, pero si se cumple primero en un sentido y después en el contrario, el sistema deberá volver a su estado inicial, sin que ocurra variación alguna en los cuerpos que lo rodean.

2.2.1. Ciclo Otto

Llamado también ciclo de encendido por chispa, y el proceso se realiza a volumen constante.

Este ciclo es de interés, ya que da el análisis del comportamiento de los motores por ignición de chispa. El ciclo Otto puede ser de dos o de cuatro tiempos.

Un ciclo de Otto de cuatro tiempos se compone de cuatro procesos internamente reversibles, además de una carrera de alimentación y una de expulsión en el ciclo.

El ciclo teórico consta de una transformación adiabática (compresión), una isocórica (combustión), una segunda transformación adiabática (expansión) y finalmente una segunda transformación isocórica (enfriamiento).

El trabajo requerido para expulsar la carga del cilindro tiene la misma magnitud, pero de signo contrario, que el requerido para absorber la nueva

carga, por tanto estas dos partes del ciclo teórico no afectan el trabajo neto desarrollado.

Los parámetros principales que gobiernan la eficiencia térmica de un ciclo Otto son la relación de compresión y la relación de capacidades térmicas específicas. El valor de la eficiencia térmica aumenta al aumentar la relación de compresión, desde el punto de vista práctico está limitado por la ocurrencia de la pre-ignición, cuando la relación se eleva por encima de diez, para los hidrocarburos comunes la eficiencia térmica aumenta al incrementar el cociente de las capacidades térmicas específicas. Para tener en cuenta que las capacidades térmicas específicas son variables la eficiencia se debe determinar mediante la relación:

$$\eta = 1 - (u_4 - u_1) / (u_3 - u_2)$$

Las temperaturas se calculan con las relaciones isentrópicas:

$$v_{r2} = v_{r1} * (v_2/v_1) = v_{r1}/r \text{ y } v_{r4} = (v_4/v_3) = r * v_{r3}$$

v_r es función sólo de la temperatura.

El ciclo Otto es el termodinámico ideal que se aplica en los motores de combustión interna de encendido provocado (motores de gasolina). Se caracteriza porque en una primera aproximación teórica, todo el calor se aporta a volumen constante.

En los próximos párrafos se describirá el ciclo Otto de cuatro tiempos. El que se describirá inicialmente es el ciclo teórico, y posteriormente las

diferencias que existen en un ciclo real. Las diferentes evoluciones que componen el ciclo son:

- Admisión: evolución 0-1. El pistón se desplaza desde el PMS (punto muerto superior) al PMI (punto muerto inferior). La válvula de admisión, VA se encuentra abierta. El pistón realiza una carrera completa. El cilindro se llena con mezcla aire/combustible. Al final de la admisión (en el PMI) se cierra la VA. El llenado del cilindro requiere un trabajo negativo.
- Compresión: evolución 1-2. Con las dos válvulas cerradas (VA y válvula de escape, VE), el pistón se desplaza desde el PMI al PMS. Se realiza una carrera completa. Se comprime la mezcla aire/combustible. En principio esta compresión es adiabática. La compresión requiere trabajo negativo.
- Encendido: en teoría éste es un instante (evolución 2-3). Cuando el pistón llega al PMS, se enciende la chispa en la bujía y se quema la mezcla en la cámara de combustión, aumentando la presión de 2 a 3.
- Trabajo: evolución 3-4. Con las dos válvulas cerradas el pistón se desplaza desde el PMS al PMI. Se realiza una carrera completa. En principio esta evolución es adiabática. La evolución genera trabajo positivo. De hecho es la única evolución del total del ciclo en que se genera trabajo positivo al exterior.
- Ap. válvula de escape: evolución 4-1. En teoría esta caída de presión de 4 a 1 es instantánea y ocurre cuando se abre la válvula de escape.
- Escape: evolución 1-0. El pistón se desplaza desde el PMI al PMS. Se realiza una carrera completa (la VE está abierta y la VA se encuentra

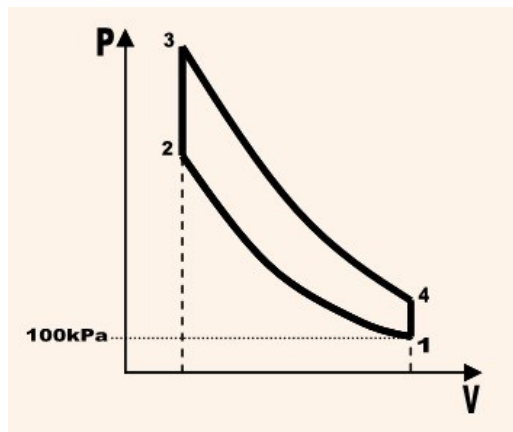
cerrada). En principio la presión dentro del cilindro es igual a la atmosférica, por lo cual el trabajo requerido es cero.

Cada carrera completa corresponde a media vuelta del cigüeñal. Por lo tanto para realizar el ciclo completo se requieren dos revoluciones completas en el motor de cuatro tiempos.

Ejemplo:

Un ciclo Otto ideal con aire tomado de la atmósfera como fluido de trabajo, tiene una relación de compresión de 8. Las temperaturas mínima y máxima en el ciclo son 310 K y 1600 K. Determinar: la cantidad de calor transferido al aire durante el proceso de adición de calor. La eficiencia térmica. La presión media efectiva y la cilindrada.

Figura 13. **Ciclo Otto**



Fuente: YUNUS A., Cengel. Termodinámica. México: McGraw-Hill, 2009. 504 p.

$$P_1 = 100 \text{ kPa} \quad \frac{V_1}{V_2} = 8 \quad T_1 = 310 \text{ K} \quad T_3 = 1600 \text{ K}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \Rightarrow T_2 = 310 \times (0.8)^{0.4} = 712.19K$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa} \Rightarrow P_2 = 100 \times 8^{1.4} = 1837.92kPa$$

$$q_H = {}_2q_3 = C_V (T_3 - T_2) \Rightarrow q_H = 636.12 \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} = 8$$

La eficiencia térmica

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\kappa-1} = 1600 \left(\frac{1}{8} \right)^{0.4} \Rightarrow T_4 = 696.44K$$

$$q_L = C_V (T_4 - T_1) \Rightarrow q_L = 0.7165(696.44 - 310) \Rightarrow q_L = 276.88 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_T = 1 - \frac{q_L}{q_H} \Rightarrow \eta_T = 1 - \frac{276.88}{636.12}$$

$$\eta_T = 0.5647 = 56.47\%$$

La presión media efectiva y la cilindrada.

$$\omega_{neto} = q_H - q_L = 636.12 - 276.88 \Rightarrow \omega_{neto} = 359.24 \frac{kJ}{kg}$$

$$PME = \frac{\omega_{neto}}{v_1 - v_2}$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0.287 \times 310}{100} \Rightarrow v_1 = 0.8897 \frac{m^3}{kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{8} = 0.1112 \frac{m^3}{kg}$$

$$PME = \frac{359.24}{0.7785} \Rightarrow PME = 461.45 kPa$$

$$v_1 - v_2 = 0.8897 - 0.1112$$

$$Cilindrada = 0.7785 \frac{m^3}{kg}$$

2.2.2. Ciclo Diesel

Un motor diesel puede modelarse con el ciclo ideal formado por seis pasos reversibles. Donde el rendimiento de este ciclo viene dado por la expresión

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma r^{\gamma-1}} \frac{r_c^\gamma - 1}{r_c - 1}$$

Siendo $r = V_A / V_B$ la razón de compresión y $r_c = V_C / V_B$ la relación de combustión.

El método para obtener este resultado es análogo al empleado para el ciclo Otto.

Comparar los rendimientos del ciclo de Otto y el diesel.

Un ciclo diesel ideal es un modelo simplificado de lo que ocurre en un motor diesel. En un motor de esta clase, a diferencia de lo que ocurre en un motor de gasolina la combustión no se produce por la ignición de una chispa en el interior de la cámara. En su lugar, aprovechando las propiedades químicas del gasóleo, el aire es comprimido hasta una temperatura superior a la de auto-ignición del gasóleo y el combustible es inyectado a presión en este aire caliente, produciéndose la combustión de la mezcla.

Puesto que sólo se comprime aire, la relación de compresión (cociente entre el volumen en el punto más bajo y el más alto del pistón) puede ser mucho más alta que la de un motor de gasolina (que tiene un límite, por ser indeseable la autoignición de la mezcla). La relación de compresión de un motor diesel puede oscilar entre doce y veinticuatro, mientras que el de gasolina puede rondar un valor de ocho.

Para modelar el comportamiento del motor diesel se considera un ciclo diesel de seis pasos, dos de los cuales se anulan mutuamente:

- Admisión $E \rightarrow A$

El pistón baja con la válvula de admisión abierta, aumentando la cantidad de aire en la cámara. Esto se modela como una expansión a presión constante (ya que al estar la válvula abierta la presión es igual a la exterior). En el diagrama PV aparece como una recta horizontal.

- Compresión $A \rightarrow B$

El pistón sube comprimiendo el aire. Dada la velocidad del proceso se supone que el aire no tiene posibilidad de intercambiar calor con el ambiente, por lo que el proceso es adiabático. Se modela como la curva adiabática reversible $A \rightarrow B$, aunque en realidad no lo es por la presencia de factores irreversibles como la fricción.

- Combustión $B \rightarrow C$

Un poco antes de que el pistón llegue a su punto más alto y continuando hasta un poco después de que empiece a bajar, el inyector introduce el combustible en la cámara. Al ser de mayor duración que la combustión en el ciclo Otto, este paso se modela como una adición de calor a presión constante. Éste es el único paso en el que el ciclo Diesel se diferencia del Otto.

- Expansión $C \rightarrow D$

La alta temperatura del gas empuja al pistón hacia abajo, realizando trabajo sobre él. De nuevo, por ser un proceso muy rápido se aproxima por una curva adiabática reversible.

- Escape $D \rightarrow A$ y $A \rightarrow E$

Se abre la válvula de escape y el gas sale al exterior, empujado por el pistón a una temperatura mayor que la inicial, siendo sustituido por la misma cantidad de mezcla fría en la siguiente admisión. El sistema es realmente abierto, pues intercambia masa con el exterior. No obstante, dado que la cantidad de aire que sale y la que entra es la misma, se puede para el

balance energético, suponer que es el mismo aire, que se ha enfriado. Este enfriamiento ocurre en dos fases. Cuando el pistón está en su punto más bajo, el volumen permanece aproximadamente constante y se tiene la isocora D→A.

Cuando el pistón empuja el aire hacia el exterior, con la válvula abierta, se emplea la isobara A→E, cerrando el ciclo.

Un ciclo Diesel contiene dos procesos adiabáticos: A→B y C→D, en los que no se intercambia calor. De los otros dos, en el calentamiento a presión constante B→C, el gas recibe una cantidad de calor $|Q_c|$ del exterior igual a:

$$|Q_c| = n c_p (T_C - T_B)$$

En el enfriamiento a volumen constante D→A el sistema cede una cantidad de calor al ambiente.

$$|Q_f| = n c_v (T_D - T_A)$$

El rendimiento del ciclo será entonces:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{c_v (T_D - T_A)}{c_p (T_C - T_B)} = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{\gamma (T_C - T_B)}$$

Con $\gamma = c_p / c_v$ la proporción entre las capacidades caloríficas.

La expresión anterior requiere conocer las cuatro temperaturas de los vértices del ciclo. Puede simplificarse teniendo en cuenta las características de cada uno de los procesos que lo componen.

Así se tiene, para la compresión adiabática A→B

$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

Que, teniendo en cuenta la relación de compresión, se puede reescribir como:

$$r \equiv \frac{V_A}{V_B} \Rightarrow T_B = T_A r^{\gamma-1}$$

Para la expansión a presión constante, aplicando la ecuación de estado de los gases ideales:

$$p_B = p_C \Rightarrow \frac{V_B}{T_B} = \frac{V_C}{T_C}$$

Introduciendo ahora la relación $r_c = V_C / V_B$ se obtiene:

$$T_C = T_B r_c = T_A r_c r^{\gamma-1}$$

Por último, para la temperatura en D se aplica de nuevo la ley de Poisson y el que el enfriamiento es a volumen constante:

$$V_D = V_A T_C V_C^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1} \Rightarrow T_D = T_C \left(\frac{V_C}{V_A} \right)^{\gamma-1}$$

Multiplicando y dividiendo por V_B y aplicando el valor de la temperatura en C:

$$T_D = T_A r_c r^{\gamma-1} \left(\frac{r_c}{r} \right)^{\gamma-1} = T_A r_c^{\gamma}$$

Combinando estos resultados, queda:

$$\begin{aligned}T_D - T_A &= T_A r_c^\gamma - T_A = T_A (r_c^\gamma - 1) \\T_C - T_B &= T_A r_c r_c^{\gamma-1} - T_A r_c^{\gamma-1} = T_A r_c^{\gamma-1} (r_c - 1)\end{aligned}$$

Sustituyendo esto en la expresión del rendimiento se obtiene finalmente:

$$\eta = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{\gamma(T_C - T_B)} = 1 - \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma r_c^{\gamma-1} (r_c - 1)}$$

Ejemplo:

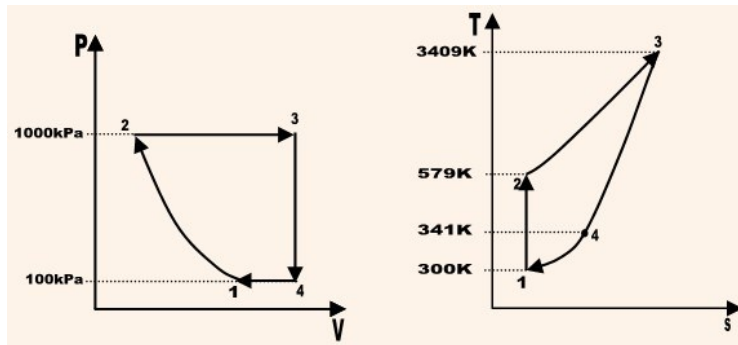
Un ciclo de aire se ejecuta en un sistema cerrado y se compone de los siguientes 4 procesos:

- 1-2 Compresión isoentrópica de 100 kPa y 27°C a 1 Mpa
- 2-3 Adición de calor a $P = \text{cte}$ en la cantidad de 2840 KJ/kg.
- 3-4 Rechazo de calor a $V = \text{cte}$ hasta 100 kPa
- 4-1 Rechazo de calor a $P = \text{cte}$ hasta el estado inicial

Realizar:

- Mostrar el ciclo en diagramas P-v y T-s
- Calcular la temperatura máxima en el ciclo
- Determinar la eficiencia térmica.

Figura 14. **Ciclo Diesel**



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 504 p.

Calcular la temperatura máxima en el ciclo:

$$P_1 = 100 \text{ kPa} \quad T_1 = 300 \text{ K} \quad {}_2q_3 = 2840 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_3 = v_4 \quad P_4 = P_1 = 100 \text{ kPa}$$

$$P_1 v_1 = R T_1$$

$$v_1 = \frac{0.287 \times 300}{100} \Rightarrow v_1 = 0.861 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \Rightarrow T_2 = 300 \left(\frac{1000}{100} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$T_2 = 579 \text{ K}$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{P_2} = \frac{0.287 \times 579}{1000} \Rightarrow v_2 = 0.1662 \frac{m^3}{kg}$$

$${}_2q_3 - {}_2\omega_3 = u_3 - u_2 = C_v(T_3 - T_2)$$

$${}_2q_3 = C_p(T_3 - T_2)$$

$${}_2q_3 = 1.0035(T_3 - 579)$$

$$T_3 = \frac{2840}{1.0035} + 579 \Rightarrow T_3 = 3409K$$

$$v_3 = 0.9784 \frac{m^3}{kg}$$

$$v_4 = 0.9784 \frac{m^3}{kg}$$

Determinar la eficiencia térmica

$$T_4 = \frac{v_4 P_4}{R} \Rightarrow T_4 = \frac{0.9784 \times 100}{0.287}$$

$$T_4 = 341K$$

$$\eta_T = \frac{\omega_{neto}}{q_H} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

$$\eta_T = 1 - \frac{0.7165(3409 - 341) + 1.0035(341 - 300)}{2840}$$

$$\eta_T = 0.2115 = 21.15\%$$

2.2.3. Ciclo Brayton

Es el ciclo ideal para los motores de turbina de gas; fue propuesto por George Brayton por primera vez, para usarlo en el motor reciprocante que quemaba aceite desarrollado alrededor de 1870. Actualmente se utiliza en turbinas de gas, donde los procesos tanto de compresión como de expansión suceden en maquinaria rotatoria. Las turbinas de gas generalmente operan en un ciclo abierto. 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 hacia fuera (no se recirculan), causando que el ciclo se clasifique como un ciclo abierto.

El ciclo de turbina de gas abierto descrito anteriormente puede modelarse como un ciclo cerrado, empleando las suposiciones de aire estándar. En este caso los procesos de compresión y expansión permanecen iguales, pero 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 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:

- Compresión isentrópica (en un compresor)
- Adición de calor a presión constante
- Expansión isentrópica (en una turbina)

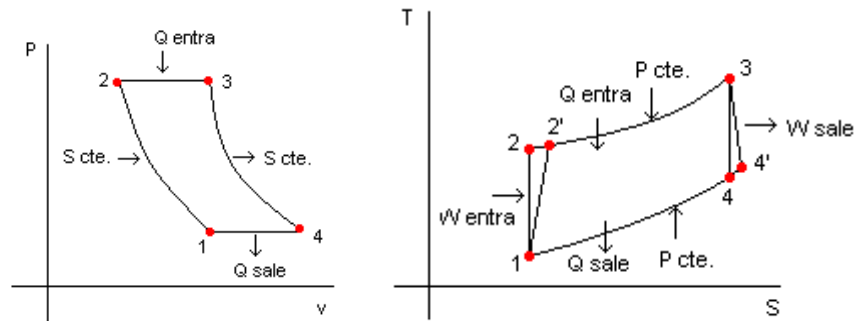
- Rechazo de calor a presión constante

Los diagramas T-s y P-v de un ciclo Brayton ideal se muestran en la figura 15. Observar que los cuatro procesos del ciclo Brayton se ejecutan en dispositivos de flujo estacionario, por lo tanto, deben analizarse como procesos de flujo estacionario. Cuando los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes, el balance de energía para un proceso de flujo estacionario puede expresarse, por unidad de masa.

Una central eléctrica de gas de potencia opera con aire como fluido de trabajo. El aire entra al compresor a 98 Kpa. Y 290 °K, y a la turbina a 760 Kpa. Y 1100 °K, con eficiencias del 80% en el compresor y 86.4% en la turbina, el aire fluye hacia el sistema a 75 MW. Determinar:

- $W_{entra} = W_{compresor}$
- $W_{sale} = W_{turbina}$
- Q_{entra}
- Rendimiento térmico del ciclo (η_t).
- R_c .
- PME.
- Relación de trabajo de retroceso

Figura 15. Ciclo Bryton



Fuente. YUNUS A., Cengel. Termodinámica. México: McGraw-Hill, 2009. 506 p.

Datos:

$$P_1 = 98 \text{ Kpa.}$$

$$P_3 = 760 \text{ Kpa.}$$

$$\eta_{\text{compresor}} = 80\%$$

$$T_1 = 290 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_3 = 1100 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\eta_{\text{turbina}} = 86,4 \%$$

Capacidades térmicas específicas variables

Estado 1

$$P_1 = 98 \text{ Kpa.}$$

$$T_1 = 290 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P_1 v_1 = R T_1$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \left(\frac{8,314 \frac{\text{Kpa} \cdot \text{m}^3}{\text{Kg mol} \cdot \text{ }^\circ\text{K}}}{29 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg mol}}} \right) * \left(\frac{290 \text{ }^\circ\text{K}}{98 \text{ Kpa}} \right) = 0,8483 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

Con $T_1 = 290 \text{ }^\circ\text{K}$ y las tablas para el aire:

$$h_1 = 290,16 \text{ KJ/Kg}$$

$$Pr_1 = 1,2311$$

$$u_1 = 206,91 \quad vr_1 = 676,1$$

Estado 2

$$P_2 = P_3 = 760 \text{ Kpa}$$

Relaciones isentropicas: $\frac{P_1}{P_2} = \frac{Pr_1}{Pr_2}$

$$Pr_2 = Pr_1 * \frac{P_2}{P_1} = 1.2311 * \frac{760 \text{ Kpa}}{98 \text{ Kpa}} = 9,5473$$

Con $Pr_2 = 9,5473$ y las tablas para el aire:

Tabla III. **Propiedades del aire**

T(°K)	h (KJ/Kg)	Pr	u(KJ/Kg)	vr
510	513.32	9.031	366.92	162.1
517.906	521.471	9.5473	372.802	155.774
520	523.63	9.684	374.36	154.1

Fuente: elaboración propia.

Entonces: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{vr_1}{vr_2}$

$$v_2 = v_1 * \frac{vr_2}{vr_1} = 0,8483 \frac{m^3}{Kg} * \frac{155,774}{676,1} = 0,1954 \frac{m^3}{Kg}$$

Estado 3

$$P_3 = 760 \text{ Kpa} \quad T_3 = 1100 \text{ °K}$$

$$P_3 v_3 = RT_3$$

$$v_3 = \frac{RT_3}{P_3} = \left(\frac{8.314 \frac{\text{Kpa} * \text{m}^3}{\text{Kg mol} * \text{°K}}}{29 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg mol}}} \right) * \left(\frac{1100 \text{ °K}}{760 \text{ Kpa}} \right) = 0.4149 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

Con $T_3 = 1100 \text{ °K}$ y las tablas para el aire:

$$h_3 = 1161,07 \text{ KJ/Kg} \quad Pr_3 = 167,1 \quad u_3 = 845,33 \text{ KJ/Kg} \quad vr_3 = 18,896$$

Estado 4

$$P_4 = P_1 = 98 \text{ Kpa} \quad \frac{P_3}{P_4} = \frac{Pr_3}{Pr_4}$$

$$Pr_4 = Pr_3 * \frac{P_4}{P_3} = 167,1 * \frac{98 \text{ Kpa}}{760 \text{ Kpa}} = 21,5471$$

Con $Pr_4 = 21,5471$ y las tablas para el aire:

Tabla IV. **Propiedades del aire**

T(°K)	h (KJ/Kg)	Pr	u(KJ/Kg)	vr
640	649,22	20,64	465,50	88.89
647.435	657,116	21,5471	471,262	86.2504
650	659,84	21,86	473.25	85.34

Fuente: elaboración propia.

Entonces: $\frac{v_3}{v_4} = \frac{vr_3}{vr_4}$

$$v_4 = v_3 * \frac{vr_4}{vr_3} = 0,4149 \frac{m^3}{Kg} * \frac{86,2504}{18,896} = 1,8940 \frac{m^3}{Kg}$$

$$Wr_{comp.} = \frac{Ws_{comp.}}{n_t}$$

$$h_{2'} - h_1 = \frac{h_2 - h_1}{0,80}$$

$$h_{2'} - 290,16 = \frac{521,471 - 290,16}{0,80}$$

$$h_{2'} = 579,2996 \frac{KJ}{Kg}$$

Entonces: $Wr_{comp.} = 289,1396 \frac{KJ}{Kg}$

$$Wr_{turb.} = Ws_{turb.} * n_t$$

$$h_3 - h_{4'} = (h_3 - h_4) * 0,864$$

$$1\ 161,07 - h_{4'} = (1\ 161,07 - 657,116) * 0,864$$

$$h_{4'} = 725,6539 \frac{KJ}{Kg}$$

$$\text{Entonces: } W_{r_{turb.}} = 435,4160 \frac{KJ}{Kg}$$

$$a) W_{entra} = W_{r_{comp.}} = 289,1396 \frac{KJ}{Kg}$$

$$b) W_{sale} = W_{r_{turb.}} = 435,4160 \frac{KJ}{Kg}$$

$$c) Q_{entra} = h_3 - h_{2'} = 1\ 161,07 - 579,2996 = 581,7703 \frac{KJ}{Kg}$$

$$d) W_{neto} = W_{sale} - W_{entra} = 435,416 - 289,1396 = 146,2764 \frac{KJ}{Kg}$$

$$n_t = \frac{W_{neto}}{Q_{entra}} = \frac{146,2764 \frac{KJ}{Kg}}{581,7703 \frac{KJ}{Kg}} = 0,2514 = 25,14 \%$$

$$e) R_c = \frac{v_1}{v_2} = \frac{0,8483 \frac{m^3}{Kg}}{0,1954 \frac{m^3}{Kg}} = 4,3402$$

$$f) PEM = \frac{W_{neto}}{v_1 - v_2} = \frac{(435,4160 - 289,1396) \frac{KJ}{Kg}}{(0,8483 - 0,1954) \frac{m^3}{Kg}} * \left(\frac{10^{-2} \text{ bar} \cdot m^3}{1 \text{ KJ}} \right) * \left(\frac{100 \text{ Kpa}}{1 \text{ bar}} \right) =$$

$$224,0404 \text{ Kpa}$$

Capacidades térmicas específicas constantes:

$$P_1 = 98 \text{ Kpa} v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \left(\frac{8,314 \frac{\text{Kpa} \cdot \text{m}^3}{\text{Kg mol} \cdot \text{°K}}}{29 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg mol}}} \right) * \left(\frac{290 \text{ °K}}{98 \text{ Kpa}} \right) = 0,8483 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

$$T_1 = 290 \text{ °K}$$

Proceso 1- 2 : isentrópico

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \therefore P_2 = P_3 = 760 \text{ Kpa} \quad K = 1.4$$

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 290 \text{ °K} * \left(\frac{760 \text{ Kpa}}{98 \text{ Kpa}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 520,6739 \text{ °K}$$

$$P_2 v_2 = RT_2$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{P_2} = \left(\frac{8,314 \frac{\text{Kpa} \cdot \text{m}^3}{\text{Kg mol} \cdot \text{°K}}}{29 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg mol}}} \right) * \left(\frac{520,6739 \text{ °K}}{760 \text{ Kpa}} \right) = 0,1964 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

Proceso de 2 – 3 : Adición de calor a presión constante

$$\text{Ec. } P v = m R T \cdot P_3 = 760 \text{ Kpa}$$

$$P_2 = P_3 \frac{m R T_2}{v_2} = \frac{m R T_3}{v_3} \quad \therefore T_3 = 1100 \text{ °K}$$

$$v_3 = T_3 * \frac{v_2}{T_2} = 1100 \text{ °K} * \frac{0,1964 \text{ m}^3 / \text{Kg}}{520,6739 \text{ °K}} = 0,4149 \frac{\text{m}^3}{\text{°K}}$$

Proceso de 3 – 4 : isentrópico

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \therefore P_4 = P_1 = 760 \text{ Kpa} \quad T_3 = 1100 \text{ °K}$$

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 1100 \text{ °K} * \left(\frac{98 \text{ Kpa}}{760 \text{ Kpa}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 612,6674 \text{ °K}$$

$$P_4 v_4 = R T_4$$

$$v_4 = \frac{RT_4}{P_4} = \left(\frac{8,314 \frac{\text{Kpa} \cdot \text{m}^3}{\text{Kg mol} \cdot \text{°K}}}{29 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg mol}}} \right) * \left(\frac{612,6674 \text{ °K}}{98 \text{ Kpa}} \right) = 1,7923 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

$$Wr_{comp.} = \frac{Ws_{comp.}}{n_t}$$

$$C_p(T_{2'} - T_1) = \frac{C_p(T_2 - T_1)}{0,80}$$

$$T_{2'} - 290 = \frac{520,6739 - 290}{0,80}$$

$$T_{2'} = 578,3424 \text{ °K}$$

$$\text{Entonces: } Wr_{comp.} = 289,7841 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Wr_{turb.} = Ws_{turb.} * n_t$$

$$C_p(T_3 - T_{4'}) = C_p(T_3 - T_4) * 0,864$$

$$1\ 100 - T_{4'} = (1\ 100 - 612,667) * 0,864$$

$$T_{4'} = 678,9446 \text{ °K}$$

Entonces:

$$Wr_{turb.} = 423,1605 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$W_{entra} = Wr_{comp.} = 289,7841 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$W_{sale} = Wr_{turb.} = 423,1605 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\begin{aligned} Q_{entra} &= C_p(T_3 - T_{2'}) = \left(1,005 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{°K}} \right) [(1\ 161,07 - 579,2996) \text{ °K}] \\ &= 524,2658 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \end{aligned}$$

$$W_{neto} = W_{sale} - W_{entra} = 423,1605 - 289,7841 = 133,3764 \frac{KJ}{Kg}$$

$$n_t = \frac{W_{neto}}{Q_{entra}} = \frac{133,3764 \frac{KJ}{Kg}}{524,2658 \frac{KJ}{Kg}} = 0,2544 = 25,44 \%$$

$$R_c = \frac{v_1}{v_2} = \frac{0,8483 \frac{m^3}{Kg}}{0,1964 \frac{m^3}{Kg}} = 4,3193$$

$$PEM = \frac{W_{neto}}{v_1 - v_2} = \frac{133,3764 \frac{KJ}{Kg}}{(0,8483 - 0,1964) \frac{m^3}{Kg}} * \left(\frac{10^{-2} bar \cdot m^3}{1 KJ} \right) * \left(\frac{100 Kpa}{1 bar} \right)$$

$$= 204,5785 Kpa$$

2.2.4. Ciclo de refrigeración

Al estudiar y comprender los principios básicos de refrigeración, el lector será capaz de comprender cualquier tipo de sistema de refrigeración que podría encontrarse. Para cualquier sistema mecánico de refrigeración, los principios y componentes esenciales son los mismos, no importa cuán grande o pequeña, o la forma en que han sido ensamblados juntos.

Este ciclo es simplemente la refrigeración mediante la eliminación de calor. El calor es una forma de energía que no puede ser destruida. Por lo tanto, para eliminar el calor sólo se puede transferir de un lugar a otro.

Aunque es más fácil pensar en refrigeración como el proceso de enfriar las cosas, en realidad es el proceso de transferencia de calor de un lugar a

otro. O de quitar energía, ya que en física, energía= trabajo.

Aplicar esto a un ejemplo:

Hallado de un refrigerador utilizado para el almacenamiento de productos. Con el fin de enfriar esta sala es necesario que se transfiera de calor desde el interior de esta sala, a algún lugar fuera de la misma. Esto ocurre en varios pasos:

- El aire es extraído a través de una serpentina refrigerante, o evaporador, dentro de la habitación. Como refrigerante fluye a través de la serpentina, el calor se transfiere desde el aire a la serpentina de refrigeración. Esto provoca un descenso de temperatura en el aire a medida que pasa a través de la serpentina.
- El refrigerante fluye entonces a la unidad de condensación, donde el refrigerante, eventualmente transfiere el calor al aire exterior en el condensador refrigerado por aire.
- Después que el calor se elimina del refrigerante, que luego circula de nuevo a la sala de evaporador, para repetir el proceso.

En un sistema de refrigeración se necesitan controles sobre el nivel de líquido del refrigerante y sobre la temperatura del espacio refrigerado. El control del líquido regula el flujo de refrigerante hacia el evaporador y también sirve como barrera de presión entre la alta presión de operación del condensador y la presión más baja de operación del evaporador. En este punto, el tubo capilar y la válvula de expansión, entre otros dispositivos de expansión, adquieren importancia, llegándose a considerar estrictamente necesarios en toda

instalación automática de refrigeración. Estos dispositivos constituyen principalmente una restricción colocada en el sistema, la cual hace posible que el compresor, por medio de su efecto de bombeo mantenga cierta diferencia de presión. Además, controlan la velocidad de flujo del refrigerante desde el lado de alta presión hacia el de baja.

Dada la importancia que revisten, será objeto de la presente práctica la descripción y conocimiento del principio de funcionamiento de los dispositivos de expansión más ampliamente usados, como: el tubo capilar y la válvula de expansión. Cabe en este punto señalar que el control del líquido por tubo capilar está restringido en gran parte a las unidades relativamente pequeñas, armadas y cargadas en la fábrica y en particular para los sistemas sellados en forma hermética. La válvula de expansión a presión constante que mantiene una presión constante en el evaporador y la válvula de expansión térmica que mantiene un sobre calentamiento constante al salir del evaporador, son controles estándar del líquido para la mayor parte de las aplicaciones comerciales.

Se pretende, además entender cómo se ve afectado el comportamiento de un ciclo de refrigeración cuando se modifica la carga del sistema, así como cuando existe exceso o falta de refrigerante en el mismo, de manera que se destaque la importancia que tiene el control de estos parámetros, entre otros, para el normal y óptimo funcionamiento del ciclo en cuestión.

La refrigeración en los términos más sencillos, es la refrigeración mediante la eliminación de calor. También podría decirse que la refrigeración es la transferencia de calor de un lugar donde no es requerido (dentro del refrigerador), a otro lugar menos objetable (al aire libre).

La estrategia habitual en refrigeración es saturar de calor el refrigerante,

luego transferir el refrigerante a un lugar donde el calor puede ser eliminado de él. Presentado de otro modo, el refrigerante (R22) es un líquido que recoge el calor por evaporación a baja presión, temperatura y luego renuncia este calor por condensación a una mayor presión y temperatura (en el exterior condensador refrigerado por aire).

La mayor parte de la transferencia de calor se produce porque el refrigerante cambia de estado. El líquido refrigerante en el evaporador absorbe su calor latente por vaporización, y en el proceso de cambio de líquido a vapor (cambio de estado). El gas refrigerante en el condensador elimina su calor latente, por lo tanto, pasando de un gas a un líquido. Es este el ciclo de cambio que mueve el calor eliminado de un lugar a otro, descripción de la válvula de expansión y su tubo igualador de presiones. En términos generales, la válvula de expansión es un dispositivo que se usa para regular la entrada en el evaporador del agente refrigerante en su fase líquida, procedente del condensador a través de la correspondiente tubería, conocida como línea de líquido.

El refrigerante líquido a alta presión, que procede del depósito de la unidad condensador a pasa por la válvula de expansión para convertirse en líquido a baja presión. Dicha válvula es la divisoria entre las partes de alta y baja presión del sistema. Así, tiene dos funciones distintas:

Regular la velocidad de admisión de líquido en el serpentín de enfriamiento y consecuentemente, controlar la proporción de área superficial interior que se encuentra en contacto con el refrigerante líquido.

- Mantener constante la carga del compresor al mantener invariable la presión de succión.

- El aumento en la carga del sistema de refrigeración origina un incremento en la presión de succión pues el vapor se forma con mayor rapidez, si se mantiene constante esta presión, la capacidad refrigerante del compresor es inalterable en todo momento.

De acuerdo a su funcionamiento se dividen en: válvulas de expansión automática, termostática y de flotador, accionadas respectivamente, por las diferentes presiones, temperaturas o nivel de refrigerante en el evaporador.

En algunas instalaciones se utilizan también válvulas de expansión tituladas fijas, las cuales mantienen un paso determinado de líquido sin posibilidad de regulación.

La válvula empleada en el laboratorio es termostática, de modo que posee un elemento térmico (bulbo) conectado por medio de un pequeño tubo capilar sellado. Esta válvula posee un igualador de presión, cuya existencia se justifica al considerar que en ciertos evaporadores, particularmente en aquellos de gran capacidad, existen pérdidas de presión. En general, este igualador de presión puede ser interior (en el mismo cuerpo de la válvula) o exterior (con conexiones fuera de la misma). En el primer caso, dicho igualador consiste en un paso en el interior de la válvula que comunica la presión de aspiración al fuelle por debajo, balanceándolas y la presión de trabajo de la válvula y evitando que las altas presiones que se originan en la aspiración por inundación del evaporador la puesta en marcha, afecten la regulación de la válvula de expansión.

En las válvulas con igualadores de presión exterior, esta comunicación se consigue por medio de un tubo conectado, desde la cámara debajo del fuelle

hasta la línea de aspiración después del punto donde hace contacto el bulbo de la válvula.

Ahora bien, el principio de funcionamiento de la válvula de expansión termostática es el siguiente: la válvula mantiene un sobre calentamiento constante en el evaporador. El bulbo está lleno parcialmente con refrigerante líquido y mantiene algo de líquido en todas las condiciones de temperatura y carga, además está adaptado a la línea de succión, de modo que cualquier cambio de temperatura en esta línea, origine el cambio correspondiente en el bulbo térmico. Bajo un aumento de carga térmica, el refrigerante hierve con mayor rapidez en el evaporador, esto ocasiona el aumento de la temperatura en el bulbo térmico debido al sobrecalentamiento. La mayor temperatura produce una presión superior dentro del bulbo y el tubo capilar, lo que a su vez, origina la expansión del fuelle metálico y una mayor abertura de la válvula. Como resultado se admite mayor refrigerante líquido al evaporador para compensar el aumento de carga.

En términos generales, un presostato es un dispositivo que mantiene constante la presión de un fluido en una canalización o un depósito. La operación mecánica de un control de baja presión es la misma que cuando se hace uso de un interruptor conectado-desconectado para parar y arrancar el sistema.

El control de baja presión interrumpe el funcionamiento del compresor a una presión de operación mínima determinada previamente, de modo que actúa como un control de seguridad que protege contra las relaciones de compresión extremas, el congelamiento en el evaporador, así como de la entrada de aire y de vapor de agua que resultan de fugas o entradas por ellado de baja. Un presostato actúa por medio de un fuelle o diafragma conectado a

un interruptor eléctrico por un lado, y por el otro a la presión del refrigerante, (en este caso en el lado de baja presión). Además de estos dispositivos existen los reguladores de la línea de succión.

Después de haber revisado el evaporador y el condensador, la identificación de estos dos componentes como el lugar donde el calor se intercambia, ahora corresponde revisar los otros dos componentes clave en el ciclo de refrigeración, el compresor y el dispositivo expansor.

El compresor y el aparato de expansor que permite que sucedan dos cosas. El compresor permite añadir la energía mecánica para el refrigerante, a fin de que el calor pueda ser forzado a fluir cuesta arriba. En segundo lugar, que permiten crear dos zonas de presión en el mismo sistema. Con el fin de mantener el producto fresco, el sistema tiene que absorber el calor dentro del refrigerador. Hay que asegurarse que la temperatura del refrigerante es lo suficientemente baja en el evaporador (la temperatura de evaporación) y que el calor que se va a eliminar del recinto fluirá a través del evaporador y será absorbido por el refrigerante.

La temperatura normal de saturación del refrigerante dentro del evaporador es de 20F (-6.6°). El calor disminuirá cada vez que el aire pase por el evaporador. Dado que la presión y puntos de ebullición están directamente relacionados para todos los fluidos, el refrigerante se puede regular para evaporar a una temperatura deseada, simplemente ajustando su presión. En el refrigerante R-22 la temperatura de saturación de -6.6° se produce a 43PSIG (libras).

Ahora que se ha transferido el calor al refrigerante, es necesaria la transferencia de calor al aire libre. Este sistema debe condensar en una

temperatura lo suficientemente elevada, como para que el calor se derive del refrigerante al aire exterior, ya que pasa a través del a serpentina de condensador. Cuando la temperatura del aire exterior es de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura normal de saturación para el refrigerante dentro de un condensador refrigerado por aires alrededor de $48.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al igual que en el evaporador, los niveles de presión harán que el refrigerante cambie de estado a la temperatura deseada. Para R-22 una saturación temperatura de $48.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ se produce en alrededor de 260PSIG (libras).

Para lograr tanto la alta presión y baja presión, las zonas descritas anteriormente, hay que utilizar un compresor y un dispositivo de expansor. Estos dos dispositivos marcan la divisoria entre la parte alta presión y baja presión. A menudo esto se conoce como el lado de alta y el lado de baja del sistema.

Seguir el flujo de refrigerante a medida que se avanza a través del ciclo de refrigeración.

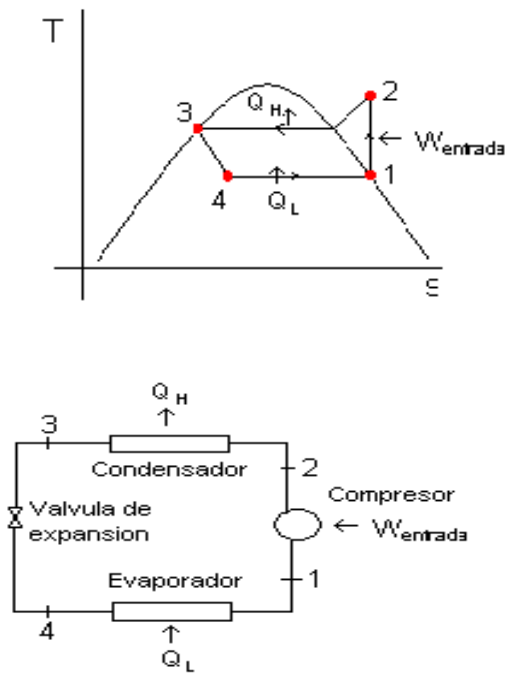
Ejemplo:

Un refrigerador usa refrigerante 134a como fluido de trabajo y opera en el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor. El refrigerante entra al evaporador a 120 Kpa con una calidad de 30% y sale del compresor a 60 grados centígrados.

Si el compresor consume 450 W de potencia, determinar:

- El flujo másico del refrigerante
- La presión del condensador
- El COP del refrigerador

Figura 16. **Ciclo de Refrigeración**



Fuente: YUNUS A., Cengel. Termodinámica. México: McGraw-Hill, 2009. 648 p.

Estado 4

$P_4 = 120 \text{ Kpa}$

$X = 0.3$

$$h_4 = h_f + x * h_{fg} = 22,49 \text{ KJ/Kg} + 0,3 * 214,48 \text{ KJ/Kg} = 86,834 \text{ KJ/Kg}$$

Estado 1

$P_1 = 120 \text{ Kpa}$

De las tablas de refrigerante 134a se tiene:

$$h_1 = h_g = 236,97 \text{ KJ/Kg}$$

$$s_1 = s_g = 0,94779 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{°K}$$

Estado 3

$$h_3 = h_4 = 86,834 \text{ KJ/Kg}$$

Estado 2

$$T_2 = 60 \text{ ° C}$$

$$s_2 = s_1 = 0,94779 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{°K}$$

Se debe realizar una interpolación, ya que en la tabla de refrigerante 134a sobrecalentado, no se encuentra el valor de entalpía al valor de entropía dada:

Tabla V. Entropía y entalpía R-134^a

S (KJ/Kg. °K)	h (KJ/Kg)
0.9614	289.64
0.94779	$h_2 = 287.12$
0.9389	285.47

Fuente: elaboración propia.

$$Flujomasico = \frac{Potenciaencompresor}{h_2 - h_1} = \frac{0,450 Kw * \frac{Kj}{seg}}{(287,12 - 236,97) \frac{KJ}{Kg}}$$

$$= 0,008973 \frac{Kg}{seg}$$

Tabla VI. **Entalpía y presión**

h (KJ/Kg)	P (Kpa)
85.26	650
86.834	P _{condensador} = 672.11
88.82	700

Fuente: elaboración propia.

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{236,97 - 86,834}{287,12 - 236,97} = 2,9937$$

3. MEZCLA DE GASES Y VAPORES

El agua es un compuesto vital para el desarrollo de los procesos biológicos que se efectúan en la tierra, su presencia en forma líquida, sólida o vapor influye de forma importante en las condiciones climáticas. Los procesos físicos de evaporación, o sea la transición del estado líquido a vapor y el de condensación, el cambio del estado vapor a líquido, establecen mecanismos de adición y eliminación de humedad, provocando cambios en los diferentes sistemas ecológicos.

El término humedad se aplica en general, a la cantidad de vapor presente en un gas. Aunque los términos vapor y gas, podrían ser equivalentes, no lo son; el gas es un estado físico en donde, por arriba de ciertas condiciones críticas de presión y temperatura, no puede condensarse, es decir, convertirse en líquido. Es claro que el gas bajo las condiciones antes mencionadas podría licuarse y por lo tanto evaporarse, recibiendo el nombre de vapor. Entonces el vapor es el producto de la evaporación de un líquido.

Para que el proceso de evaporación exista, es necesario aplicar al líquido una cantidad de energía tal que permita vencer las fuerzas de atracción entre las moléculas del propio líquido. Lo anterior provoca la liberación de moléculas que salen al espacio gaseoso que las rodean. La energía suministrada al líquido se conoce como el calor de vaporización, que no es otra cosa más que la cantidad de calor que hay que aplicar al líquido a una temperatura determinada para convertirlo en vapor. Al aumentar la temperatura en el líquido se acelera el proceso de vaporización, es decir, habrá una mayor cantidad de vapor

presente en el gas, el proceso de evaporación continúa hasta la última gota de líquido.

Si se calienta un líquido hasta su temperatura de ebullición, es decir, la temperatura por encima de la cual se convierte en vapor y éste se coloca en un recipiente cerrado y queda aislado térmicamente, es decir se realiza un proceso adiabático, podría observarse que bajo una condición de temperatura y presión, existe un número determinado de moléculas de líquido que se integraron a la fase vapor (N_v) y que por choques entre moléculas y las paredes del recipiente existe otro número determinado de moléculas de vapor que se condensan (N_L) y regresan al seno del líquido.

Durante el proceso de evaporación el número de moléculas de líquido presentes en el gas irá en aumento y cuando se alcanza constancia en las condiciones de temperatura y presión se obtiene un equilibrio, en el cual, el número de moléculas que salen del líquido por evaporación es igual al número de moléculas que entran por condensación, lográndose un equilibrio dinámico. Este equilibrio se obtiene para cada temperatura y presión.

La cantidad de moléculas de vapor en el gas se puede medir por la presión que ejercen a una temperatura determinada. Esta presión se le conoce como presión de vapor (P_0) y depende para sustancias puras como el agua, exclusivamente de la temperatura (T) y en el caso de mezclas, dependerá, además de las concentraciones (X) de los componentes. Para el caso de un líquido puro, $P_0 = f(T)$, esta función se puede representar en una gráfica.

Al líquido que alcanza este equilibrio dinámico se dice que está bajo condiciones de saturación o saturado, es decir, que a condiciones

determinadas se tiene una máxima de moléculas en el vapor. Esta relación entre la presión de vapor y la temperatura es particular para cada líquido y existen ecuaciones específicas para el cálculo de P_0 a diferentes temperaturas. Es claro que el proceso de evaporación está influenciado por la presión que ejerce el gas sobre el líquido.

Entre mayor sea esta presión, mayor energía se requerirá para evaporar un líquido. Este fenómeno se puede observar por la variación de las temperaturas de ebullición de un líquido, cuando se varía la presión del gas. Si se quiere evaporar agua al nivel del mar, la presión que ejerce el gas, es la que ejerce el aire que rodea al agua. A nivel del mar se tiene la mayor columna de gas presente sobre el líquido y por lo tanto se requerirá una temperatura mayor de ebullición, bajo estas condiciones la temperatura de ebullición del agua es de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A medida que la columna de aire disminuye, la presión disminuye, por lo tanto se tendrán temperaturas de ebullición menores a los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entonces, como se puede observar la presión de vapor es una función de la temperatura y de la presión total. En procesos de evaporación al ambiente, la presión total es igual a la atmosférica y varía muy poco, lo cual se supone para efectos de diseño.

La presión atmosférica depende, básicamente de la columna de aire presente, es decir, de la altitud del lugar. La presión que ejerce el aire al nivel del mar es la equivalente a una columna de 760 milímetros de mercurio. Si se toma referencia una temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una latitud de 45° , se obtiene una atmósfera normal o de referencia. Bajo estas condiciones un gas que siga el comportamiento y las leyes ideales del estado gaseoso, ocupará un volumen de 22,4 litros.

A la presión que ejerce el aire se le conoce como presión atmosférica o manométrica. La presión es la fuerza que ejerce en este caso el aire sobre una superficie. En el apéndice A se describen las diferentes unidades de medida de presión y sus equivalencias. Normalmente cuando se refiere al término humidificación, se habla de una mezcla de un gas y de un vapor. Si esta mezcla obedece las leyes ideales de los gases se puede aplicar la ley de Dalton de las presiones parciales: la presión total (PT) de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales (p) de los gases constituyentes.

La presión parcial, (P) se define como la presión que cada gas ejerce si ocupara por sí solo el volumen de la mezcla a la misma temperatura. La presión parcial de un componente de una mezcla de gases ideales es, por lo tanto, igual al producto de la presión total por la concentración de dicho constituyente particular, si se tiene una mezcla vapor-gas:

$$P = X P$$

La evaporación del agua es un ejemplo de cambio de fase de líquido a vapor. Los potenciales químicos de las fases α (líquido) y β (vapor) son funciones de la temperatura T y la presión P y tienen el mismo valor:

$$\mu_{\alpha}(T, P) = \mu_{\beta}(T, P)$$

A partir de esta igualdad y empleando relaciones termodinámicas, se obtiene la ecuación de Clapeyron.

Suponiendo que la fase vapor es un gas ideal y que el volumen molar del líquido es despreciable comparado con el volumen molar de gas, se llega a la denominada ecuación de Clausius-Clapeyron, que proporciona la presión de

vapor del agua P_v en función de la temperatura T , suponiendo además, que la entalpía L de vaporización es independiente de la temperatura (al menos en un determinado intervalo)

$$\ln P_v = -\frac{L}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + C$$

3.1. Leyes termodinámicas

El punto de partida para la mayor parte de las consideraciones termodinámicas son sus leyes que postulan que la energía puede ser intercambiada entre sistemas en forma de calor o trabajo. También se introduce una magnitud llamada entropía, que mide el orden y el estado dinámico de los sistemas y tiene una conexión muy fuerte con la teoría de información. En la termodinámica se estudian y clasifican las interacciones entre diversos sistemas, lo que lleva a definir conceptos como sistema termodinámico y su contorno. Un sistema termodinámico se caracteriza por sus propiedades, relacionadas entre sí mediante las ecuaciones de estado. Éstas se pueden combinar para expresar la energía interna y los potenciales termodinámicos, útiles para determinar las condiciones de equilibrio entre sistemas y los procesos espontáneos.

Con estas herramientas, la termodinámica describe cómo los sistemas responden a los cambios en su entorno. Esto se puede aplicar a una amplia variedad de temas de ciencia e ingeniería, tales como: motores, transiciones de fase, reacciones químicas, fenómenos de transporte, e incluso agujeros negros. Los resultados de la termodinámica son esenciales para la química, la física, la ingeniería química, entre otros.

Ley cero de la termodinámica, este principio establece que existe una determinada propiedad, denominada temperatura empírica θ , que es común para todos los estados de equilibrio termodinámico que se encuentren en equilibrio mutuo con uno dado. Tiene importancia experimental, pues permite construir instrumentos que midan la temperatura de un sistema, pero no resulta tan importante en el marco teórico de la termodinámica.

El equilibrio termodinámico de un sistema se define como la condición del mismo en el cual las variables empíricas usadas para definir o dar a conocer un estado del sistema (presión, volumen, campo eléctrico, polarización, magnetización, tensión lineal, tensión superficial, coordenadas en el plano x, y), no son dependientes del tiempo. El tiempo es un parámetro cinético, asociado a nivel microscópico; el cual a su vez está dentro de la fisicoquímica y no es parámetro debido a que a la termodinámica sólo le interesa trabajar con un tiempo inicial y otro final. A dichas variables empíricas (experimentales) de un sistema se les conoce como coordenadas térmicas y dinámicas del sistema.

Este principio fundamental, aun siendo ampliamente aceptado, no fue formulado formalmente hasta después de haberse enunciado las otras tres leyes. De ahí que recibiera el nombre de principio cero.

Primera ley termodinámica: también conocida como conservación de la energía para la termodinámica, en realidad el primer principio dice más que una ley de conservación, establece que si se realiza trabajo sobre un sistema o bien éste intercambia calor con otro, la energía interna del sistema cambiará. Visto de otra forma, esta ley permite definir el calor como la energía necesaria que debe intercambiar el sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna.

Fue propuesta por Nicolás Léonard Sadi Carnot en 1824, en su obra Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia, en la que expuso los dos primeros principios de la termodinámica. Esta obra no comprendida por los científicos de su época, y más tarde fue utilizada por Rudolf Clausius y Lord Kelvin para formular, de una manera matemática, las bases de la termodinámica.

La ecuación general de la conservación de la energía es la siguiente:

$$E_{\text{entra}} - E_{\text{sale}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

Que aplicada a la termodinámica teniendo en cuenta el criterio de signos termodinámico, queda de la forma siguiente:

$$\Delta U = Q - W$$

Donde: U energía interna del sistema (aislado),

Q cantidad de calor aportado al sistema y

W trabajo realizado por el sistema

Segunda ley de la termodinámica: ésta arrebató la dirección en la que deben llevarse a cabo los procesos termodinámicos y, por lo tanto, la imposibilidad de que ocurran en el sentido contrario (por ejemplo, que una mancha de tinta dispersada en el agua pueda volver a concentrarse en un pequeño volumen). También establece, en algunos casos, la imposibilidad de convertir completamente toda la energía de un tipo en otro sin pérdidas.

De esta forma, la segunda ley impone restricciones para las transferencias de energía que hipotéticamente pudieran llevarse a cabo teniendo en cuenta

sólo el primer principio. Esta ley apoya todo su contenido, aceptando la existencia de una magnitud física llamada entropía, de tal manera que, para un sistema aislado (que no intercambia materia ni energía con su entorno), la variación de la entropía siempre debe ser mayor que cero.

Debido a esta ley, también se tiene que el flujo espontáneo de calor siempre es unidireccional, desde los cuerpos de mayor temperatura hacia los de menor temperatura, hasta lograr un equilibrio térmico.

La aplicación más conocida es la de las máquinas térmicas, que obtienen trabajo mecánico mediante aporte de calor de una fuente o foco caliente, para ceder parte de este calor a la fuente o foco o sumidero frío. La diferencia entre los dos calores tiene su equivalente en el trabajo mecánico obtenido.

Existen numerosos enunciados equivalentes para definir este principio, destacándose el de Clausius y el de Kelvin, no existe ningún dispositivo que, operando por ciclos, absorba calor de una única fuente y lo convierta íntegramente en trabajo.

Es imposible construir una máquina térmica cíclica que transforme calor en trabajo sin aumentar la energía termodinámica del ambiente. Debido a esto se puede concluir, que el rendimiento energético de una máquina térmica cíclica que convierte calor en trabajo, siempre será menor a la unidad, y ésta estará más próxima a la unidad, cuanto mayor sea el rendimiento energético de la misma. Es decir, cuanto mayor sea el rendimiento energético de una máquina térmica, menor será el impacto en el ambiente, y viceversa.

Tercera ley de la termodinámica: propuesta por Walther Nernst, afirma que es imposible alcanzar una temperatura igual al cero absoluto mediante un

número finito de procesos físicos. Puede decirse también, que a medida que un sistema dado se aproxima al cero absoluto, su entropía tiende a un valor constante específico. La entropía de los sólidos cristalinos puros puede considerarse cero bajo temperaturas iguales al cero absoluto. No es una noción exigida por la termodinámica clásica, así que es probablemente inapropiado tratarlo de ley.

Es importante recordar que los principios o leyes de la termodinámica son sólo generalizaciones estadísticas, válidas siempre para los sistemas macroscópicos, pero inaplicables a nivel cuántico. El principio de Maxwell ejemplifica cómo puede concebirse un sistema cuántico que rompa las leyes de la termodinámica.

Así mismo, cabe destacar que el primer principio, el de conservación de la energía, es la más sólida y universal de las leyes de la naturaleza descubiertas hasta ahora por las ciencias.

La termometría se encarga de la medición de la temperatura de cuerpos o sistemas. Para este fin, se utiliza el termómetro, instrumento que se basa en el cambio de alguna propiedad de la materia debido al efecto del calor; así se tiene el termómetro de mercurio y de alcohol, que se basan en la dilatación; los termopares que deben su funcionamiento al cambio de la conductividad eléctrica; los ópticos que detectan la variación de la intensidad del rayo emitido cuando se refleja en un cuerpo caliente.

Para poder construir el termómetro se utiliza el principio cero de la termodinámica, que dice: "Un sistema A que está en equilibrio térmico con un sistema B, está en equilibrio térmico también con un sistema C, entonces los

tres sistemas A, B y C están en equilibrio térmico entre sí". Demostración de la existencia de la temperatura empírica de un sistema con base en la ley cero.

Se ha demostrado que para todos los sistemas que se hallen en equilibrio termodinámico entre sí, existen sendas funciones cuyos valores numéricos son iguales para cada uno de dichos sistemas en equilibrio. Este valor numérico puede ser representado con la letra griega θ y será definido como la temperatura empírica de los sistemas en equilibrio termodinámico.

Por lo tanto, todo equilibrio termodinámico entre dos sistemas es equivalente a un equilibrio térmico de los mismos, es decir, a una igualdad de temperaturas empíricas de estos.

3.2. Mezcla de gases ideales con un vapor condensable

Un gas es una sustancia cuyo volumen es igual al volumen del recipiente que lo contiene, ciertamente los gases se expanden hasta ocupar todo el volumen del recipiente que lo contiene, pero ese efecto no es único. Al inyectar a muy alta velocidad un líquido por un pequeño orificio para formar un aerosol dentro de un volumen vacío, las pequeñas y rapidísimas partículas de líquido, también terminarán por ocupar todo el volumen formando una niebla, por lo que a esta definición hay que complementarla para evitar la confusión.

Se puede arreglar este problema agregando que: un gas deberá estar formado por un gran número de moléculas. Pero el líquido también está formado por muchas moléculas, así que aún no está resuelto del todo, falta aun algo, por eso se agrega que: las moléculas se mueven en todas direcciones, situación que no sucede en el líquido del aerosol, donde el grupo de moléculas

que forman la partícula se mueven todas en la misma dirección debido a la interacción molecular que mantienen y que a su vez impide la libre expansión.

Para que esta última condición se cumpla debe darse a su vez que: el tamaño de la molécula debe ser despreciable, comparado con la distancia entre ellas; de forma tal que esa enorme distancia relativa, hace que no haya interacción, y que ésta sólo se limite a su choque físico eventual.

Finalmente un gas, una sustancia que cumple con las condiciones siguientes es entonces:

- Ocupa el volumen del recipiente que lo contiene
- Está formado por un gran número de moléculas
- Estas moléculas se mueven individualmente al azar en todas direcciones
- La interacción entre las moléculas se reduce sólo a su choque

En la realidad, estas condiciones se cumplen con suficiente aproximación en los gases a las condiciones normales de presión y temperatura como para ser consideradas ciertas, pero ¿qué pasa si el gas se somete a muy elevadas presiones?, por ejemplo: reduciendo notablemente el recipiente que lo contiene, está claro, la distancia entre las moléculas se reduce y su interacción comienza a tener más y más influencia en el comportamiento, a medida que se aumente la presión; el gas va apartándose de la definición de gas a la que se ha llegado, por tal motivo y debido a que un gas puede ser más o menos gas, se establece un patrón de gas que servirá para establecer las leyes del comportamiento de todos los gases y que podrá ser usada con suficiente aproximación en la mayor parte de las aplicaciones prácticas, este patrón se llama, gas ideal.

Parte de la termodinámica estudia una mezcla de gases ideales con un vapor condensable, se considera un vapor o un gas que se encuentra por debajo de su temperatura crítica, es decir un gas que esta cerca de la zona de saturación.

Se considera gas aquella sustancia que se encuentra a una temperatura superior que su temperatura crítica.

3.3. Propiedades del aire atmosférico

El aire atmosférico es una mezcla ideal de diferentes químicos. Puede considerarse como una mezcla de aire seco más vapor de agua, que también puede establecerse como un gas ideal

Es útil realizar esta disociación del aire atmosférico por dos razones:

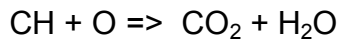
- El agua es el único componente del aire atmosférico que condensa en condiciones normales.
- La cantidad de vapor de agua en el aire atmosférico es uno de los parámetros que determina la comodidad humana:

Humedad absoluta o específica: es la razón entre la masa de agua que contiene el aire atmosférico y la masa de aire seco:

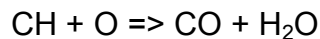
$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a} = v \frac{P_v}{P - P_v} \quad v = 0,622$$

4. PRINCIPIOS DE COMBUSTIÓN

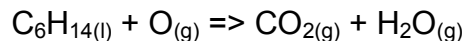
La combustión es el efecto de arder o quemarse, esto sucede por la reacción química entre un combustible y un comburente, esto produce luz y calor, para que se produzca la combustión es necesario que haya carbono, hidrógeno y oxígeno, y esto produce la combustión, el procedimiento es sencillo: se junta un hidrocarburo y oxígeno y se obtiene agua más monóxido de carbono (combustión incompleta) y/o bióxido de carbono (combustión completa), y el balance consiste en encontrar la cantidad de partes de cada compuesto para que se logre correctamente la reacción (en este caso combustión).



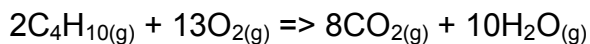
Lo que se representa es que en todo proceso de combustión (completa) se produce dióxido de carbono y agua, en una combustión incompleta ocurre lo siguiente:



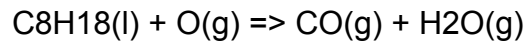
Se produce monóxido de carbono, un ejemplo de esto sería la reacción del butano (muy utilizado como combustible de cocina):



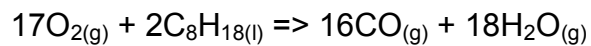
Así, de manera simple, ya balanceado queda de esta forma:



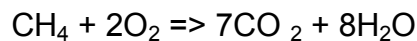
Se puede mencionar la combustión de un compuesto C₈H₁₈ (otro hidrocarburo):



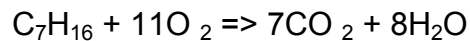
Esta reacción, comúnmente produce una combustión incompleta, por la falta de oxígeno se produce monóxido de carbono; ya balanceada queda así:



La combustión del metano (CH₄) está dada por:



La combustión del heptano (componente de la gasolina), se obtiene por:



Para intereses prácticos de la termodinámica y la ingeniería mecánica se describe 2 tipos de combustión:

Combustión a presión constante: en los motores diesel, es la forma de combustión que limita la presión soportada por el cilindro a los valores alcanzados al final de la compresión.

Combustión a volumen constante: en los motores Otto o de gasolina, el combustible y el aire deben estar dispuestos para la combustión completa, cuando salta la chispa eléctrica. Cuando el volumen se aproxima a esta constante, la combustión es muy rápida.

4.1. Ecuación química de la combustión

Una reacción química en la que se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía recibe el nombre de combustión.

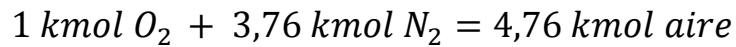
La combustión es una reacción entre un comburente y un combustible, con desprendimiento de luz y calor. Se denomina comburente al medio de reacción que permite que ocurra una combustión. En el planeta, el comburente natural es el aire, debido a su gran porcentaje de oxígeno (O₂), ya que sin oxígeno no es posible una combustión.

Se define combustible a toda sustancia capaz de arder. Los combustibles se clasifican de distintas maneras, ya sea por su origen: naturales o artificiales, o por el estado físico en que se hallan a temperatura ambiente: sólidos, líquidos o gaseosos.

Se utiliza oxígeno puro como oxidante sólo en algunas aplicaciones especializadas, tales como corte y soldadura, donde el aire no puede ser utilizado en una masa o un volumen base. El aire seco está compuesto de 20.9 por ciento de oxígeno, 78.1 por ciento de nitrógeno, 0.9 por ciento de argón, y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, helio, neón, y el hidrógeno.

En el análisis de los procesos de combustión, el argón que se encuentra en el aire es tratado como el nitrógeno, y las otras pequeñas cantidades de los otros gases que existen no se tienen en cuenta. Entonces el aire se puede aproximar como el 21 por ciento de oxígeno y 79 por ciento de nitrógeno en un número de moles de aire. Por lo tanto, cada mol de oxígeno que entra en una cámara de combustión se acompaña de $0.79/0.21 = 3.76$ mol de nitrógeno.

Como se muestra:

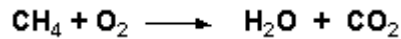


Las transformaciones que ocurren en una combustión química se rigen por la ley de la conservación de la masa: los átomos no se crean ni se destruyen durante una reacción química. Entonces, el mismo conjunto de átomos está presente antes, durante y después de la reacción. Los cambios que ocurren en una reacción química simplemente consisten en una reordenación de los átomos. Por lo tanto, una ecuación química de combustión ha de tener el mismo número de átomos de cada elemento en ambos lados de la flecha. Cuando se logra cumplir con esta ley, se dice entonces que la ecuación está balanceada.

Considerando que se desea sacar la ecuación química de combustión del metano gaseoso (CH_4) en el aire. Lo primero que se debe hacer es lo siguiente:

- Se determina cuáles son los reactivos y los productos.
- Se escribe una ecuación no ajustada, usando las fórmulas de los reactivos y de los productos.
- Se ajusta la reacción determinando los coeficientes que dan números iguales de cada tipo de átomo en cada lado de la flecha de reacción, generalmente números enteros.

Sabiendo que en esta reacción se consume (O_2) y produce agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2); los reactivos son CH_4 y O_2 , y los productos son H_2O y CO_2 y la ecuación química de combustión sin ajustar será:



Entonces se puede decir que, una molécula de metano reacciona con dos moléculas de oxígeno para producir dos moléculas agua y una molécula de dióxido de carbono a través de un proceso de combustión.

4.2. Poder calorífico de los combustibles

La unidad que se emplea para medir la cantidad de calor desarrollada en la combustión se le denomina poder calorífico. Se entiende por poder calorífico de un combustible, la cantidad de calor producida por la combustión completa de un kilogramo de esa sustancia. Tal unidad se mide en cal/kg de combustible.

Si la cantidad de combustible que se quema en un mol, el calor desprendido recibe el nombre de efecto térmico (poco usado). De la diferencia entre el poder calorífico superior (NS) y el poder calorífico inferior (NI) se obtendría uno u otro, según el estado de agregación que forma parte de los productos de combustión.

Si la temperatura de los productos finales de combustión es tal que el vapor de agua que se ha formado continúe en ese estado, tendrá el poder calorífico inferior del combustible (NI).

En cambio, si la temperatura de los productos finales es suficientemente baja como para que aquélla se condense, se tendrá el poder calorífico superior del combustible (NS). La diferencia entre ellos será igual el calor desprendido por la condensación del agua.

4.3. Calor de la combustión

Se entiende por combustión a toda reacción química que va acompañada de gran desprendimiento de calor; puede ser sumamente lenta, de tal manera que el fenómeno no vaya acompañado de una elevación de temperatura sensible a los sentidos, como sucede en la oxidación del hierro en el aire húmedo. Fenómeno. Conocido como combustión lenta o eremacausia, o con desprendimiento de calor muy rápido, como la detonación.

En toda combustión, el elemento que arde se denomina combustible y el que produce la combustión, comburente. Una combustión es la reacción del oxígeno con diversas sustancias, en general el carbono y el hidrógeno.

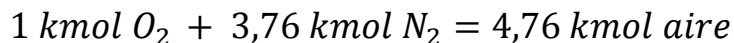
En la mayoría de los casos el portador del oxígeno es el aire; el nitrógeno (salvo en la generación de los NOx) y los demás componentes del aire no reaccionan con el combustible, por lo que en muchos cálculos no se tienen en cuenta. Los productos reaccionantes son: el combustible, el aire, los productos de la combustión gaseosos denominados humos o gases de escape y las cenizas que pueden originarse formadas por componentes no combustibles o no quemados del combustible (inquemados).

Los explosivos y ciertos combustibles no precisan aire para realizar la combustión, por cuanto el oxígeno necesario lo tienen ya químicamente ligado a ellos.

En el proceso de combustión, las sustancias que intervienen reaccionan químicamente y tienen que cumplir los siguientes principios:

- Principio de Conservación de la Materia: de forma que conocidas las cantidades de combustible y de aire necesario para la combustión, sea posible hallar la cantidad resultante de productos de combustión.
- Primer Principio de la Termodinámica: por cuanto las reacciones químicas, y en particular las combustiones, son transformaciones energéticas.
- Segundo Principio de la Termodinámica: que permite obtener el rendimiento termodinámico de la transformación de energía el cual tiene lugar durante la reacción química, y conocer en qué dirección y proporción se desarrollará, (equilibrio químico).

Cualquier material que pueda quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. A la reacción química durante la cual un combustible se oxida y se libera una gran cantidad de energía se le conoce como combustión. El oxidante empleado con más frecuencia en los procesos de combustión es el aire. El aire seco puede tener aproximadamente, 21 por ciento de oxígeno y 79 por ciento de nitrógeno en números molares.



Durante el proceso de combustión los componentes que existen antes de la reacción reciben el nombre de reactivos, y los componentes que existen después de la reacción se denominan productos. Las ecuaciones químicas se balancean con base en el principio de la conservación de la masa, el cual establece que la masa total de cada elemento se conserva durante una reacción química. La relación entre la masa del aire y la masa de combustible durante el proceso de combustión, se denomina relación aire combustible AC:

$$AC = m_{\text{aire}} / m_{\text{comb}}$$

Donde:

$$m_{\text{aire}} = (NM)_{\text{aire}}$$

$$m_{\text{combustible}} = \text{sumatoria de } (NiMi)_{\text{combustible}}.$$

Un proceso de combustión es completo, si todo el carbono en el combustible se convierte en CO₂, todo el hidrógeno en H₂O y todo el azufre (si lo hubiere) en SO₂. La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible se denomina aire estequiométrico o teórico. El aire también se conoce como la cantidad de aire químicamente correcta o 100 por ciento del aire teórico. El proceso de combustión ideal durante el cual el combustible se quema completamente con aire teórica se llama combustible estequiométrica o teórica de ese combustible. El aire remanente de la cantidad estequiometria se denomina exceso de aire. La cantidad de exceso de aire suele expresarse en términos de aire estequiométrico como exceso del aire porcentual o aire teórico porcentual.

Durante una reacción química, algunos enlaces químicos se rompen y otros se forman. Por ello, un proceso que incluye reacciones químicas implicará cambios en energías químicas. Debidas al cambio en la composición, es necesario contar con un estado de referencia estándar para todas las sustancias en el cual se estableció en 25 °C (77 °F) y 1 atm.

A la diferencia entre la entalpia de los productos en un estado específico y la entalpia de los reactivos en el mismo estado en una reacción completa, se denomina entalpia de reacción h_R . En procesos de combustión, a la entalpia de reacción se le conoce como entalpia de combustión h_c ; que representa la cantidad de calor liberado durante el final del proceso de combustión de flujo

estable, cuando 1 Kmol (o 1Kg) de combustible se quema completamente a una temperatura y presión especificadas.

La entalpia de una sustancia en un estado específica, debido a su composición química recibe el nombre de entalpia de formación h_f . A la entalpia de formación de todos los elementos estables se les asigna un valor cero en el estado de referencia estándar de 25°C y 1 atm.

El poder calorífico de un combustible se ha definido como la cantidad de energía liberada, cuando un combustible se quema completamente en un proceso de flujo estable y los productos se regresan al estado de los reactivos. El poder calorífico de un combustible es igual al valor absoluto de la entalpia de combustión del combustible.

4.4. Temperatura teórica de la flama

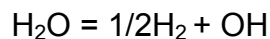
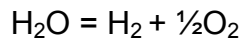
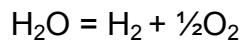
La temperatura teórica de llama es la temperatura que se alcanza cuando la combustión se realiza sin pérdidas ni ganancias de calor. Existen diferentes métodos para calcularla.

Se considera el supuesto de que no se realiza ningún trabajo mecánico y que los únicos términos de energía que intervienen son la energía interna y el trabajo de flujo. Las mismas limitaciones están comprendidas en el cálculo de la temperatura de llama u otras reacciones por estos métodos.

Debe conocerse la composición verdadera de los productos, incluidas la presencia de reactivos que han reaccionado, radicales libres, átomos libres. El método no se puede aplicar a la primera fracción de segundo requerido para alcanzar los calores de equilibrio de las capacidades caloríficas.

La máxima temperatura adiabática de llama se alcanza cuando se quema el combustible con la cantidad necesaria de oxígeno puro. La máxima temperatura adiabática de llama en aire corresponde a la combustión con la cantidad de aire teóricamente necesario y es evidentemente, mucho menor que la temperatura máxima de llama en oxígeno puro. Debido a la necesidad de emplear un exceso de aire para asegurar la combustiones reales son siempre menores que los valores máximos.

La temperatura real de la llama difiere de la temperatura teórica de llama. La temperatura real es menor que la teórica debido a las pérdidas de calor y a qué parte del calor liberado se invierte calor de reacción en algunas disociaciones endotérmicas que ocurren a altas temperaturas como éstas:



Sin embargo, a medida que se disminuye la temperatura de los humos las reacciones anteriores cambian sentido y libran calor. Por tanto, aunque la temperatura teórica de llama no refleja la temperatura real de llama, sí proporciona una referencia para conocer cuánto calor libera la combustión a medida de que los humos se enfrían.

La diferencia de temperatura, en el lado mayor temperatura de los humos, entre los humos y el proceso son mayores que en la realidad, a medida que los humos se enfrían y pasan a través de la zona de convección del horno, las diferencias de temperatura indicadas por la curva son más representativas

de lo que realmente está ocurriendo. En la zona de radiación, hay que acudir a modelos más complejos para determinar cuáles son las diferencias de temperaturas reales.

Todos los procesos de combustión trabajan con un exceso de aire u oxígeno para asegurar que la combustión será completa. Normalmente, el exceso de aire está entre el 5 y el 20% dependiendo del diseño de quemadores y del horno; al reducir el exceso de aire la temperatura teórica de llama aumenta. Como consecuencia de ello, disminuyen las pérdidas y se aumenta la eficiencia térmica del horno, manteniendo por supuesto el calor aportado al proceso. Otra manera de aumentar la temperatura teórica de llama es recalentando el aire; de nuevo las pérdidas de energía son menores. Aunque una mayor temperatura teórica de llama disminuye las pérdidas (y por tanto el consumo de combustibles), puede dar lugar a la formación de óxidos de nitrógeno, cuya emisión está muy restringida por la legislación medioambiental.

5. TRANSFERENCIA DE CALOR

5.1. Introducción

Existen tres métodos para la transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Conocer cada tipo y saber cómo funciona permite entender mejor cómo los sistemas de aislamiento y burletes protegen el espacio acondicionado.

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura.

Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés, Joseph Fourier, dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades

térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que, materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes.

En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de ordenadores (computadoras) analógicos y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad, incluso para cuerpos de geometría complicada.

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir.

Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Suponiendo por ejemplo, que se calienta desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad

disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación.

El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior, que está más frío, desciende, mientras que al aire cercano al panel interior, más caliente, asciende, lo que produce un movimiento de circulación.

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección, que hacen que el aire caliente suba hacia el techo y el aire frío del resto de la habitación se dirija hacia el radiador. Debido a que el aire caliente tiende a subir y el aire frío a bajar, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima.

De la misma forma, la convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural, y del tiro de las chimeneas. La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie.

La transferencia de calor, en forma de energía electromagnética, por el espacio. La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La

radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica.

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzman en honor a dos físicos austriacos, Joseph Stefan y Ludwig Boltzman que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura. Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto.

Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente, porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates.

Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mates para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima, con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela.

Algunas sustancias, entre ellas muchos gases y el vidrio, son capaces de transmitir grandes cantidades de radiación. Se observa experimentalmente que las propiedades de absorción, reflexión y transmisión de una sustancia dependen de la longitud de onda de la radiación incidente. El vidrio, por ejemplo, transmite grandes cantidades de radiación ultravioleta, de baja longitud de onda, pero es un mal transmisor de los rayos infrarrojos, de alta longitud de onda.

Una consecuencia de la distribución de Planck es que la longitud de onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante disminuye con la temperatura. La ley de desplazamiento de Wilhelm, llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien, es una expresión matemática de esta observación, y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es igual a una constante, 2.878 micrómetros-Kelvin. Este hecho, junto con las propiedades de transmisión del vidrio antes mencionadas, explica el calentamiento de los invernaderos. La energía radiante del Sol, máxima en las longitudes de onda visibles, se transmite a través del vidrio y entra en el invernadero.

En cambio, la energía emitida por los cuerpos del interior del invernadero, predominantemente de longitudes de onda mayor, correspondiente al infrarrojo, no se transmiten al exterior a través del vidrio. Así, aunque la temperatura del aire en el exterior del invernadero sea baja, la temperatura que hay dentro es

mucho más alta porque se produce una considerable transferencia de calor neta hacia su interior.

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos. Por ejemplo, las cápsulas espaciales que regresan a la atmósfera de la Tierra a velocidades muy altas, están dotadas de un escudo térmico que se funde de forma controlada en un proceso llamado ablación para impedir un sobrecalentamiento del interior de la cápsula. La mayoría del calor producido por el rozamiento con la atmósfera se emplea en fundir el escudo térmico y no en aumentar la temperatura de la cápsula

Cuando el aire de un ambiente se pone en contacto con la superficie de un cerramiento a una temperatura distinta, el proceso resultante de intercambio de calor se denomina transmisión de calor por convección. Este proceso es una experiencia común, pero una descripción detallada del mecanismo es complicada dado que además de la conducción hay que considerar el movimiento del aire en zonas próximas a la superficie.

En el caso que la fuerza motriz que mueve el aire proceda exclusivamente de la diferencia de densidad en el aire que resulta del contacto con la superficie a diferente temperatura y que da lugar a fuerzas ascensionales se producirá el proceso de transmisión denominado convección libre o natural.

Cuando exista una fuerza motriz exterior, como el viento, que mueva al aire sobre una superficie a diferente temperatura se producirá una convección

forzada, que debido al incremento de la velocidad del aire se transmitirá una mayor cantidad de calor que en la convección libre para una determinada diferencia de temperatura. En el caso que se superpongan ambas fuerzas motrices, por ser de magnitudes semejantes, el proceso se denomina convección mixta.

Se denomina transmisión de calor por radiación, cuando la superficie del cerramiento intercambia calor con el entorno mediante la absorción y emisión de energía por ondas electromagnéticas. Mientras que en la conducción y la convección era precisa la existencia de un medio material para transportar la energía, en la radiación el calor se transmite a través del vacío, o atravesando un medio transparente como el aire.

Todas las superficies opacas emiten energía en forma de radiación en una magnitud proporcional a la cuarta potencia su temperatura absoluta T , y en un rango de longitudes de onda inversamente proporcional a su temperatura absoluta. Por consiguiente, los cerramientos emiten radiaciones de onda larga, correspondiente al espectro infrarrojo lejano, procedente de sus superficies a temperaturas típicas del ambiente, en función de una propiedad superficial denominada emitancia, y de forma simultánea absorben radiaciones similares emitidas por las superficies visibles de su entorno, en un proceso denominado irradiación.

En el ambiente, también se puede considerar la presencia de radiaciones de onda corta, correspondiente al espectro de radiación visible e infrarrojo cercano, procedente de fuentes de elevada temperatura como el sol y el alumbrado artificial, para las cuales los cerramientos se comportan solo como absorbentes en función de una propiedad superficial denominada absortancia.

La transmisión de calor por radiación se caracteriza porque la energía se transporta de una superficie a otra en forma de ondas electromagnéticas, que se propagan en línea recta a la velocidad de la luz y no requieren de un medio físico para transmitirse.

Tanto la teoría ondulatoria como la corpuscular son útiles para explicar el comportamiento de la radiación térmica. La teoría ondulatoria asimila la radiación a una onda que oscila con una frecuencia η [Seg-1] y a una longitud de onda λ [M], siendo la velocidad de la luz V_r :

$$V_r = \lambda * \eta = 3 * 10^8 \text{ [M/s]}$$

La teoría corpuscular admite que la energía radiante se transporta en forma de paquetes llamados fotones, que se propagan con distintos niveles energéticos dados por la ley de Planck, por lo que la frecuencia es función del nivel de energía. Cuando un cuerpo toma energía los electrones libres son excitados, saltando a niveles de mayor energía, y cuando retornan al nivel de equilibrio devuelven dicha diferencia de energía en forma de un fotón.

En toda superficie existen continuamente electrones que cambian de diferentes niveles, por lo que la energía radiante se emite en un abanico de frecuencias llamado espectro de la radiación. Cuando el origen de la radiación es el calor, la energía se emite en función solo de la temperatura y se denomina radiación térmica.

5.2. Transferencia por conducción

Es la forma que transmite el calor en cuerpos sólidos, se calienta un cuerpo, las moléculas que reciben directamente el calor aumenta su vibración y

chocan con las que rodean; éstas a su vez hacen lo mismo con sus vecinas hasta que todas las moléculas del cuerpo se agitan, por esta razón, si el extremo de una varilla metálica se calienta una flama, transcurre cierto tiempo para el calor llegue a otro extremo.

El calor no se transmite con la misma facilidad por todos los cuerpos, se llaman buenos conductores del calor, aquellos materiales que permiten el paso del calor a través de ellos.

Los malos conductores o aislantes son los que oponen mucha dificultad al paso del calor, aprovechando esta propiedad muchas vasijas para calentar líquidos se hacen aluminio

La conducción del calor significa transmisión de energía entre sus moléculas.

La transmisión del calor por contacto molecular se llama conducción.

La transmisión de calor por conducción puede realizarse en cualquiera de los tres estados de la materia: sólido líquido y gaseoso.

Para explicar el mecanismo físico de la conducción, se puede pensar en un gas en el que existe un gradiente de temperaturas y no hay movimiento global. El gas ocupa todo el espacio entre las dos superficies, se asocia la temperatura del gas en cualquier punto con la energía que poseen sus moléculas en las proximidades de dicho punto. Cuando las moléculas vecinas chocan ocurre una transferencia de energía desde las moléculas más energéticas a las menos energéticas. En presencia de un gradiente de

temperaturas la transferencia de calor por conducción debe ocurrir en el sentido de la temperatura decreciente, esto es en la dirección positiva del eje de las x .

En los líquidos la situación es muy similar que en los gases, aunque las moléculas están menos espaciadas y las interacciones son más fuertes y frecuentes.

En los sólidos la conducción se produce por cesión de energía entre partículas contiguas (vibraciones reticulares). En un sólido no conductor la transferencia de energía ocurre solamente por estas vibraciones reticulares, en cambio en los sólidos conductores se debe también al movimiento de traslación de los electrones libres.

La conducción en un medio material, goza pues de un soporte, que son sus propias moléculas y se puede decir que, macroscópicamente no involucra transporte de materia.

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura.

Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés, Joseph Fourier, dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de

conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida.

Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de ordenadores (computadoras) analógicos y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad, incluso para cuerpos de geometría complicada.

La conducción es el transporte de calor a través de una sustancia y tiene lugar cuando se ponen en contacto dos objetos a diferentes temperaturas. El calor fluye desde el objeto que está a mayor temperatura hasta el que la tiene menor. La conducción continúa hasta que los dos objetos alcanzan a la misma temperatura (equilibrio térmico).

Se entiende de la siguiente manera al tener en cuenta las colisiones de las moléculas. En la superficie de contacto de los dos objetos, las moléculas del objeto que tiene mayor temperatura, que se mueven más deprisa, colisionan con las del objeto que está a menor temperatura, que se mueven más despacio.

A medida que colisionan, las moléculas rápidas ceden parte de su energía a las más lentas. Éstas a su vez colisionan con otras moléculas contiguas. Este proceso continúa hasta que la energía se extiende a todas las moléculas del objeto que estaba inicialmente a menor temperatura. Finalmente, alcanzan toda la misma energía cinética y en consecuencia la misma temperatura.

Algunas sustancias conducen el calor mejor que otras. Los sólidos son mejores conductores que los líquidos y éstos mejor que los gases. Los metales son muy buenos conductores del calor, mientras que el aire es un mal conductor.

Cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, la experiencia muestra que hay una transferencia de energía desde la región a alta temperatura hacia la región de baja temperatura. Se dice que la energía se ha transferido por conducción y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura:

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad:

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

El signo menos se inserta para que se satisfaga el segundo principio de la termodinámica, es decir, el calor deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura.

La ecuación se le llama la ley de conducción de calor de Fourier que define la conductividad térmica. Este coeficiente se define, como el valor

numérico de la cantidad de calor que atraviesa una placa de espesor igual a la unidad de longitud y superficie, también unitaria perpendicular al flujo de calor, en la unidad de tiempo, cuando la temperatura de sus dos caras es de 1 °C la unidad del coeficiente expresada a partir de la caloría, es la kcal*m/m²h°C En el SI la unidad de conductividad es el J*m/m²s, que es lo mismo j/ms°k, la equivalencia entre ambas unidades viene dada por la expresión:

$$1 \text{ kcal/mh}^\circ\text{k} = 4186 \text{ J/m}^2 \cdot 3600 \text{ s}^\circ\text{k} = 1,16 \text{ J/ms}^\circ\text{k} = 1,16 \text{ W/m}^\circ\text{k}$$

En función de la magnitud de su coeficiente de conductividad puede establecerse si una determinada sustancia es un buen aislante o un buen conductor de calor. Los mejores aislantes son las sustancias de cuya composición no entran a formar parte los metales, tales como el cuero la madera, el vidrio y los diferentes tipos de plásticos. Así mismo, buenos aislantes los materiales de estructura porosa como el corcho, el serrín y el amianto. Por el contrario, los coeficientes de conductividad más elevados y, por consiguiente, los valores más adecuados de conductividad, los presentan los metales.

5.2.1. Ecuación general

La transferencia de energía o calor entre dos cuerpos diferentes por conducción o convección requiere el contacto directo de las moléculas de diferentes cuerpos, y se diferencian en que en la primera no hay movimiento macroscópico de materia, mientras que en la segunda sí lo hay. Para la materia ordinaria la conducción y la convección son los mecanismos principales en la materia fría, ya que la transferencia de energía térmica por radiación sólo representa una parte minúscula de la energía transferida. La transferencia de energía por radiación aumenta con la cuarta potencia de la temperatura (T^4),

siendo sólo una parte importante a partir de temperaturas superiores a varios miles de kelvin.

En la forma de transmitir el calor en cuerpos sólidos; se calienta un cuerpo, las moléculas que reciben directamente el calor aumentan su vibración y chocan con las que las rodean; éstas a su vez hacen lo mismo con sus vecinas hasta que todas las moléculas del cuerpo se agitan, por esta razón, si el extremo de una varilla metálica se calienta con una flama, transcurre cierto tiempo hasta que el calor llega al otro extremo. El calor no se transmite con la misma facilidad por todos los cuerpos. Existen los denominados buenos conductores del calor, que son aquellos materiales que permiten el paso del calor a través de ellos. Los malos conductores o aislantes son los que oponen mucha resistencia al paso de calor.

La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier. Establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección.

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

La convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La *convección* se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor

temperatura. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica, forzada o asistida).

En la transferencia de calor libre o natural un fluido es más caliente o más frío y en contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido.

La transferencia de calor por convección se expresa con la ley del enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{\text{inf}})$$

Donde:

h es el coeficiente de convección (ó *coeficiente de película*),

A_s es el área del cuerpo en contacto con el fluido,

T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo

y T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

Esta situación fue resuelta por el físico alemán, Max Planck. Los resultados de su trabajo fueron dados a conocer por él, el 19 de octubre de 1900 y, el 14 de diciembre del mismo año, dio explicación a la fórmula por él

obtenida, que lleva su nombre y que concuerda plenamente con los resultados experimentales de la radiación térmica para todos los rangos de longitudes de onda.

Para la obtención de su fórmula, Planck renunció a la teoría de la distribución uniforme de la energía por grados de libertad, a las ideas de la Física Clásica y a las concepciones de la continuidad de las magnitudes físicas (y en especial a la energía) y concluyó que en el proceso de la radiación térmica la energía es absorbida y/o emitida en forma discontinua, por cuantos de energía.

La idea de la discontinuidad no era nueva, ya que científicos de la talla de: Galileo, Newton, Faraday, Boltzman, Maxwell, etc., se basaban en ella al analizar la estructura de la sustancia, pero no la extendían a la interacción de muchas entidades materiales.

En resumen, Planck obtuvo una expresión que se denomina fórmula de Planck y tiene la forma que sigue:

$$r_{\lambda,T} = f(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \frac{\lambda^{-3}}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1}$$

5.2.2. Pared plana

La pared plana está constituida de un material que tiene conductividad térmica, es constante y no depende de posición o temperatura. El calor que se conduce a través de la pared de un cuarto donde la energía que se pierde a través de las aristas de la pared es despreciable, se puede modelar como una pared plana. Para un problema de este tipo la temperatura es función de x

únicamente, la única variable dependiente es la temperatura y la independiente es la posición x en la pared.

Un enfoque alternativo consiste en encontrar primero el flujo de calor y luego la distribución de temperatura, ya que se tienen condiciones de estado estacionario y Q es constante.

Considerar una placa delgada de cobre sumergida en un baño a temperatura constante igual a T infinito suponiendo que circula una corriente eléctrica a través de la placa, provocando con esto una generación de calor uniforme, q , por unidad de tiempo y volumen. El coeficiente conectivo de transferencia de calor en cada cara de la placa es el mismo, dando por resultado la temperatura T_w en ambas caras.

La distribución de la temperatura en una pared plana con fuente de calor, es la siguiente:

$$T - T_w = q/2k (L^2 - x^2)$$

La temperatura máxima de la pared viene dada por la siguiente fórmula:

$$T_c = T_w + qL^2 / 2k$$

5.2.3. Sistemas radiales

Se denomina radiación térmica o radiación calorífica a la emitida por un cuerpo debido a su temperatura. Todos los cuerpos con temperatura superior a 0 K emiten radiación electromagnética, siendo su intensidad dependiente de la temperatura y de la longitud de onda considerada. En lo que respecta a la transferencia de calor la radiación relevante es la comprendida en

el rango de longitudes de onda de $0,1 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$, abarcando por tanto, parte de la región ultravioleta, la visible y la infrarroja del espectro electromagnético.

La materia en un estado condensado (sólido o líquido) emite un espectro de radiación continuo. La frecuencia de onda emitida por radiación térmica es una densidad de probabilidad que depende sólo de la temperatura.

Los cuerpos negros emiten radiación térmica con el mismo espectro correspondiente a su temperatura, independientemente de los detalles de su composición.

A temperatura ambiente, se observa los cuerpos por la luz que reflejan, dado que por sí mismos no emiten luz. Si no se hace incidir luz sobre ellos, y no los ilumina, no pueden verse. A temperaturas más altas, se ven los cuerpos debido a la luz que emiten, pues en este caso son luminosos por sí mismos.

Así, es posible determinar la temperatura de un cuerpo de acuerdo a su color, pues un cuerpo que es capaz de emitir luz se encuentra a altas temperaturas.

Radiación: es la energía que emite la materia en la forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio. De hecho, este tipo de transferencia es la más rápida (se lleva a cabo a la velocidad de la luz) y no experimenta ninguna atenuación en el vacío. Este es exactamente el modo como la energía del sol llega a la tierra.

En los estudios de transferencia de calor, el interés se halla en la radiación térmica, que es la forma de radiación que emiten los cuerpos debido a su temperatura, y difiere de las otras formas de radiación electromagnética como los rayos X, gamma, microondas, ondas de radio y televisión que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura superior al cero absoluta emiten radiación térmica.

La radiación es un fenómeno volumétrico, y los sólidos, líquidos y gases, emiten, absorben o transmiten radiación de distintos grados. Sin embargo, la radiación es considerada en general, como un fenómeno de superficie para sólidos opacos a radiación térmica como los metales, la madera y las rocas, puesto que la radiación emitida por las regiones interiores de estos materiales nunca alcanza la superficie, mientras que la radiación que incide de esos cuerpos es absorbida comúnmente desde unas micras desde la superficie.

Otra propiedad de radiación importante de una superficie es la absorbencia, α , que es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie absorbida por ésta, y al igual que la emisividad, su valor ésta en el intervalo de 0 a 1. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide sobre él. Esto es, un cuerpo negro es tanto un absorvedor perfecto ($\alpha = 1$) como un emisor perfecto.

En general ϵ y α de una superficie dependen de la temperatura y la longitud de onda de la radiación. La ley de Kirchhoff de la radiación establece que la emisividad y la absorbencia de una superficie son iguales con las mismas temperatura y longitud de onda. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas se ignora la dependencia que ϵ y α tienen de la temperatura y la longitud de onda, por lo que la absorbencia promedio de la superficie se

considera igual a su emisividad promedio. La tasa a la que una superficie absorbe radiación se determina a partir de:

$$Q_{\text{abs}} = \alpha Q_{\text{insidente}}$$

Donde $Q_{\text{insidente}}$ es la tasa a la que la radiación incide sobre la superficie y α es la absorbencia de la superficie. En superficies opacas (no transparentes), la porción de la radiación incidente no absorbido se refleja.

La diferencia entre las tasas de radiación emitida por la superficie y de radiación absorbida es la transferencia neta del calor o radiación. Si la tasa de radiación absorbida es mayor que la de emisión de radiación, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De otro modo, se afirma que la superficie está perdiendo energía por radiación.

Determinar la tasa neta de transferencia de calor por radiación entre dos superficies generalmente es complicado, porque depende de las propiedades de las superficies, la orientación relativa entre ellas y la interacción del medio entre las superficies con la radiación.

Sin embargo, en el caso especial de una superficie relativamente pequeña de emisividad ϵ y de área superficial A a temperatura absoluta que es completamente encerrada por una superficie mucho más grande a temperatura absoluta, separada por un gas (como el aire), que no interfiere con la radiación (es decir, la cantidad de radiación emitida, absorbida o dispersada por el medio es insignificante), la tasa neta de transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se determina a partir de:

$$Q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{alrededores}}^4)$$

Para este caso especial, la emisividad y el área de la superficie circundante no tienen ningún efecto en la transferencia neta de calor por radiación.

Los sistemas cilíndricos y esféricos a menudo experimentan gradientes de temperatura sólo en la dirección radial, y por consiguiente se tratan como unidireccionales. Además, bajo condiciones de estado estacionario, sin generación de calor estos sistemas se pueden analizar usando la expresión de la ley de Fourier en las coordenadas adecuadas.

Considerar el cilindro hueco de la figura 7, cuyas superficie externa e interna se exponen a fluidos de diferentes temperaturas. Para condiciones de estado estacionario, sin generación interna de calor, la ley de Fourier en coordenadas cilíndricas se expresa como:

$$Q_r = -k A_r \frac{dT}{dr}$$

Siendo Q_r una constante en la dirección radial. Si se considera también la forma del área de transferencia para esta geometría, queda así:

$$Q_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr}$$

Donde $A_r=2\pi rL$ es el área normal a la dirección de transferencia de calor.

Escribiendo la ecuación anterior en término de integrales con las condiciones de frontera, $T(r_1)=T_{s,1}$ y $T(r_2)=T_{s,2}$, se obtiene:

$$\frac{Q_r}{2\pi L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = - \int_{T_{s,1}}^{T_{s,2}} k dT$$

Si considerando $k = \text{constante}$ al resolver queda:

$$Q_r = 2\pi Lk \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

También es posible obtener la distribución de temperaturas en la dirección radial en el cilindro, esto es:

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2}$$

En el caso de la pared cilíndrica, la distribución de temperaturas ya no es lineal, sino logarítmica.

De este resultado, es evidente que la resistencia térmica para la conducción radial es de la forma:

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$$

5.2.4. Resistencia en paredes en serie

El caso más sencillo de conducción es el que se establece en sólidos de caras paralelas de manera que el flujo será unidireccional, cuando dicho sólido

se encuentre en equilibrio termodinámico sin variar su temperatura en el tiempo, lo que se denomina régimen estacionario, y que implica que no existe acumulación de calor, que además, no existan fuentes o sumideros de calor en su seno, es decir, sin generación de calor.

El calor transmitido por conducción por unidad de tiempo y por unidad de superficie, es decir, el flujo de calor Q , es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx , siendo x la dirección del flujo y el área normal a éste. El coeficiente de proporcionalidad del flujo de calor es una propiedad física del medio, denominada conductividad térmica λ , de manera que

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dx} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

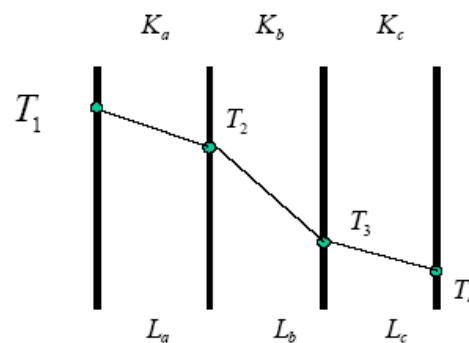
Esta ecuación expresa la ley de conducción de Fourier, donde el signo negativo indica que para existir un flujo de calor de dirección positiva se precisa un gradiente de temperatura negativo en dicha dirección, es decir, que la temperatura disminuye en dicha dirección.

La conductividad térmica λ es una propiedad física de cada sustancia, y puede variar ligeramente en función de la temperatura y de las características particulares del material, como puede ser el contenido de humedad de los materiales constructivos. En los casos que el material no sea homogéneo, como las fábricas de ladrillo, o que su estructura sea anisótropa, como es el caso de la madera, será preciso determinar la conductividad para la dirección del flujo considerado.

Paredes en serie: en la práctica se presentan paredes compuestas por diversos materiales, en la figura 18 se esquematiza una pared compuesta de tres materiales a,b,c dispuestas en serie.

En la figura 17 se presenta el circuito eléctrico análogo al problema térmico de las tres paredes conectadas en serie.

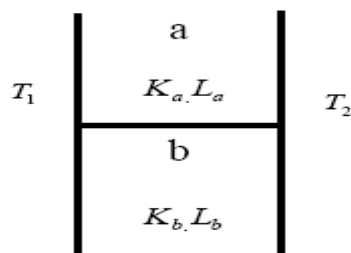
Figura 17. **Transferencia de calor en paredes en serie**



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 673 p.

Paredes compuestas conectadas en paralelo, a continuación se ilustra la situación de una pared compuesta formada por dos materiales, a, b que están conectadas en paralelo.

Figura 18 **Transferencia de calor en paredes en paralelo**



Fuente: YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2009. 678 p.

5.3. Transferencia por convección

En la convección, el calor es transportado directamente por sus soportes, lo que evidentemente se traduce en un movimiento de fluido. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica, forzada o asistida).

En la transferencia de calor libre o natural un fluido es más caliente o más frío y en contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido.

El fluido en movimiento que almacena el calor como aire caliente, vapor de agua, se denomina, comúnmente, fluido calefactor, en la medida en que el calor no es conducido, sino que simplemente es vehiculado por un fluido, la convección es un sistema de transferencia rápido.

Por regla general, concierne a la superficie externa de un sólido, razón por la cual se habla a menudo de transferencia externa o transferencia superficial;

sin embargo, puede aplicar también, a un fluido agitado en el interior de un recipiente.

Si el movimiento del fluido es reforzado por un trabajo mecánico como ventilación, agitación, bombeo de un líquido, se habla de convección forzada, si al contrario el movimiento del fluido es debido a corrientes térmicas, o a movimientos de ascensión durante la ebullición la convección se denomina natural.

5.3.1. Ecuación general

La velocidad de transporte obedece a la ley:

$$\dot{Q} = hA(T_{\infty} - T)$$

Los coeficientes de convección del aire varían ampliamente según las condiciones, fundamentalmente por su humedad y velocidad de desplazamiento.

Cambiando en la misma medida que de h, o por las variaciones de temperatura.

5.3.2. Condiciones de contorno

En termodinámica, los sistemas elegidos para su estudio presentan, usualmente, una especial simplicidad. Los sistemas que se estudian son, generalmente, aquellos cuyo estado queda perfectamente determinado por un terna de variables de estado. Por ejemplo, el estado de un gas puede ser descrito perfectamente con los valores de la presión que hay en el mismo, la temperatura que presenta y el volumen que ocupa. En esta clase de sistemas,

las variables no son absolutamente independientes, ya que existen ligaduras entre ellas que pueden ser descritas mediante ecuaciones de estado.

- Se considera entorno aquella parte del Universo que no es el sistema.
- Un sistema tiene múltiples maneras de intercambiar energía con el medio.
- Una de ellas puede ser mediante una transferencia neta de calor, aunque también se pueden considerar intercambios de tipo mecánico, en el que se tienen en cuenta las deformaciones del contorno donde se encuentra confinado el sistema
- Es importante entender la diferencia entre energía térmica y calor. El calor es una energía en tránsito, concretamente es la transferencia de energía que se da entre dos cuerpos que están en contacto directo, o casi, y que se encuentran a distintas temperaturas.
- Si no se tienen en cuenta los intercambios de materia que pueden tener lugar como consecuencia de la llegada de los asteroides o meteoritos que llegan a su superficie.
- Como puede comprobarse, no existen restricciones sobre el tamaño del sistema. El sistema puede ser, inclusive el propio Universo.

Solamente se estudian los sistemas en equilibrios, los cuales vienen caracterizados por los valores que toman sus variables termodinámicas, que a su vez estarán relacionadas entre sí por las denominadas ecuaciones de estado. Un sistema puede requerir para su completa caracterización de

múltiples variables, pero para muchos sistemas sencillos son suficientes tres variables únicamente, siendo siempre la temperatura una de ellas.

Considerando el sistema formado por un gas encerrado en un cilindro por un pistón, que puede desplazarse sin rozamiento. Suponiendo que la presión en el interior del pistón, es decir en el sistema, y en el exterior, el entorno, es la misma. Por tanto, al ser el área del pistón la misma por ambos lados, las fuerzas que actúan sobre el pistón serán iguales y de sentido opuesto, encontrándose éste en equilibrio mecánico.

Si se aumenta una cantidad infinitesimal la presión en el exterior, se producirá un desequilibrio infinitesimal de fuerzas, de tal forma que el pistón se moverá hacia la derecha una distancia infinitesimal, dx , disminuyendo el volumen del sistema y aumentando la presión del mismo hasta que se iguale con la exterior, (temperatura constante). Durante este proceso, que ocurre a una velocidad infinitesimal, el sistema estará infinitesimalmente próximo al equilibrio.

El pistón, que pertenece al entorno, ha ejercido una fuerza, F_x , sobre la materia del sistema en la frontera sistema pistón, de modo que esta materia se ha movido una distancia dx . El entorno, por tanto, ha realizado un trabajo sobre el sistema. La fuerza aplicada por el pistón sobre el sistema se puede expresarla en función de la presión: $F = P/A$. Además, el volumen del cilindro es:

$$V = A \cdot L = A (b - x) \quad \Rightarrow dV = - A dx$$

$$\text{Y por tanto: } dW_{\text{rev}} = P A dx = - PdV$$

En el caso de que el sistema no se comprima sino que se expanda, es decir, se disminuye la presión exterior creando un proceso reversible o cuasi-estático, que es aquel que se realiza mediante un número infinito de etapas, cada una de las cuales está sólo infinitesimalmente alejada del equilibrio. En estos procesos reversibles no aparecen pérdidas o disipaciones de la energía debidas a fenómenos de rozamiento, etc., realizándose el mismo trabajo en el medio, aunque de signo contrario, que el que el medio realizaría sobre el sistema en el proceso contrario.

Por lo tanto, al finalizar un proceso reversible tanto el sistema como el medio ambiente, pueden ser reintegrados a sus estados iniciales, sin ocasionar ningún cambio en el medio ambiente. Si no se cumple la condición de que el sistema, en cada estado intermedio del proceso, esté en equilibrio virtual con su medio ambiente y de que en el proceso no aparezcan efectos disipativos de energía, el proceso corresponderá a una transformación irreversible.

Un aspecto de especial importancia, es que el trabajo realizado sobre un sistema en un proceso irreversible al ir del estado 1 al 2, dependerá de la trayectoria seguida en el proceso; y lo mismo ocurre con el calor intercambiado por un sistema con su entorno en el transcurso del proceso. Esto supone que el trabajo y el calor no son funciones de estado.

Una función de estado es toda magnitud del sistema cuyo valor depende únicamente del estado equilibrio, y su incremento de los estados inicial y final, y no de la forma en que se ha pasado de uno a otro. Por lo dicho, resulta claro que todas las magnitudes termodinámicas que permiten especificar el estado de equilibrio de un sistema (T, P, V, etc.) han de ser funciones de estado.

Los motores de explosión, también denominados motores de ignición por chispa, son motores de combustión interna en los que la combustión de la mezcla, provocada por una chispa eléctrica, es prácticamente instantánea; por tal motivo el proceso de combustión puede considerarse a volumen constante.

El típico motor de explosión es el de gasolina de cuatro tiempos, que consta en esencia, de un cilindro con pistón, en cuyo interior se produce la combustión, una válvula de admisión, que regula la entrada de la mezcla combustible procedente del carburador, una bujía, que suministra la chispa de encendido, y una válvula de escape, que permite la oportuna salida de los gases producto de la combustión. El ciclo que se lleva a cabo en este tipo de motores supone la realización de 6 procesos, de los cuales 4 requieren movimiento de pistón y se denominan carreras.

En todos los procesos del ciclo se producen diversos fenómenos (rozamientos, disipaciones de calor, reacción incompleta, etc.) que hace prácticamente imposible un estudio matemático exacto del mismo. Esto hace que, para su estudio se deban suponer condiciones ideales que simplifican el problema. El ciclo teórico al que puede asimilarse el funcionamiento del motor de gasolina ideal recibe el nombre de ciclo de Otto, en el que se introducen las siguientes aproximaciones:

- Se desprecian los rozamientos.
- Todos los procesos se consideran cuasiestáticos o reversibles.
- Se supone el comportamiento de la sustancia de trabajo asimilable a un gas ideal con capacidades caloríficas, que se mantienen constantes a lo largo del ciclo.

El cociente V_1/V_2 se nota por r y se denomina razón de compresión de mezcla. En principio, se podría mejorar el rendimiento aumentando la relación de compresión R ; sin embargo, existe un límite por encima del cual no puede elevarse el valor de R , ya que a presión y la temperatura elevadas la mezcla de carburante y aire explota antes de que salte la chispa, y se dice que se alcanza el nivel de autoignición. Para lograr alcanzar valores de R de hasta 10 es necesario añadir al combustible sustancias antidetonantes que eviten la autoignición.

En general, los rendimientos de los motores de explosión suelen ser relativamente bajos debido a una serie de factores como son:

- La combustión no suele ser completa, y siempre se produce algo de monóxido de carbono.
- Existe un intercambio de calor entre los gases y las paredes, lo que obliga a refrigerar el cilindro, y como consecuencia de ello, las líneas de compresión 1 – 2 y la de expansión 3 – 4 no son adiabáticas.
- La combustión en 2 – 3 no se verifica a volumen constante y tiene lugar con un pequeño aumento de volumen.

Todo esto se traduce en que el diagrama real del ciclo de Otto difiere bastante del teórico.

El motor de cuatro tiempos descrito viene caracterizado por una serie de parámetros, tales como el diámetro del cilindro, la carrera del pistón, el volumen de la cámara de combustión y el régimen de giro del motor. El diámetro o

calibre, D ; es el diámetro interior del cilindro medido en mm; la carrera, S , es el espacio que recorre el pistón entre el PMS y el PMI, expresado también en mm; el volumen de la cámara de combustión V_c es el volumen que ocupa la mezcla cuando el pistón está en el PMS en la fase de compresión; el régimen de giro del motor, n , es el número de rev/min a que gira el motor.

A partir de estos parámetros pueden determinarse otros como la relación carrera-diámetro: (S/D) ; la cilindrada unitaria: V_D , que es el volumen comprendido entre PMS y PMI; la cilindrada total: V_T , que es el producto de la cilindrada unitaria por el número de cilindros del motor: Z ; y la relación volumétrica de compresión: r .

$$V_D = \frac{\pi D^2 S}{4000} \quad V_T = Z \cdot V_D \quad r = \frac{V_D + V_C}{V_C}$$

El rendimiento del ciclo de Otto, que sirve de base al funcionamiento de los motores de explosión, se ha visto que viene limitado por la relación de compresión a la cual se produce la autoignición. Sin embargo, si se comprime sólo aire y tras la compresión se introduce un combustible adecuado, se puede obtener rendimientos más altos. Este es el fundamento de los motores diesel, en los que si la compresión es elevada, se produce la autoignición teniendo lugar en vez de la explosión, una combustión progresiva.

Al igual que los motores Otto, los motores diesel son de cuatro tiempos o carreras, teniendo que considerar en total seis procesos.

- Admisión: el pistón desciende desde el PMS, arrastrado por el cigüeñal, y como consecuencia se produce una depresión en el interior del cilindro que provoca la entrada de aire a través de la válvula de admisión. Cuando

el pistón llega al PMI, concluye la primera carrera, el cigüeñal habrá girado 180° y la válvula de admisión se cierra (tramo 0 – 1).

- **Compresión:** el pistón asciende desde el PMI hasta el PMS, permaneciendo las válvulas cerradas. El aire se comprime de forma adiabática hasta una elevada presión y temperatura. Cuando el pistón alcanza el PMS se concluye la segunda carrera (tramo 1 – 2). En el punto 3 se introduce el combustible a una elevada presión ($\sim 70\text{atm}$) de forma controlada con lo que la mezcla se inflama a presión constante, produciéndose un avance del pistón (tramo 2 – 3).
- **Expansión:** cuando el pistón a avanzado un décimo de su carrera cesa la inyección de combustible y los gases se expansionan adiabáticamente y obligan al pistón a desplazarse bruscamente hasta el PMI, arrastrando al cigüeñal que realizará un trabajo útil. En el momento que el pistón alcanza el PMI concluye la tercera carrera (tramo 3 – 4).
- **Escape:** al llegar el pistón al PMI se abre la válvula de escape para permitir la salida de los gases de combustión, disminuyendo la presión hasta la atmosférica (tramo 4 – 1). El pistón vuelve a ascender hasta el PMS arrastrado por el cigüeñal, concluyendo la cuarta carrera (tramo 1 – 0), momento en que se abre la válvula de admisión dando comienzo un nuevo ciclo.

Al igual que para el motor de gasolina, es preciso despreciar una serie de efectos perturbadores que acontecen realmente durante el proceso con el fin de poder asimilar el ciclo real a uno ideal, cuyo rendimiento puede ser calculado por procedimientos termodinámicos. Este ciclo simplificado recibe el nombre de ciclo diesel.

Al igual que en el ciclo de Otto, se puede evaluar el rendimiento del ciclo teórico, haciendo uso de las relaciones termodinámicas, obteniéndose finalmente el siguiente resultado:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{\gamma T_2} \left[\frac{(V_3/V_2)^\gamma - 1}{(V_3/V_2) - 1} \right] \Rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{r_e^{\gamma-1}} \left[\frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)} \right]$$

Donde se han introducido las relaciones de compresión $r_e = V_1/V_2$, y de combustión $r_c = V_3/V_2$.

El factor encerrado entre corchetes es siempre mayor que uno, pues r_c es mucho mayor que la unidad.

Por lo que, comparando las expresiones del rendimiento de un ciclo Otto y otro diesel, se concluye que el rendimiento del primero es mayor que el del segundo para una misma relación de compresión.

Al igual que el ciclo de Otto, el ciclo real de Diesel difiere notablemente del ideal, debido a que la combustión no se realiza a presión constante, la expansión de 3 a 4 no es adiabática y el proceso de escape (4 – 1) tampoco se lleva a cabo a volumen constante.

Al comparar el motor de diesel con uno de explosión se podrán establecer las siguientes ventajas: mayor rendimiento térmico, menor consumo, mayor duración del motor y menor contaminación de los gases de escape. Sin embargo, presenta los siguientes inconvenientes: motor más pesado, mayor coste de fabricación y mayor ruido por las explosiones de la combustión.

Tanto en el caso del motor de explosión como en el de combustión, se puede incrementar la potencia desarrollada por los mismos mediante la sobrealimentación. La sobrealimentación consiste en aumentar la cantidad de mezcla admitida en el cilindro con respecto a la que entraría por efecto del simple movimiento del émbolo durante el período de admisión. Esto se consigue aumentando la presión del aire o de la mezcla a la entrada del cilindro. Para ello se intercala en el circuito de entrada de un compresor accionado por una turbina movida por los gases de escape, que habrán pasado previamente a través de un intercambiador de calor.

5.3.3. Coeficiente global de transferencia

La transferencia de calor es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura.

El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

Conducción: en los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura.

En 1822, el matemático francés Joseph Fourier, dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo.

Convección: si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección.

El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Radiación: es la transferencia de calor en forma de energía electromagnética por el espacio. La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío.

La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única

explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica.

Coefficiente de transferencia de calor es un término que relaciona las propiedades termodinámicas de un fluido con las resistencias que existen al flujo de calor en un intercambiador de calor.

Cuando la superficie de un sólido se pone en contacto con un fluido que se encuentra a diferente temperatura, el flujo de calor transferido por convección puede expresarse en función de la diferencia global de temperatura entre la superficie del sólido y el área, A , de la superficie, mediante la ley de Newton de enfriamiento:

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

Donde:

h es el coeficiente de transferencia de calor por convección o coeficiente de película

T_s y T_∞ son, respectivamente, las temperaturas de la superficie de la pared en contacto con el fluido y la temperatura del fluido en un punto alejado de la pared.

Por otro lado, el flujo de calor por conducción a través de un sólido en el que existe un gradiente de temperatura, viene dado por la ley de Fourier de la conducción:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde k es la conductividad térmica del material,

A , el área a través de la que se produce la conducción
 ydT/dx , el gradiente de temperatura en la dirección de propagación del calor.

Para el caso particular de conducción unidimensional, en régimen estacionario, a través de una pared plana, de conductividad térmica constante y

$$q = \frac{k}{L}(T_i - T_e)$$

uniforme y en la que se mantiene una temperatura constante y uniforme en cada una de las caras de la pared, la transferencia de calor por conducción viene dada por:

Siendo L el espesor de la pared y

$T_1 - T_2$ es la diferencia de temperaturas entre la cara de la pared más caliente y la cara más fría, de forma que $T_1 > T_2$.

Para cada uno de los mecanismos de transmisión de calor analizados, por analogía eléctrica con la ley de Ohm, se puede definir una resistencia térmica:

$$R_k = 1/(hA) \text{ para la convección}$$

$$R_k = L/(kA) \text{ para la conducción}$$

Esto facilita el estudio de sistemas de transmisión compuestos. Así, en el caso particular de la pared plana de la figura anterior, en contacto con un fluido caliente por una cara y con otro más frío por la otra cara, se tiene que el flujo de energía térmica q se realiza mediante una combinación de los mecanismos de conducción y convección, pudiéndose expresar la transferencia de calor:

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_1}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{kA}} = \frac{T_2 - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_2 A}}$$

Combinando estas ecuaciones, la transferencia de calor global por unidad de tiempo puede expresarse como:

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{eq}} \quad \text{o bien} \quad q = UA(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})$$

Siendo R_{eq} la resistencia térmica equivalente del sistema que, en este caso, es la suma de las resistencias térmicas, ya que se encuentran en serie:

$$R_{eq} = \sum R_i = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}$$

y U, el coeficiente global de transferencia de calor:

$$U = \frac{1}{R_{eq} A}$$

5.3.4. Aislamiento térmico

Los materiales de aislamiento térmico se emplean para reducir el flujo de calor entre zonas calientes y frías. Por ejemplo, el revestimiento que se coloca frecuentemente alrededor de las tuberías de vapor o de agua caliente reduce las pérdidas de calor, y el aislamiento de las paredes de una nevera o refrigerador reduce el flujo de calor hacia el aparato y permite que se mantenga frío.

El aislamiento térmico puede cumplir una o más de estas tres funciones: reducir la conducción térmica en el material, que corresponde a la transferencia de calor mediante electrones; reducir las corrientes de convección térmica que pueden establecerse en espacios llenos de aire o de líquido, y reducir la transferencia de calor por radiación, que corresponde al transporte de energía térmica por ondas electromagnéticas. La conducción y la convección no tienen lugar en el vacío, donde el único método de transferir calor es la radiación. Si se emplean superficies de alta reflectividad, también se puede reducir la radiación.

Por ejemplo, puede emplearse papel de aluminio en las paredes de los edificios. Igualmente, el uso de metal reflectante en los tejados reduce el calentamiento por el sol.

El aire presenta unas 15,000 veces más resistencia al flujo de calor que un buen conductor térmico como la plata, y unas 30 veces más que el vidrio. Por eso, los materiales aislantes típicos suelen fabricarse con materiales no metálicos y están llenos de pequeños espacios de aire. Algunos de estos materiales son el carbonato de magnesio, el corcho, el fieltro, la guata, la fibra mineral o de vidrio y la arena de diatomeas. El amianto se empleó mucho como aislante en el pasado, pero se ha comprobado que es peligroso para la salud y ha sido prohibido en los edificios de nueva construcción de muchos países.

En los materiales de construcción, los espacios de aire proporcionan un aislamiento adicional; así ocurre en los ladrillos de vidrio huecos, las ventanas con doble vidrio (formadas por dos o tres paneles de vidrio con una pequeña cámara de aire entre los mismos) y las tejas de hormigón (concreto) parcialmente huecas. Las propiedades aislantes empeoran si el espacio de aire es suficientemente grande para permitir la convección térmica, o si penetra humedad en ellas, ya que las partículas de agua actúan como conductores. Por

ejemplo, la propiedad aislante de la ropa seca es el resultado del aire atrapado entre las fibras; esta capacidad aislante puede reducirse significativamente con la humedad.

Los costes de calefacción y aire acondicionado en las viviendas pueden reducirse con un buen aislamiento del edificio. En los climas fríos se recomiendan unos 8 cm de aislamiento en las paredes y entre 15 y 20 cm de aislamiento en el techo.

Recientemente se han desarrollado los llamados superaislantes, sobre todo para su empleo en el espacio, donde se necesita protección frente a unas temperaturas externas cercanas al cero absoluto. Los tejidos superaislantes están formados por capas múltiples de mylaraluminizado, cada una de unos 0,005 cm de espesor, separadas por pequeños espaciadores, de forma que haya entre 20 y 40 capas por centímetro.

El sistema de aislamiento térmico demostrable de turbinas de vapor, tuberías, válvulas y equipos diversos, comprende la disposición de un envolvente constituida por tramos o porciones flexibles a modo de colchonetas de pequeño espesor, cada una de las cuales comprende un recubrimiento laminar flexible e incombustible y relleno de material aislante y que se disponen consecutivamente unidas entre sí por un hilo inoxidable en puntos de unión y fijadas al equipo que se aísla mediante pernos o vástagos anclados al equipo, que atraviesan las colchonetas y reciben en la porción que sobresale de las mismas una tuerca o arandela de retención. Las colchonetas están dotadas de elementos para impedir el desplazamiento del relleno aislante y de elementos para la fijación entre colchonetas consecutivas.

5.4. Transferencia por radiación

La energía del Sol puede a través de la atmósfera y calentar la superficie de la Tierra. Esta energía no se transfiere a través de la atmósfera por conducción, pues el aire es uno de los peores conductores. Tan poco se transfiere por convección, pues esto es imposible en el espacio vacío, si la conducción y la convección son imposibles, la energía térmica debe estar transmitiéndose por otro proceso. Este proceso se llamara diación.

Toda energía que se transmite por radiación, incluyendo la energía térmica, se llama energía radiante. La energía radiante se presenta en forma de ondas electromagnéticas. Esta comprende: las ondas de radio, las microondas, la radiación infrarroja, la luz visible, la radiación ultra violeta, los rayos X y los rayos gamma.

Todos los objetos emiten sin cesar energía radiante con una mezcla de longitudes de onda. Los cuerpos a bajas temperaturas emiten ondas largas. Los que se encuentran a temperatura se levadas lo hacen con longitud de onda menor. Los cuerpos que se encuentran a temperatura ambiente, emiten ondas que corresponden principalmente al extremo de grandes longitudes de onda de la región infrarroja, que se encuentra entre las ondas de radio y las ondas de luz. La sensación de calor se debe a ondas infrarrojas que la piel absorbe. Así pues, cuando se dice radiación calorífica se está hablando de radiación infrarroja.

Cuando un objeto está lo bastante caliente, una parte de la energía radiante que emite está en la región de la luz visible. Un objeto a unos 500° C empieza a emitir luz roja. Si la temperatura se eleva el cuerpo emite una luz amarillenta. Al llegara 1200°C, el objeto emite todas las longitudes de onda que

el ojo puede percibir, y nos parece que está al rojo blanco.

El ritmo mediante el cual un cuerpo radia energía térmica es proporcional al área del cuerpo y a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Este resultado obtenido empíricamente por Josef Stefanen 1879 y deducida teóricamente por Ludwig Boltzmann cinco años más tarde, se denomina ley de Stefan-Boltzmann, se escribe en la forma:

5.4.1. Ecuación general

Si la temperatura absoluta de un cuerpo no difiere mucho de la de sus alrededores, la potencia neta radiada es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura, esto puede deducirse si se tiene en cuenta la constante recibe el nombre de constante de radiación, y es la cantidad de calor radiada en un segundo por cada unidad de superficie cuando la temperatura excede en un grado a la del ambiente. La expresión anterior para el calor radiado, es la que se puede encontrar con más frecuencia, en los textos de Termotecnia.

5.4.2. Intercambio por radiación

La energía radiante es una forma de la energía en tránsito que de acuerdo a la teoría electromagnética de Maxwell consiste en un campo eléctrico y magnético oscilante en fase capaz de propagarse en el vacío a cuerpos transparentes. Se caracteriza por una longitud de onda λ y una frecuencia f siendo:

$$f = c$$

En el espectro de radiaciones electromagnéticas, la zona de las radiaciones visibles es muy restringida.

Cuando la radiación incide sobre un cuerpo, parte puede ser reflejada, otra absorbida y otra transmitida. En los cuerpos sólidos esta última parte es frecuentemente nula.

Un cuerpo (sólido, líquido o gaseoso) a temperatura superior a 0 K emite radiaciones de diferente longitud de onda e intensidad.

El espectro de las radiaciones no es continuo, sino que se caracteriza por bandas en determinadas frecuencias características para cada material. Esto fue explicado por Bohr mediante su modelo atómico, en el que postula que cada átomo tiene una serie de espectro cuya energía tiene un valor definido.

Cada átomo puede emitir o absorber radiaciones emitiendo o absorbiendo una cantidad de energía igual a la diferencia entre los valores correspondientes a dos estados estacionarios del mismo, denominado cuanto o quantum.

Resulta pues que el cuanto no es un valor constante, sino que depende de los valores de los niveles energéticos de los diferentes átomos en sus estados estacionarios.

De acuerdo a Plank, el cuanto, o cantidad de energía que un átomo emite, es proporción a la frecuencia de la radiación emitida (fotón).

$$E=hf$$

5.4.2.1. Cuerpos negros

Es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite luz y constituye un modelo ideal físico, para el estudio de la emisión de radiación electromagnética.

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de todos los cuerpos negros.

- Esta energía se denomina radiante y es transportada por las ondas electromagnéticas.
- Las ondas de radio, radiaciones infrarrojas, luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma, constituyen las distintas regiones del espectro electromagnético.
- Las ondas electromagnéticas viajan en el vacío a la velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s y transportan energía radiante.
- Cuando inciden sobre la superficie de un cuerpo, en parte son reflejadas y el resto transmitidas.

Sobre la superficie de un cuerpo incide constantemente energía radiante, tanto desde el interior como desde el exterior, la que incide desde el exterior procede de los objetos que rodean al cuerpo. Cuando la energía radiante incide sobre la superficie, una parte se refleja y la otra parte se transmite.

Tomando en cuenta la energía radiante que incide desde el exterior sobre la superficie del cuerpo: si la superficie es lisa y pulimentada, como la de un espejo, la mayor parte de la energía incidente se refleja, el resto atraviesa la superficie del cuerpo y es absorbido por sus átomos o moléculas.

Si r es la proporción de energía radiante que se refleja, y a la proporción que se absorbe, se debe de cumplir que $r + a = 1$.

La misma proporción r de la energía radiante que incide desde el interior se refleja hacia dentro, y se transmite la proporción $a = 1 - r$ que se propaga hacia afuera y se denomina por tanto, energía radiante emitida por la superficie.

El comportamiento de la superficie de un cuerpo que refleja una pequeña parte de la energía incidente. Las anchuras de las distintas bandas corresponden a cantidades relativas de energía radiante incidente, reflejada y transmitida a través de la superficie.

Comparando ambas figuras, se observa que un buen absorbente de radiación es un buen emisor, y un mal absorbente es un mal emisor. También se puede decir, que un buen reflector es un mal emisor, y un mal reflector es un buen emisor.

Una aplicación práctica está en los termos utilizados para mantener la temperatura de los líquidos como el café. Un termo tiene dobles paredes de vidrio, habiéndose vaciado de aire el espacio entre dichas paredes para evitarlas pérdidas por conducción y convección. Para reducir las pérdidas por radiación, se cubren las paredes con una lámina de plata que es altamente reflectante y por tanto, mal emisor y mal absorbente de radiación.

La superficie de un cuerpo negro es un caso límite, en el que toda la

energía incidente desde el exterior es absorbida, y toda la energía incidente desde el interior es emitida.

No existe en la naturaleza un cuerpo negro, incluso el negro de humo refleja el 1% de la energía incidente. Sin embargo, un cuerpo negro se puede sustituir con gran aproximación por una cavidad con una pequeña abertura.

La energía radiante incidente a través de la abertura, es absorbida por las paredes en múltiples reflexiones y solamente una mínima proporción escapa (se refleja) a través de la abertura. Por tanto se puede decir, que toda la energía incidente es absorbida.

Tomar en cuenta una cavidad cuyas paredes están a una cierta temperatura. Los átomos que componen las paredes están emitiendo radiación electromagnética y al mismo tiempo absorben la radiación emitida por otros átomos de las paredes. Cuando la radiación encerrada dentro de la cavidad alcanza el equilibrio con los átomos de las paredes, la cantidad de energía que emiten los átomos en la unidad de tiempo es igual a la que absorben. En consecuencia, cuando la radiación dentro de la cavidad está en equilibrio con las paredes, la densidad de energía del campo electromagnético es constante.

A cada frecuencia corresponde una densidad de energía que depende solamente de la temperatura de las paredes y es independiente del material del que están hechas.

Si se abre un pequeño agujero en el recipiente, parte de la radiación se escapa y se puede analizar. El agujero se ve muy brillante cuando el cuerpo está a alta temperatura, y se ve completamente negro a bajas temperaturas.

Históricamente, el nacimiento de la Mecánica Cuántica, se sitúa en el momento en el que Max Planck explica el mecanismo que hace que los átomos radiantes produzcan la distribución de energía observada. Max Planck sugirió en 1900 lo siguiente:

- La radiación dentro de la cavidad está en equilibrio con los átomos de las paredes que se comportan como osciladores armónicos de frecuencia ν .
- Cada oscilador puede absorber o emitir energía de la radiación en una cantidad proporcional a ν . Cuando un oscilador absorbe o emite radiación electromagnética, su energía aumenta o disminuye en una cantidad $h\nu$.

La segunda hipótesis de Planck establece que la energía de los osciladores está cuantizada. La energía de un oscilador de frecuencia ν sólo puede tener ciertos valores que son $0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots, nh\nu$.

Se denomina $u(\nu) d\nu$ la densidad de energía correspondiente a la radiación cuyas frecuencias están comprendidas entre ν y $\nu+d\nu$. Se ha comprobado experimentalmente, desde finales del siglo pasado que la variación observada de $u(\nu)$ con la frecuencia ν presenta un máximo a cierta frecuencia y que dicha frecuencia se incrementa con el aumento de la temperatura. Esto explica el cambio de color de un cuerpo a medida que se aumenta su temperatura.

5.4.2.2. Cuerpo gris

Los objetos reales nunca se comportan como cuerpos negros ideales. En su lugar, la radiación emitida a una frecuencia dada es una fracción de la

emisión ideal. La emisividad de un material específica, cuál es la fracción de radiación de cuerpo negro que es capaz de emitir el cuerpo real. La emisividad puede ser distinta en cada longitud de onda y depende de factores tales como la temperatura, condiciones de las superficies (pulidas, oxidadas, limpias, sucias, nuevas o intemperizadas, etc.) y ángulo de emisión. En algunos casos resulta conveniente suponer que existe un valor de emisividad constante para todas las longitudes de onda, siempre menor que 1 (que es la emisividad de un cuerpo negro).

Esta aproximación se denomina aproximación de cuerpo gris. La Ley de Kirchhoff indica que la emisividad es igual a la absorptividad de manera que un objeto que no es capaz de absorber toda la radiación incidente, también emite menos energía que un cuerpo negro ideal.

La ley de Kirchhoff podría ser suficiente para calcular el intercambio de calor por radiación entre dos cuerpos, pues proporciona un modo de evaluarla absorptividad.

5.5. Intercambiadores de calor

En los sistemas mecánicos, químicos, nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un lugar a otro, o bien, de un fluido a otro. Los intercambiadores de calor son los dispositivos que permiten realizar dicha tarea. Un entendimiento básico de los componentes mecánicos de los intercambiadores de calores necesario para comprender cómo estos funcionan y operan para un adecuado desempeño.

El objetivo de esta sección es presentar los intercambiadores de calor como dispositivos que permiten remover calor de un punto a otro de manera

específica en una determinada aplicación. Se presentan los tipos de intercambiadores de calor en función del flujo: flujo paralelo; contra flujo; flujo cruzado.

Además se analizan los tipos de intercambiadores de calor con base en su construcción: tubo y carcasa; placas, y se comparan éstos. Se presentan también los intercambiadores de paso simple, de múltiples pasos, intercambiador de calor regenerador e intercambiador de calor no regenerativo. Al final se incluyen algunas de las posibles aplicaciones de los intercambiadores de calor. Como se ha mencionado, un intercambiador de calor es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido. Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante uno con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante uno con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante uno con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de uno frío.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura.

Debe quedar claro que la función de los intercambiadores de calor es la transferencia de éste, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. Se debe tener en mente que el calor sólo se transfiere

en una sola dirección, del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura. En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan.

Sin embargo, el tipo de intercambiadores de placa no se utiliza extensamente debido a la inhabilidad de sellar confiablemente las juntas entre cada una de las placas. Debido a este problema, el tipo intercambiador de la placa se ha utilizado solamente para aplicaciones donde la presión es pequeña o no muy alta, por ejemplo en los refrigeradores de aceite para máquinas.

Tipos de intercambiadores de calor según su operación: existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa ambos fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y éstos presentan una diferencia de temperatura significativa.

Se presenta un contra flujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos, ya que el de menor temperaturas al en contra flujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el de mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada.

En el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de ellos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90° . Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usados donde uno de

los fluidos presenta cambio de fase, y por tanto, se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásico.

Un método que combina las características de dos o más intercambiadores y permite mejorar el desempeño de un intercambiador de calor es tener que pasar los dos fluidos varias veces dentro de un intercambiador de paso simple. Cuando los fluidos del intercambiador intercambian calor más de una vez, se denomina intercambiador de múltiple paso.

Los intercambiadores de calor también pueden ser clasificados por su función en un sistema particular. Una clasificación común es:

- Intercambador regenerativo
- Intercambiador no regenerativo

CONCLUSIONES

- De acuerdo al programa actual del curso de Termodinámica 2, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se ha realizado la siguiente propuesta de texto paralelo de estudio, quedando a discreción del catedrático el apoyo de la misma, para impartir el curso.
- Siendo una herramienta primaria se pretende esclarecer cualquier tipo de duda que el estudiante presente a lo largo del curso de Termodinámica 2 a través de la presente propuesta.
- Quedando a disposición de las autoridades de la Escuela de Ingeniería Mecánica, su incorporación a la plataforma de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para nuevas tendencias educativas como los cursos virtuales.

RECOMENDACIONES

1. Los avances de cualquier campo de la ingeniería sugieren la actualización de forma constante para que los conocimientos adquiridos en el curso de Termodinámica 2, no se vuelvan anticuados y poco productivos, por lo que se sugiere la realización de capacitaciones constantes en cualquier medio de difusión.
2. Sólo la práctica lleva consigo la mejora continua, por esa razón se exhorta a ser profesionales de campo y observar directamente los focos de saturación o problemas industriales, para tener un enfoque más completo.
3. Por último, se hace énfasis en la creación de un laboratorio de prácticas para Termodinámica, y sus aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. ESPINOLA, Thomas P. *Introducción a la termodinámica*. Estados Unidos: Brown, 2002. 147 p.
2. MART, Martin. *Elementos de termodinámica*. Estados Unidos: Prentice-Hall, 2000. 347 p.
3. SEARS, Francis Weston. *Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística*. 3a ed. Argentina: Adisson-Wesley, 1995. 383 p.
4. WARK, Kenneth. *Termodinámica*. 6a ed. Mexico: McGraw-Hill, 2007. 587 p.
5. YUNUS A., Cengel. *Termodinámica*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1011 p.

