



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**MEDIOS VISUALES COMO APOYO EN EL PROCESO DE
ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DEL CURSO TRANSFERENCIA DE CALOR**

**AURA ESTELA RUANO LEÓN
Asesorado por Ing. Julio Alberto Rivera Palacios**

Guatemala, septiembre de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEDIOS VISUALES COMO APOYO EN EL PROCESO DE
ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DEL CURSO TRANSFERENCIA DE CALOR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

AURA ESTELA RUANO LEÓN
ASESOR ING. JULIO ALBERTO RIVERA PALACIOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Edgar Adolfo Reynoso Enríquez
EXAMINADOR	Ing. José Eduardo Calderón García
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

MEDIOS VISUALES COMO APOYO EN EL PROCESO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DEL CURSO TRANSFERENCIA DE CALOR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de mayo de 2004.

Aura Estela Ruano León

AGRADECIMIENTOS

A Dios, infinitas gracias por estar siempre a mi lado y llenarme de tantas bendiciones.

A mi madre y hermanos, estas palabras nunca bastarán para agradecerles los ánimos que siempre me han dado, por estar a mi lado en todo momento y por la confianza que han tenido en mí.

A mi novio, Carlos, gracias por todo tu apoyo, tu increíble ayuda y motivarme a ser mejor cada día.

A mis padrinos, muchas gracias por su apoyo y por estar pendientes de mí en todo momento.

A mis amigos Patty, Bea, Julio y Marito, por darme siempre palabras de aliento y demostrarme que puedo contar con ustedes.

A la Escuela de Ingeniería Química y todos mis catedráticos, como reconocimiento a su labor docente.

Al ingeniero Julio Rivera, muchas gracias por crear la idea de este trabajo de graduación y asesorarme en el mismo.

A la ingeniera Lisely de León, por su valiosa ayuda durante mi carrera y en la revisión de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

NOMENCLATURA	VII
OBJETIVOS	IX
RESUMEN	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. TECNOLOGÍA EDUCATIVA	1
1.1 Antecedentes	1
2. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	5
2.1 Calor	5
2.2 Transferencia de calor y termodinámica	5
2.3 Entalpía	6
2.4 Transferencia de calor	7
2.5 Comportamiento de las moléculas en las fases de la materia	7
2.5.1 Fase sólida	7
2.5.2 Fase líquida	7
2.5.3 Fase gaseosa	7
2.6 Mecanismos de transferencia de calor	8
2.6.1 Conducción	8
2.6.2 Convección	8
2.6.2.1 Convección libre o natural	9
2.6.2.2 Convección forzada	9
2.6.3 Radiación	9
2.7 Conductividad térmica	10
2.7.1 Conductividad térmica en gases	10
2.7.2 Conductividad térmica en líquidos	11
2.7.3 Conductividad térmica en sólidos	11

2.8	Tipos de materiales	11
2.8.1	Materiales conductores	11
2.8.2	Materiales aislantes	12
2.9	Resistencia de contacto	12
3.	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN	13
3.1	Estados de conducción	13
3.1.1	Estado estacionario	13
3.1.2	Estado no estacionario	13
3.2	Ley de Fourier	13
3.3	Conducción a través de una placa plana o pared	14
3.4	Conducción de calor a través de un cilindro hueco	16
3.5	Conducción de calor a través de una esfera hueca	17
3.5.1	Conducción de calor a través de sólidos en serie	18
3.6	Conducción de calor a través de materiales en paralelo	19
3.7	Conducción con generación interna de calor	20
3.8	Pérdida de calor en una tubería	21
3.9	Grosor óptimo del aislante	21
3.10	Grosor crítico del aislante para un cilindro	22
4.	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN	25
4.1.	Tipos de convección	25
4.2.	Transferencia de calor por convección forzada dentro de tuberías	25
4.3.	Coeficiente de película	26
4.4.	Ecuación de enfriamiento de Newton	27
4.5.	Transferencia de calor entre sólidos y fluidos: flujo laminar y flujo turbulento	28
4.6.	Análisis dimensional	28
5.	EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	29
5.1	Intercambiadores de calor	29

5.1.1	Intercambiador de tubos concéntricos o doble tubo	29
5.1.2	Intercambiador de coraza y tubos	30
5.1.3	Intercambiador de flujo cruzado	30
5.1.4	Intercambiador compacto o de placas	31
5.2	Calderas	31
5.2.1	Caldera Piro tubular	31
5.2.2	Caldera Acuatubular	32
5.2.3	Caldera mixta	32
5.3	Trampas de vapor	33
5.4	Transferencia de calor en recipientes agitados	33
6.	FORMAS DE OPERACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR	35
6.1	Dirección de flujo	35
6.2	Coeficiente total de transferencia de calor	35
6.3	Área de transferencia de calor	36
6.4	Arreglo de tubos en un intercambiador	38
6.5	Temperatura calórica	38
6.6	Ecuación Sieder & Tate: fluidos dentro de una tubería	39
6.7	Ecuación de Grimson: fluidos fuera de una tubería	40
6.8	Criterios a utilizar para determinar la posición de los fluidos	42
6.8.1	Flujo másico	42
6.8.2	Características de los fluidos	42
6.9	Factor de suciedad	42
6.10	Ebullición	43
6.11	Condensación	43
7	TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN	45
7.1	Espectro electromagnético	45
7.1.1	Luz visible	45

7.1.2	Rayos infrarrojos	46
7.1.3	Microondas	46
7.1.4	Ondas de radio	46
7.1.5	Rayos X	46
7.1.6	Radiación ultravioleta	46
7.1.7	Rayos gamma	47
7.1.8	Radiación térmica	47
7.2	Radiación	47
7.3	Cuerpo negro	48
7.4	Cuerpo gris	48
7.5	Emisividad	49
7.6	Teorema de Kirchhoff	49
7.7	Teorema de Stefan-Boltzmann	50
7.8	Características de la transferencia de calor por radiación	51
8	EVAPORACIÓN	53
8.1	Factores del proceso	53
8.1.1	Concentración en el líquido	53
8.1.2	Solubilidad	53
8.1.3	Sensibilidad térmica de los materiales	54
8.1.4	Formación de espumas	54
8.1.5	Presión y temperatura	54
8.1.6	Formación de incrustaciones y materiales de construcción	54
8.2	Tipos de equipo de evaporación	55
8.3	Métodos de operación para evaporadores	55
8.3.1	Evaporadores de efecto simple	56
8.3.2	Evaporadores de efecto múltiple con alimentación hacia delante	56

8.3.3	Evaporadores de efecto múltiple con alimentación en retroceso	57
8.3.4	Evaporadores de efecto múltiple con alimentación en paralelo	57
8.4	Efectos de las variables de proceso en la operación de evaporadores	58
8.5	Elevación del punto de ebullición de las disoluciones	58
8.6	Gráficas de entalpía y concentración de soluciones	59
8.7	Balances de evaporadores	59
8.8	Condensadores para evaporadores	59
8.8.1	Condensador de superficie	60
8.8.2	Condensador de contacto directo	60
8.8.2.1	Condensador barométrico de contacto	60
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA	67

NOMENCLATURA

A	Área de flujo (m^2)
A_i	Área interna de flujo (m^2)
A_{lm}	Área logarítmica media (m^2)
A_o	Área externa de flujo (m^2)
C_p	Capacidad calorífica a presión constante ($J/kg \cdot K$)
d_i	Diámetro interno del tubo (m)
d_o	Diámetro externo del tubo (m)
dq	Diferencial de la velocidad de transferencia de calor (W)
Dr	Diferencial del radio (m)
dx	Diferencial de distancia (m)
dA	Diferencial del área de corte transversal normal a la dirección del flujo de calor (m^2)
dT	Diferencial de temperatura (K)
D	Diámetro (m)
D_v	Difusividad volumétrica (m^2/s)
E	Energía de radiación emitida (W / m^2)
F	Flujo másico (kg/h)
F_A	Factor geométrico (adimensional)
F_T	Factor de corrección de temperaturas (adimensional)
F_ϵ	Factor de emisividad o transferencia (adimensional)
G	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
H	Coeficiente convectivo de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot K$)
h_L	Coeficiente de transferencia de calor basado en la media logarítmica de la fuerza impulsora ΔT_{lm} ($W / m^2 \cdot K$)
H	Entalpía (J / kg)
I	Intensidad (A)
K	Conductividad térmica ($W/m \cdot K$)
L	Longitud (m)
M	Velocidad de flujo másico (kg/s)
N_{Nu}	Número de Nusselt (adimensional)
N_{Pr}	Número de Prandtl (adimensional)
N_{Re}	Número de Reynolds (adimensional)

P	Presión absoluta (N / m ²)
Q	Velocidad de transferencia de calor (W)
\dot{q}	Velocidad volumétrica de generación de calor (W/m ³)
R	Radio (m)
r _i	Radio interno (m)
r _o	Radio externo (m)
R	Resistencia (Ohm)
R _c	Resistencia de contacto, (K/W)
T	Tiempo (s)
T	Temperatura absoluta (K)
T _b	Temperatura del volumen promedio del fluido (K)
T _{bi}	Temperatura en el volumen de entrada del fluido (K)
T _{bo}	Temperatura en el volumen de salida del fluido (K)
T _w	Temperatura superficial o de pared (K)
U	Coeficiente total de transferencia de calor (W / m ² · K)
U	Energía interna (J / kg)
V	Velocidad (m/s)
V	Voltaje (V)
V	Volumen (m ³)
\bar{V}	Velocidad volumétrica media del fluido (m/s)
X	Distancia (m)
α	Difusividad térmica (m ² /s)
α	Absorbancia (adimensional)
β	Coeficiente de expansión volumétrica (1/K)
Δ	Diferencia (adimensional)
ΔH	Cambio de entalpía (J/kg)
ΔT	Diferencia de temperatura (K)
ε	Emisividad (adimensional)
μ	Viscosidad absoluta (kg/m · s)
ρ	Densidad (kg/m ³)
ρ	Reflectividad (adimensional)
σ	Constante de Boltzmann (5.676 x 10 ⁻⁸ W / m ² · K ⁴)
τ	Transmisividad (adimensional)

OBJETIVOS

General

Mejorar la didáctica del curso Transferencia de Calor, a través del uso de una presentación de diapositivas por computadora.

Específicos

1. Contribuir a la formación de conceptos exactos, principalmente en lo que concierne a los temas de difícil observación directa, dando oportunidad para efectuar un mejor análisis y una correcta interpretación del tema presentado.
2. Transmitir al estudiante con detalle, elementos gráficos del curso tales como fotografías, esquemas, diagramas, etc., y contribuir a la retención de la imagen visual y de la formación.
3. Optimizar el tiempo empleado por el docente para exponer los temas del curso, reduciendo el tiempo que se dedica a escribir en el tablero.

RESUMEN

La didáctica del curso Transferencia de Calor, que pertenece a la carrera de Ingeniería Química, se adaptó a un método visual de enseñanza al realizar una presentación de diapositivas por computadora por medio del programa *Microsoft PowerPoint*. Dicha presentación se divide en siete capítulos para los cuales se realizaron el mismo número de archivos de computadora, para presentar de una forma ordenada el contenido entero del programa del curso.

Inicialmente se describen los principios básicos de la transferencia de calor, con el objeto de introducir al estudiante a este tema. Posteriormente se desarrollan los mecanismos de transferencia de calor comúnmente utilizados en la industria como lo son la conducción y convección. A continuación, se presentan los diversos equipos utilizados para el intercambio de calor así como su forma de operación. Subsiguientemente, se explica el mecanismo de radiación y sus características, para finalmente concluir la presentación con el proceso de evaporación, explicando los tipos de equipo, métodos de operación, entre otros.

En cada uno de los capítulos se describe la parte teórica de cada tema, y además se ilustran los conceptos por medio de fotografías, esquemas, gráficas, tablas y ecuaciones.

INTRODUCCIÓN

Los medios visuales son una herramienta importante en el proceso de enseñanza-aprendizaje, ya que permite al docente transmitir en forma fácil, motivante y participativa los conocimientos a los estudiantes. Esto no implica la sustitución del catedrático, por el contrario, la utilización y uso adecuado de dichos medios ampliará la calidad docente.

La tecnología educativa actual, ofrece sistemas de alta eficiencia en la transmisión de conocimientos previamente establecidos, por tanto, si se le da un uso óptimo a los recursos visuales puede lograrse además de un valioso apoyo, una integración de la tecnología a la ingeniería química, lo cual redundará en un aumento de los niveles de comprensión y captación de los conocimientos transmitidos.

El curso Transferencia de Calor es vital en la carrera de Ingeniería Química debido a que es un proceso fundamental, el cual se presenta en una gran variedad de operaciones unitarias y por lo tanto en muchos tipos de industrias. Por esta razón es importante que el estudiante comprenda los conceptos básicos, sus aplicaciones y además conozca los equipos utilizados en este fenómeno.

Este curso se adapta a la metodología didáctica por medio de presentación de diapositivas por computadora para que el estudiante observe de forma clara, con la oportunidad de visualizar esquemas, fotografías, etc., el contenido del curso.

1. TECNOLOGÍA EDUCATIVA

1.1 Antecedentes

Los aparatos audiovisuales son para el docente un medio que le permiten transmitir en forma fácil y motivante los conocimientos a los alumnos. Son todos aquellos instrumentos destinados a incrementar el interés y la comprensión del proceso de aprendizaje de los estudiantes, mediante la participación de los sentidos de orden superior, la vista y el oído.

De acuerdo al objetivo que deben cumplir, los aparatos audiovisuales pueden ser: visuales, auditivos y mixtos. Los visuales son los que para ser percibidos hacen uso del órgano de la vista, haciendo eco al principio psicológico que las cosas se perciben mejor viéndolas que leyéndolas o discutiéndolas, por ejemplo, a través del retroproyector, proyector de diapositivas, etc. Los auditivos son los aparatos que sólo permiten la participación del sentido del oído, por ejemplo, radio, grabadora, etc. Los mixtos utilizan los medios visuales en conjunto con los auditivos.

Algunos de los elementos básicos con los que deben constar los aparatos audiovisuales para que el proceso de aprendizaje sea realmente eficiente son:

- a. Exactitud. La representación fidedigna de los datos o de la esencia de un hecho.
- b. Utilidad. Si ofrecen posibilidades operacionales para los alumnos y el profesor.
- c. Sencillez. Cuanto más complicados menos eficientes son.

- d. Interés. Deben ser capaces de despertar el interés de los alumnos a los cuales están destinados.
- e. Comprensión. No deben dar margen a dudas y confusiones; deben ser de fácil percepción.

Los aparatos audiovisuales deben ser utilizados con el objeto de:

- a. Despertar y atraer la atención.
- b. Contribuir a la retención de la imagen visual y de la formación.
- c. Favorecer la enseñanza basada en la observación y en la experimentación.
- d. Facilitar la aprehensión intuitiva y sugestiva de un tema o de un hecho en estudio.
- e. Ayudar a formar imágenes correctas, ya que cada uno puede “percibir” la información oral según su capacidad de discernimiento y su experiencia anterior.
- f. Contribuir a la formación de conceptos exactos, principalmente en lo que atañe a los temas de difícil observación directa.
- g. Hacer que la enseñanza sea más objetiva, concreta y a la vez, más próxima a la realidad.

La tecnología educativa se entiende como el estudio y aplicación de un conjunto de teoría, materiales, herramientas, máquinas y equipos, destinados a la realización del proceso enseñanza-aprendizaje, incluyendo métodos, procedimientos y formas didácticas, así como los recursos audiovisuales; también los planes, programas, actividades y experiencias de aprendizaje, es decir todo el currículo de estudios.

Los recursos audiovisuales son un efectivo procedimiento en el proceso de enseñanza-aprendizaje de cualquier nivel educativo y además un complemento de las exposiciones verbalistas de los maestros. Esto se podrá apreciar con la implementación de esta metodología en el curso Transferencia de Calor, lo cual servirá como base al docente para realizar la exposición del mismo.

El contenido del curso se transcribió a una presentación de diapositivas por computadora por medio del *software Microsoft PowerPoint* y se resumen en siete capítulos separados en el mismo número de archivos.

A continuación se hará referencia del contenido de cada archivo, sin pretender hacer una descripción detallada del contenido del curso.

2. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El primer capítulo está contenido en el archivo “01 - Principios de transferencia de calor.ppt” y consta de 30 diapositivas o *slides* en las cuales se describen los conceptos básicos de la transferencia de calor.

Los puntos principales que detallan en esta presentación son los siguientes.

2.1 Calor

Energía en movimiento que se provoca debido a que existe una diferencia de temperatura.

2.2 Transferencia de calor y termodinámica

La termodinámica es la parte de la física que describe y relaciona las propiedades físicas de la materia de los sistemas macroscópicos, así como sus intercambios de energía.

La termodinámica fue planteada como una ciencia que ayuda a establecer las relaciones entre las distintas formas de energía, estudia los procesos en los que hay transferencia de energía como calor y trabajo, y las relaciones que se dan entre los fenómenos dinámicos y caloríficos.

2.3 Entalpía

La entalpía, una propiedad extensiva, es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que éste puede intercambiar con su entorno.

Por ejemplo, en una reacción química a presión constante, el cambio de entalpía del sistema es el calor absorbido o desprendido en la reacción. En un cambio de fase, por ejemplo de líquido a gas, el cambio de entalpía del sistema es el calor latente, en este caso el de vaporización.

Para cualquier sistema, la entalpía está definida explícitamente por la siguiente expresión matemática:

Ecuación 1:

$$H = U + PV$$

Donde:

H	:	Entalpía (J / kg)
U	:	Energía interna (J / kg)
P	:	Presión absoluta (N / m ²)
V	:	Volumen (m ³)

Puesto que U, P y V son todas funciones de estado, H, tal y como está definida por la ecuación 1, también debe ser una función de estado.

2.4 Transferencia de calor

La transferencia de calor es una disciplina, complemento de la termodinámica y tiene como variable fundamental el tiempo. El flujo de calor se verifica debido a la fuerza impulsora de una diferencia de temperatura por la cual el calor fluye de la región de alta temperatura a la de temperatura más baja.

2.5 Comportamiento de las moléculas en las fases de la materia

2.5.1 Fase sólida

En la fase sólida, las moléculas o átomos están muy cercanos, dando rigidez a los cuerpos.

2.5.2 Fase líquida

En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde la rigidez.

2.5.3 Fase gaseosa

En la fase de gas, la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado.

2.6 Mecanismos de transferencia de calor

Existen tres mecanismos de transferencia de calor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres.

- a. Conducción
- b. Convección
- c. Radiación

2.6.1 Conducción

Por este mecanismo, el calor puede ser conducido a través de sólidos, líquidos y gases. La conducción se verifica mediante la transferencia de energía cinética entre moléculas adyacentes. Si existe un gradiente de temperatura en una sustancia el calor puede fluir sin que tenga lugar un movimiento observable de la materia.

2.6.2 Convección

Este mecanismo implica el transporte de calor en un volumen dado, produciéndose una mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Además, con frecuencia incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido.

En la práctica es difícil separar la convección de la conducción verdadera cuando ambas se engloban conjuntamente bajo el nombre de convección.

Las fuerzas utilizadas para crear las corrientes de convección en los fluidos son de dos tipos:

- a. Convección libre o natural
- b. Convección forzada

2.6.2.1 Convección libre o natural

Es aquella en la cual las porciones de un fluido a diferentes temperaturas sufren un desplazamiento debido a la diferencia de densidades que resulta del gradiente de temperaturas en el fluido.

2.6.2.2 Convección forzada

Es aquella en la que se provoca el flujo de un fluido por medio de un dispositivo mecánico (bomba, ventilador, etc.).

Tanto la convección natural como la forzada, pueden ser activas simultáneamente en el mismo fluido.

2.6.3 Radiación

La radiación es la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas, de manera similar a las ondas electromagnéticas que propagan y transfieren la luz.

Si la radiación pasa a través de un espacio vacío, no se transforma en calor ni en otra forma de energía. Sin embargo, si en su camino encuentra material, la radiación se transmitirá, reflejará o absorberá.

2.7 Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad de la sustancia, llamada propiedad de transporte. La experiencia confirma la independencia de la conductividad térmica en un amplio intervalo de gradientes de temperatura, excepto para sólidos, donde la radiación entre las partículas, que no sigue una ley lineal con la temperatura, es responsable de una parte importante del flujo total de calor. Por otra parte la conductividad térmica es una función de la temperatura, pero la variación es relativamente pequeña, de forma que, para pequeños intervalos de temperatura, ésta puede considerarse constante.

Las conductividades térmicas varían en un amplio intervalo; son muy elevadas para los metales y muy bajas para materiales finamente pulverizados de los que se ha extraído el aire.

2.7.1 Conductividad térmica en gases

Si una molécula se desplaza de una región de temperatura elevada a otra de temperatura inferior, transporta energía cinética a esa región y la cede al chocar con moléculas de baja energía.

Puesto que las moléculas se mueven con más rapidez cuanto menor es su tamaño, los gases como el hidrógeno tienen conductividades térmicas más elevadas.

2.7.2 Conductividad térmica en líquidos

Las moléculas de los líquidos están mucho más juntas entre sí que la de los gases y los campos de fuerza moleculares ejercen un efecto considerable sobre el intercambio de energía.

La conductividad térmica en los líquidos varía de manera moderada con la temperatura y son esencialmente independientes de la presión.

2.7.3 Conductividad térmica en sólidos

La conducción de calor o energía a través de los sólidos metálicos se da por los electrones libres que se mueven en la red estructural del metal y en el resto de sólidos, el calor es conducido por la transmisión de energía vibracional entre átomos adyacentes.

2.8 Tipos de materiales

Según sus propiedades térmicas los materiales se dividen en materiales conductores y materiales aislantes.

2.8.1 Materiales conductores

Se les llaman a algunos sólidos, tales como los metales, que tienen altas conductividades térmicas.

2.8.2 Materiales aislantes

Se les llaman a los que tienen bajas conductividades térmicas y son malos conductores de calor.

2.9 Resistencia de contacto

Uno de los factores que originan errores considerables en la determinación de la conductividad térmica, es la naturaleza de la unión formada entre la fuente de calor y el fluido o espécimen sólido que hace contacto con él y transmite el calor.

Si un sólido recibe calor haciendo contacto con otro sólido, es casi imposible excluir la presencia de aire u otro fluido en el punto de contacto. Aun cuando un líquido esté en contacto con un metal, la presencia de pequeñas rugosidades puede entrapar permanentemente burbujas infinitesimales de aire.

3. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

El archivo “02 - Transferencia de calor por conduccion.ppt” consta de 63 diapositivas o *slides* en las cuales se describen los principales conceptos de este mecanismo de transferencia de calor. El contenido del mismo es el siguiente:

3.1 Estados de conducción

3.1.1 Estado estacionario

En la conducción de calor en estado estacionario la distribución de temperatura en el interior del sólido no varía con el tiempo.

3.1.2 Estado no estacionario

En la conducción de calor en estado no estacionario la distribución de temperatura en el interior del sólido sí varía con el tiempo.

3.2 Ley de Fourier

Los tres tipos principales de procesos de velocidad de transferencia (transferencia de momentum, calor y masa) están caracterizados por el principio que establece que: para que se pueda transferir una propiedad como el calor o la masa, es necesario que exista una fuerza impulsora que contrarreste la resistencia.

La ecuación fundamental de la Ley de Fourier para la transferencia de calor por conducción es la siguiente:

Ecuación 2:

$$dq = -kdA \frac{dT}{dx}$$

Donde:

- dq : Diferencial de la velocidad de transferencia de calor (W)
- k : Conductividad térmica (W / m K)
- dA : Diferencial del área de corte transversal normal a la dirección del flujo de calor (m²)
- dT : Diferencial de temperatura (K)
- dx : Diferencial de distancia (m)

El signo negativo se incluye debido a que si el flujo de calor es positivo en determinado sentido, la temperatura disminuye en ese mismo sentido.

3.3 Conducción a través de una placa plana o pared

Integrando la Ley de Fourier, para el caso de transferencia de calor en estado estacionario a través de una pared plana con área de corte transversal, suponiendo que k es constante, no varía con la temperatura y tomando en cuenta que el flujo de calor se da en una sola dirección, ésta se obtiene con la siguiente ecuación:

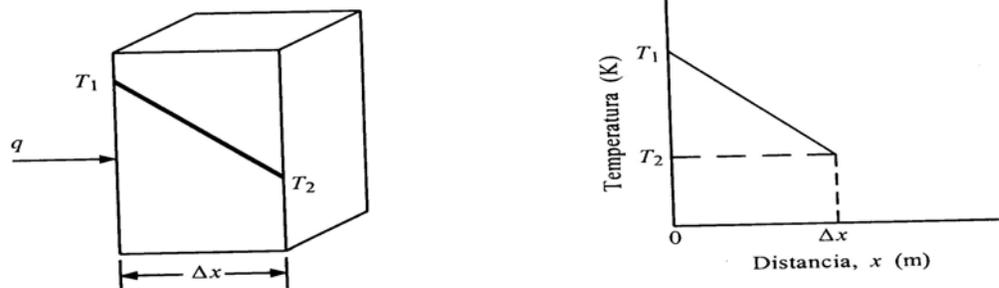
Ecuación 3:

$$q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{x_2 - x_1} = kA \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)$$

Donde:

- q : Velocidad de transferencia de calor (W)
- k : Conductividad térmica (W / m K)
- A : Área de flujo, perpendicular a la dirección de flujo (m²)
- T₁ : Temperatura en el punto 1 (K)
- T₂ : Temperatura en el punto 2 (K)
- X₁ : Distancia del punto 1 (m)
- X₂ : Distancia del punto 2 (m)
- ΔT : Diferencia de temperatura entre dos puntos extremos (K)
- Δx : Grosor del sólido (m)

Figura 1. Conducción de calor en una pared plana: a) geometría de la pared y b) gráfica de la temperatura.



(a)

(b)

Fuente: Geankoplis, Christie. **Procesos de transporte y operaciones unitarias.** Pag. 248.

3.4 Conducción de calor a través de un cilindro hueco

En muchos casos en las industrias de proceso, el calor se transfiere a través de las paredes de un cilindro de paredes gruesas en forma unidireccional, esto es, una tubería que puede estar aislada. Volviendo a escribir la ley de Fourier con la variable dr en lugar de dx obtenemos:

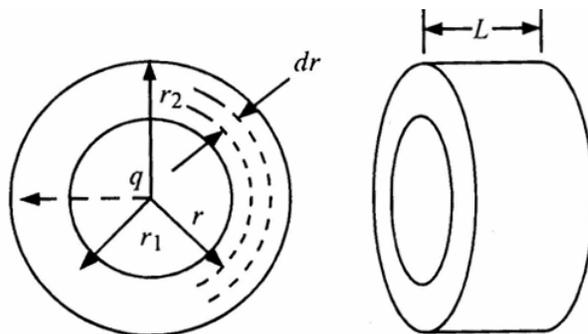
Ecuación 4:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dr}$$

Donde:

- q : Velocidad de transferencia de calor (W)
- A : Área de flujo, perpendicular a la dirección de flujo (m^2)
- k : Conductividad térmica (W / m K)
- dT : Diferencial de temperatura (K)
- dr : Diferencial del radio (m)

Figura 2. Conducción de calor en un cilindro



Fuente: Geankoplis, Christie. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. Pag. 248.

Después de realizar diversas sustituciones, reordenando e integrando se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 5:

$$q = \frac{kA_{lm}T_1 - T_2}{r_o - r_i} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{r_o - r_i}{kA_{lm}}} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

Donde:

q	:	Velocidad de transferencia de calor (W)
k	:	Conductividad térmica (W / m K)
A _{lm}	:	Área logarítmica media (m ²)
T ₁	:	Temperatura en el punto 1 (K)
T ₂	:	Temperatura en el punto 2 (K)
r _o	:	Radio externo (m)
r _i	:	Radio interno (m)
R	:	Resistencia (W / m K)

3.5 Conducción de calor a través de una esfera hueca

La conducción de calor a través de una esfera hueca es otro caso de conducción unidimensional. El área de corte transversal normal al flujo de calor es:

Ecuación 6:

$$A = 4\pi r^2$$

Donde

A	:	Área de la esfera (m ²)
r	:	Radio de la esfera (m)

Al sustituir la ecuación 5 en la ecuación 3, reordenar e integrar, se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 7:

$$q = 4\pi k \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o}}$$

Donde:

q	:	Velocidad de transferencia de calor (W)
k	:	Conductividad térmica (W / m K)
T ₁	:	Temperatura en el punto 1 (K)
T ₂	:	Temperatura en el punto 2 (K)
r _o	:	Radio externo (m)
r _i	:	Radio interno (m)

3.5.1 Conducción de calor a través de sólidos en serie

En el flujo de fluidos se observa que cuando se tiene una tubería con una serie de accesorios, éstos provocan una caída de presión.

En aquellos casos en los que hay una pared de planchas múltiples constituidas por más de un material, es útil determinar los perfiles de temperaturas en todos los materiales, puesto que el flujo de calor debe ser el mismo en cada plancha, es posible aplicar la ecuación de Fourier a cada una de ellas.

Ecuación 8:

$$q = k_A A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_A} = k_B A \frac{T_2 - T_3}{\Delta x_B} = k_C A \frac{T_3 - T_4}{\Delta x_C} = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C}$$

Donde:

- q : Velocidad de transferencia de calor (W)
- k : Conductividad térmica en los puntos A, B y C (W / m K)
- A : Área de flujo, perpendicular a la dirección de flujo (m²)
- T₁ : Temperatura en el punto 1 (K)
- T₂ : Temperatura en el punto 2 (K)
- T₃ : Temperatura en el punto 3 (K)
- T₄ : Temperatura en el punto 4 (K)
- Δx : Grosor del sólido en los puntos A, B y C (m)

3.6 Conducción de calor a través de materiales en paralelo

Considérese dos placas colocadas en paralelo, el flujo total de calor es la suma del flujo de calor a través del sólido A más el que pasa por B. La diferencia de temperaturas es igual en ambas paredes.

Escribiendo la ecuación de Fourier para cada sólido y sumando, obtenemos el flujo de calor total, el cual se representa con la siguiente ecuación:

Ecuación 9:

$$q = q_A + q_B = \frac{\Delta T_{total}}{\frac{\Delta x_A}{k_A A_A}} + \frac{\Delta T_{total}}{\frac{\Delta x_B}{k_B A_B}} = \Delta T \left(\frac{1}{\frac{\Delta x_A}{k_A A_A}} + \frac{1}{\frac{\Delta x_B}{k_B A_B}} \right)$$

Donde:

- q : Velocidad de transferencia de calor (W)
- q_A : Velocidad de transferencia de calor en pared A (W)
- q_B : Velocidad de transferencia de calor en pared B (W)
- ΔT : Diferencia de temperatura (K)
- Δx : Grosor de la pared A y B (m)
- k : Conductividad térmica en las paredes A y B (W / m K)
- A : Área de flujo de las paredes A y B (m²)

3.7 Conducción con generación interna de calor

En algunos sistemas se genera calor en el interior del medio conductor; esto es, hay una fuente de calor distribuida uniformemente. Algunos casos de este tipo son los calentadores de resistencia eléctrica y las varillas de combustible nuclear. Además, cuando se verifica en el medio una reacción química de manera uniforme, hay un desprendimiento de calor de reacción.

3.8 Pérdida de calor en una tubería

Se ha supuesto que la superficie externa fría puede mantenerse a una temperatura definida. En realidad, las temperaturas asignadas a la pared exterior dependen no sólo de las resistencias entre las superficies calientes y frías, sino también en la habilidad de la atmósfera más fría que lo rodea para remover el calor que llega a la superficie externa, por medio de convección natural del aire ambiente; y tiene como origen la diferencia de temperatura entre la superficie exterior y el aire frío. La convección natural resulta del entibiamiento del aire adyacente a la tubería, por lo tanto, reduce su densidad. El aire tibio sube y continuamente se reemplaza por aire frío. El flujo de calor de una tubería al aire ambiente usualmente es una pérdida.

3.9 Grosor óptimo del aislante

El grueso óptimo de un aislante se puede determinar por consideraciones puramente económicas. Si un tubo descubierto fuera a conducir un fluido caliente, habría cierta pérdida de calor por hora cuyo valor podría determinarse del costo de producir Btu en la planta generadora. A menor pérdida de calor, mayor grueso del aislante y mayor costo inicial, y mayores cargos fijos anuales (mantenimiento y depreciación), los que deben añadirse a la pérdida anual de calor. Suponiendo cierto número de gruesos de aislante y sumando los cargos fijos al valor de la pérdida de calor, se obtendrá un costo mínimo y el grueso correspondiente a él será el grueso óptimo económico del aislante.

3.10 Grosor crítico del aislante para un cilindro

No es evidente que al añadir más aislante con una conductividad térmica de k disminuya la velocidad de transferencia de calor.

La velocidad de transferencia de calor a través del cilindro es:

Ecuación 10:

$$q = h_o A (T_2 - T_o)$$

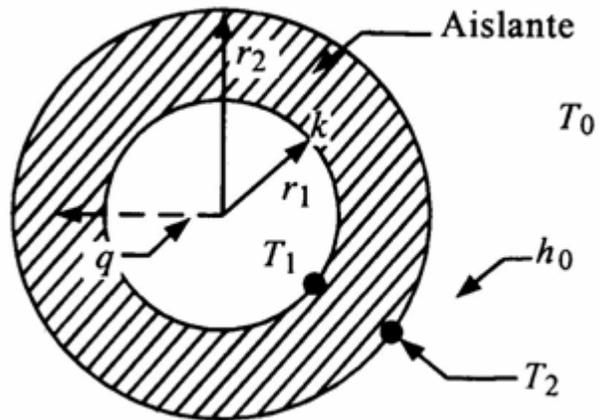
Donde:

- q : Velocidad de transferencia de calor (W)
- h_o : Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W / m² K)
- A : Área de flujo, perpendicular a la dirección de flujo (m²)
- T_2 : Temperatura en el punto 2 (K)
- T_o : Temperatura en el punto O (K)

A medida que se agrega más aislante, el área exterior, que es $A = 2\pi r^2 L$, aumenta, pero T_2 disminuye. Sin embargo, no es evidente si q aumenta o disminuye.

Por consiguiente, si el radio exterior es menor que el valor crítico, al agregar más aislante aumentará la velocidad de transferencia de calor q . Del mismo modo, si el radio exterior es mayor que el crítico, al agregar más aislante disminuirá la velocidad de transferencia de calor.

Figura 3: Radio crítico del aislante de un cilindro o tubería



Fuente: Geankoplis, Christie. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. Pag. 261.

4. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

El archivo “03 - Transferencia de calor por conveccion.ppt” consta de 27 *slides* en los cuales se describen los principales conceptos de este mecanismo de transferencia de calor.

4.1 Tipos de convección

La transferencia de calor por convección se debe al movimiento del fluido. El fluido frío adyacente a superficies calientes recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él.

La convección libre o natural ocurre cuando el movimiento del fluido no se complementa por agitación mecánica. Pero cuando el fluido se agita mecánicamente, el calor se transfiere por convección forzada.

4.2 Transferencia de calor por convección forzada dentro de tuberías

En la mayoría de las situaciones que implican transferencia de calor en un líquido o un gas, por lo general se presenta una transferencia convectiva de calor además de la conductiva.

En la transferencia de calor de muchos procesos industriales, el calor pasa de un fluido a otro a través de una pared sólida. El coeficiente convectivo de transferencia de calor a través de un fluido es el inverso de la resistencia al flujo por unidad de área y se utiliza en la ecuación de enfriamiento de Newton:

Ecuación 11:

$$q = h A (T - T_w)$$

Donde:

q : Velocidad de transferencia de calor (W)

h : Coeficiente convectivo (W / m² K)

A : Área de flujo (m²)

T : Temperatura general o promedio del fluido (K)

T_w : Temperatura de la pared en contacto con el fluido (K)

4.3 Coeficiente de película

Las películas se visualizan como pequeñas cantidades de fluido inmóvil cercanas a la pared, a las cuales no se les conoce su grosor. La mayor parte de la resistencia a la transferencia de calor está localizada en estas películas delgadas.

El coeficiente de transferencia de calor o *coeficiente de película h*, indica la razón o velocidad a la cual fluidos que tienen una variedad de propiedades físicas y bajo diferentes grados de agitación, transfieren calor. Cuanto más turbulento es el flujo, más alto será el coeficiente de transferencia de calor.

4.4 Ecuación de enfriamiento de Newton

La conductancia indica la facilidad con la que un material conduce electricidad.

Ecuación 12:

$$I = \frac{V}{R} = V \left(\frac{1}{R} \right)$$

Donde:

I	:	Intensidad (A)
V	:	Voltaje (V)
R	:	Resistencia (Ohm)

Ecuación 13:

$$\frac{1}{R} = \text{conductancia}$$

Donde:

R	:	Resistencia (Ohm)
---	---	-------------------

En convección se utiliza la conductancia en lugar de la resistencia. La transferencia de calor por convección puede ser descrita en una ecuación que imita la forma de la ecuación de conducción, la cual se conoce como la ecuación de enfriamiento de Newton, descrita anteriormente en la ecuación 11.

4.5 Transferencia de calor entre sólidos y fluidos: flujo laminar y flujo turbulento

El flujo turbulento se presenta cuando un líquido fluye en un tubo horizontal y lo hace en forma de movimiento de torbellino no localizado. Mientras que el flujo laminar se obtiene si la velocidad del líquido disminuye bajo cierto valor determinado, es decir, la naturaleza del flujo cambia y desaparece la turbulencia. Las partículas del fluido fluyen en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo.

La velocidad a la que el calor es transferido hacia o desde un líquido a un tubo, es considerablemente menor en el flujo laminar que en el turbulento.

4.6 Análisis dimensional

Muchos problemas importantes de ingeniería no pueden resolverse totalmente por métodos teóricos o matemáticos. El análisis dimensional se aplica con frecuencia para agrupar las variables de un determinado caso físico, en forma de parámetros o números adimensionales que pueden ser muy útiles en los experimentos y en la correlación de datos.

El análisis dimensional no conduce a una ecuación numérica y es preciso recurrir a la experimentación para completar la solución de un problema.

5. EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El archivo "04 – Equipos de transferencia de calor.ppt" consta de 69 *slides* en los cuales se detallan diversos equipos de transferencia de calor utilizados en la industria.

5.1 Intercambiadores de calor

El intercambiador de calor es un equipo donde un fluido transfiere energía a otro fluido.

Existen cinco tipos generales de intercambiadores de calor, los cuales son:

- a. De tubos concéntricos o doble tubo
- b. Coraza y tubos
- c. Flujo cruzado
- d. Compactos
- e. Especiales

5.1.1 Intercambiador de tubos concéntricos o doble tubo

Es el intercambiador de calor más sencillo se compone de un tubo dentro de otro tubo. Funciona tanto en contracorriente como en paralelo. Se utiliza cuando el flujo es bajo, debido a que ocupan mucho espacio en relación al área de transferencia de calor.

5.1.2 Intercambiador de coraza y tubos

Son los más importantes en las industrias de proceso. Se utilizan cuando se manejan flujos más grandes. No es adecuado cuando el gasto másico es elevado.

Se usan deflectores transversales de tal manera que el fluido exterior se ve forzado a fluir perpendicularmente a la batería de tubos en lugar de hacerlo en paralelo, lo cual genera turbulencia adicional y aumenta el coeficiente de transferencia de calor de la coraza. Generalmente, la distancia entre los deflectores es pequeña.

En un flujo paralelo en equicorriente, la temperatura final del fluido más frío nunca puede llegar a ser igual a la temperatura de salida del fluido más caliente.

5.1.3 Intercambiador de flujo cruzado

Se utiliza para el enfriamiento o calentamiento de gases, en el que uno de los fluidos, ya sea líquido o gas, circula por el interior de los tubos, mientras que al otro fluido se le obliga a circular perpendicularmente al haz de tubos.

El gas que circula por el exterior de los tubos se considera de tipo de mezcla, dado que puede moverse libremente entre los tubos y habrá una tendencia a que la temperatura del gas se iguale en la dirección normal al flujo.

Mientras que el fluido del interior de los tubos se considera sin mezclar, ya que está confinado y no puede mezclarse con ninguna otra corriente.

5.1.4 Intercambiador compacto o de placas

Se les llama compactos porque tienen volumen pequeño y área de transferencia grande.

La ventaja es que en un volumen pequeño se tiene un área de transferencia grande. No es adecuado para fluidos sucios, aunque se limpia fácilmente.

5.2 Calderas

Las calderas son aparatos tubulares calentados directamente, que por principio convierten la energía del combustible en calor latente de vaporización.

Es un intercambiador de calor en el que gases de combustión ceden entalpía a un fluido para cambiarlo de estado, generalmente para convertirlo en vapor. En su mayoría, el fluido de trabajo es agua.

Los tipos de calderas de calderas que existen son los siguientes:

- a. Piro-tubular
- b. Acu-tubular
- c. Mixta

5.2.1 Caldera Piro-tubular

Cuando lo que va adentro de los tubos son los gases de combustión, es decir, la combustión se lleva a cabo dentro de los tubos, y el agua circula afuera.

Dispone de una abertura de inspección y registro de gases en la parte posterior, que se abre automáticamente al producirse cualquier sobre-presión en el hogar, ya que esta concebida como válvula de escape, en el caso de una posible acumulación de gases en su interior.

Normalmente son las de menor capacidad, llegan hasta una potencia o capacidad de 1,000 hp. Generalmente utilizan combustible líquido y ocasionalmente gaseoso. Se caracterizan porque el primer tubo es más grande.

5.2.2 Caldera Acuatubular

La caldera se compone de dos o tres colectores o domos a los que van a conectar todos los tubos de la caldera, con dos o más columnas de circulación natural, según sea el tamaño de la caldera.

En este tipo de caldera el agua va dentro de los tubos y los gases los rodean. En estas se puede utilizar combustible sólido, ya que es afuera donde se realiza la combustión. El combustible sólido rinde menos, cuesta más y es difícil de quemar. Son de mayor capacidad. Tienen varios controles: de llama, temperatura, presión, entre otros.

5.2.3 Caldera mixta

Calderas de concepción mixta para el aprovechamiento de gases de recuperación y utilización alternativa o simultánea de quemador. Su diseño común en la zona de agua y vapor e independiente en la zona de gases, incorpora cuatro pasos de gases, tres para quemador y uno para recuperación, a través de los cuales se produce el intercambio térmico entre los gases y el agua, produciéndose de esta forma el vapor requerido.

La amplia gama de calderas de recuperación combinada con las distintas calderas convencionales, nos lleva a una diversidad muy amplia de distintos modelos.

5.3 Trampas de vapor

Una trampa para vapor es un dispositivo que permite eliminar condensado, aire y otros gases no condensables, además de prevenir pérdidas de vapor. La función de una trampa de vapor es permanecer cerrada hasta que haya mucho condensado, que es cuando se abre.

En la eliminación de condensado, éste debe pasar siempre rápido y completamente a través de la trampa de vapor para obtener un mejor aprovechamiento de la energía térmica del vapor.

El aire y otros gases no condensables disminuyen el coeficiente de transferencia de calor, por lo que se hace necesaria su eliminación. Además, se debe tener presente que el O_2 causa corrosión.

No se debe permitir el paso de vapor sino hasta que éste ceda la mayor parte de energía que contiene, también las pérdidas de vapor deben ser mínimas mientras la trampa libera vapor condensado, aire y gases incondensables.

5.4 Transferencia de calor en recipientes agitados

Con mucha frecuencia es necesario enfriar o calentar el contenido del recipiente durante la agitación. Esto suele hacerse con superficies de calor, que pueden tener forma de chaquetas de enfriamiento o de calentamiento en las paredes, o serpentines de tubería sumergidos en el líquido.

6. FORMAS DE OPERACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

El archivo “05 – Formas de operación de los intercambiadores de calor.ppt” consta de 111 *slides* en los cuales se describen las formas de operación de los intercambiadores de calor.

6.1 Dirección de flujo

La dirección del flujo dentro de un intercambiador de calor se puede dar de las siguientes formas:

- a. flujo paralelo
- b. flujo en contracorriente
- c. flujo cruzado

Los intercambiadores trabajan con flujo en paralelo o contracorriente, específicamente el de tubos concéntricos.

6.2 Coeficiente total de transferencia de calor

Existen ciertos tipos de problemas, principalmente relacionados con intercambiadores de calor, donde es conveniente simplificar el cálculo del calor, esto se realiza incorporando el concepto de coeficiente global de transferencia de calor, U , el cual se relaciona con el calor mediante la ecuación general de Fourier:

Ecuación 14:

$$q = UA\Delta T$$

Donde:

q	:	Velocidad de transferencia de calor (W)
U	:	Coefficiente total de transferencia de calor (W / m ² K)
A	:	Área de flujo (m ²)
ΔT	:	Diferencia de temperatura (K)

6.3 Área de transferencia de calor

Está dada por la sumatoria del área de todos los tubos. Al aumentar el área de transferencia de calor aumentar el intercambio de calor.

Ecuación 15:

$$A_i = 2 \pi r_i L = d_i \pi L$$

Donde:

A _i	:	Área interna de flujo (m ²)
r _i	:	Radio interno del tubo (m)
L	:	Longitud del tubo (m)
d _i	:	Diámetro interno del tubo (m)

Ecuación 16:

$$A_o = 2 \pi r_o L = d_o \pi L$$

Donde:

A _o	:	Área externa de flujo (m ²)
r _o	:	Radio externo del tubo (m)
L	:	Longitud del tubo (m)
d _o	:	Diámetro externo del tubo (m)

En un intercambiador con n tubos, el área de transferencia de calor es

Ecuación 17:

$$A = (\text{área de un tubo})(\text{número de tubos})$$

Ecuación 18:

$$A_i = 2 \pi r_i L (n)$$

Donde:

- A_i : Área interna de flujo (m^2)
- r_i : Radio interno del tubo (m)
- L : Longitud del tubo (m)

Ecuación 19:

$$A_o = 2 \pi r_o L (n)$$

Donde:

- A_o : Área externa de flujo (m^2)
- r_o : Radio externo del tubo (m)
- L : Longitud del tubo (m)

Área de flujo para intercambiador de coraza y tubos:

Ecuación 20:

$$A = \frac{\pi \cdot r_i^2 \cdot n}{N}$$

Donde:

- A : Área de flujo (m^2)
- r_i : Radio interno del tubo (m)
- n : Número de tubos
- N : Número de pasos

6.4 Arreglo de tubos en un intercambiador

En un intercambiador se puede tener la misma cantidad de tubos colocados de diferentes formas, o arreglos, lo cual no varía el área de flujo dentro de ellos, pero sí afecta el área de flujo de la coraza.

El número de tubos que caben en un intercambiador depende del arreglo de los tubos, los cuales pueden ser:

- a. Arreglo en cuadro o alineados
- b. Arreglo en triángulo
- c. Arreglo en triángulo con espacios para limpieza
- d. Arreglo cuadro rotado

Cuando el lado de la carcasa tiene gran tendencia a ensuciarse no se utiliza la disposición triangular por cuanto los espacios entre tubos son de difícil acceso, cosa que no sucede en la disposición cuadrada, que a su vez provoca una menor caída de presión en el lado de la carcasa que la disposición triangular.

6.5 Temperatura calórica

La temperatura calórica es un valor de temperatura promedio que al evaluar los coeficientes termodinámicos, haga cierta la siguiente expresión:

Ecuación 21:

$$q = UA(F_T \Delta T_{lm})$$

Donde:

- q : Velocidad de transferencia de calor (W)
- U : Coeficiente total de transferencia de calor (W / m² K)
- A : Área de flujo (m²)
- F_T : Factor de corrección de temperaturas
- ΔT : Diferencia de temperatura (K)

6.6 Ecuación Sieder & Tate: fluidos dentro de una tubería

a. Para flujo laminar en tuberías.

Ecuación 22:

$$N_{Nu} = \frac{h_i D}{k} = 1.86 \left(\frac{N_{Re} N_{Pr} D}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Donde:

- N_{Nu} : Número de Nusselt
- h_i : Coeficiente convectivo de transferencia de calor, W/m² · K
- D : Diámetro (m)
- k : Conductividad térmica (W / m K)
- N_{Re} : Número de Reynolds
- N_{Pr} : Número de Prandtl
- L : Longitud, m
- μ : Viscosidad absoluta (kg / m s)

b. Para flujo turbulento en tuberías.

En los libros se encuentra la siguiente variante

$$N_{Nu} = 0.023$$

$$N_{Nu} = 0.027$$

Ecuación 23:

$$N_{Nu} = 0.023(N_{Re})^{0.8}(N_{Pr})^{\frac{1}{3}}(\mu/\mu_w)^{0.14}$$

o bien

Ecuación 24:

$$N_{Nu} = 0.027(N_{Re})^{0.8}(N_{Pr})^{\frac{1}{3}}(\mu/\mu_w)^{0.14}$$

Donde:

N_{Nu}	:	Número de Nusselt
N_{Re}	:	Número de Reynolds
N_{Pr}	:	Número de Prandtl
μ	:	Viscosidad absoluta (kg / m s)

6.7 Ecuación de Grimson: fluidos fuera de una tubería

a. En los casos en los cuales el fluido rodea al sólido

Ecuación 25:

$$N_{Nu} = C(N_{Re})^m (N_{Pr})^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

N_{Nu}	:	Número de Nusselt
N_{Re}	:	Número de Reynolds
N_{Pr}	:	Número de Prandtl
C	:	Constante
m	:	Constante

b. Para placa paralela al flujo laminar

Ecuación 26:

$$N_{Nu} = 0.664(N_{Re})^{0.5} (N_{Pr})^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

N_{Nu}	:	Número de Nusselt
N_{Re}	:	Número de Reynolds
N_{Pr}	:	Número de Prandtl

c. Para placa paralela al flujo turbulento

Ecuación 27:

$$N_{Nu} = 0.0366(N_{Re})^{0.8} (N_{Pr})^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

N_{Nu}	:	Número de Nusselt
N_{Re}	:	Número de Reynolds
N_{Pr}	:	Número de Prandtl

6.8 Criterios a utilizar para determinar la posición de los fluidos

6.8.1 Flujo másico

Tiene implicación con ΔP , la cual no afecta en sí la transferencia de calor. Al ser ΔP mayor, la velocidad disminuye o se le debe de agregar más potencia, por lo que implica un mayor costo.

6.8.2 Características de los fluidos

El más importante es la limpieza de los fluidos, ya que la suciedad se deposita, creando incrustaciones y provocando fricción.

Los fluidos limpios circulan fuera de los tubos, mientras que los fluidos sucios lo hacen dentro de los tubos.

La segunda característica es el objeto principal del intercambio, ya que si se requiere calentar el fluido, es necesario que éste circule dentro de la tubería, debido a que si el mismo se queda afuera, existirían pérdidas con el ambiente. Por otra parte, si se requiere enfriar el fluido, éste debe circular en la coraza, ya que el ambiente ayudará por la transferencia hacia la atmósfera.

6.9 Factor de suciedad

Durante el funcionamiento con la mayoría de los líquidos y con algunos gases, se van produciendo gradualmente unas películas de suciedad sobre la superficie en la que se realiza la transferencia térmica, que pueden ser de óxidos, incrustaciones calizas procedentes de la caldera, lodos, carbonilla y otros precipitados.

El efecto que ésta suciedad origina se conoce con el nombre de incrustaciones y provoca un aumento de la resistencia térmica del sistema.

6.10 Ebullición

El líquido a ebullición suele estar encerrado en un recipiente, con superficie de calentamiento en forma de tubos o placas verticales u horizontales que suministran el calor para la ebullición.

Las superficies de calentamiento pueden funcionar con electricidad o bien con un fluido caliente o que se condensa del otro lado de la superficie calentada.

Durante la ebullición, la temperatura del líquido es el punto de ebullición de éste a la presión a la que opera el equipo. Evidentemente, la superficie de calentamiento debe estar a una temperatura superior a dicho punto de ebullición.

En la superficie calentada se generan burbujas de vapor que se elevan a través de la masa del líquido. El vapor se acumula en el espacio situado por encima del nivel del líquido y de ahí se extrae.

6.11 Condensación

La condensación se verifica cuando un vapor saturado, como el vapor de agua, entra en contacto con un sólido cuya temperatura superficial es inferior a la temperatura de saturación, formándose un líquido como el agua.

Por lo general, cuando un vapor se condensa sobre una superficie, como un tubo vertical u horizontal u otras superficies, se forma una película de condensado en la superficie y fluye sobre ella por la acción de la gravedad.

Es esta película de líquido entre la superficie y el vapor lo que constituye la principal resistencia a la transferencia de calor. Esto se llama condensación tipo película.

Puede existir otro tipo de condensación, llamada condensación en gotas, cuando se forman gotas pequeñas sobre la superficie. Durante esta condensación, hay grandes áreas de tubo libres de líquido que quedan expuestas directamente al vapor. En estas áreas desnudas existen velocidades de transferencia de calor muy altas.

7. TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

El archivo “06 – Transferencia de calor por radiación.ppt” consta de 40 *slides* en los cuales se describen los principales conceptos de este mecanismo de transferencia de calor. El contenido del mismo es el siguiente:

7.1 Espectro electromagnético

Las cargas eléctricas estacionarias producen campos eléctricos, las cargas eléctricas en movimiento producen campos eléctricos y magnéticos.

Los cambios cíclicos en estos campos producen radiación electromagnética de esta manera la radiación electromagnética consiste en una oscilación perpendicular de un campo eléctrico y magnético.

La radiación electromagnética transporta energía de un punto a otro, esta radiación se mueve a la velocidad de la luz (siendo la luz un tipo de radiación electromagnética).

7.1.1 Luz visible

La luz blanca esta constituida por la combinación de ondas que tienen energías semejantes y es debido a que ninguna de estas predomine sobre las otras. La radiación visible va desde 384×10^{12} hasta 769×10^{12} Hz.

7.1.2 Rayos infrarrojos

La radiación infrarroja se localiza en el espectro entre 3×10^{11} Hz hasta aproximadamente los 4×10^{14} Hz.

Toda molécula que tenga un temperatura superior al cero absoluto, es decir -273K , emite rayos infrarrojos y estos serán mayores entre mas temperatura tenga el objeto.

7.1.3 Microondas

La región de las microondas se encuentra entre 1×10^9 Hz hasta aproximadamente 3×10^{11} Hz.

7.1.4 Ondas de radio

La región de ondas de radio se extiende desde algunos Hertz hasta 10^9 Hz con longitudes de onda desde muchos kilómetros hasta menos de 30 cm.

7.1.5 Rayos X

Producen radiación electromagnética con una longitud de onda menor a 10 nm.

7.1.6 Radiación ultravioleta

Sus longitudes de onda se extienden entre 10 y 400 nm más cortas que las de la luz visible.

7.1.7 Rayos gamma

Se localizan en la parte del espectro que tiene las longitudes de onda más pequeñas entre 10 y 0.01 nm.

7.1.8 Radiación térmica

Es una forma de radiación electromagnética similar a los rayos X, las ondas de luz, los rayos gamma, etc., y la única diferencia es la longitud de onda. Obedece las mismas leyes que la luz: se desplaza en línea recta, puede transmitirse a través del espacio y del vacío, etc.

7.2 Radiación

La radiación suele ir acompañada de conducción y convección. En su sentido más elemental, el mecanismo de transferencia de calor por radiación está constituido por tres etapas o fases:

- a. La energía térmica de una fuente de calor, como pared de un horno a T_1 , se convierte en la energía de las ondas de radiación electromagnética.
- b. Estas ondas se desplazan a través del espacio en línea recta y llegan a un objetivo frío a T_2 , como un tubo que contiene el agua que se desea calentar.
- c. Las ondas electromagnéticas que chocan contra el cuerpo son absorbidas por éste y se vuelven a transformar en energía o calor.

Recibimos calor únicamente en el intervalo de radiación térmica, el cual incluye la luz UV, visible e infrarrojo.

El caso único en el que estamos seguros que un cuerpo no emite ninguna radiación es en el cero absoluto; por lo que con esta excepción, todos los cuerpos emiten radiación.

7.3 Cuerpo Negro

Es un objeto especial de características ideales en el cual toda la energía que incide sobre él se absorbe y no se refleja. Se define como aquel que absorbe toda la energía radiante que incide sobre él y no refleja ni transmite nada de radiación.

Cuando un objeto emite radiación de manera similar a un cuerpo negro se puede asegurar que esta energía es de tipo térmico.

Este concepto es ideal, ya que no existe un cuerpo en la naturaleza que cumpla con esto; hay algunos que se acercan pero no lo cumple por completo.

7.4 Cuerpo gris

Cuando una superficie conserva constantes sus propiedades cromáticas en todo el espectro se denomina superficie gris. Este es un concepto teórico, pero que se puede aplicar con resultados suficientemente exactos para superficies con propiedades relativamente uniformes.

Llamamos “cuerpo gris” o “emisor gris” a un tipo especial de superficie no negra, en el que el poder emisor monocromático es independiente de la longitud de onda de la radiación emitida.

7.5 Emisividad

Es la característica o medida de la cantidad de emisión de energía. Esta no es absoluta, es relativa a la del cuerpo negro. Depende de cada superficie. Se convierte en una propiedad fisicoquímica por ser relativa.

La relación entre el poder de emisión de una superficie y el de un cuerpo negro se llama emisividad ϵ y es 1.0 para un cuerpo negro y menor que la unidad para un cuerpo gris.

7.6 Teorema de Kirchhoff

La ley de Kirchhoff enuncia que a una misma temperatura T_1 , los valores α_1 y el de una determinada superficie son iguales, para un cuerpo gris, aún si el cuerpo no está en equilibrio térmico con sus alrededores, esto es:

Ecuación 28:

$$\alpha_1 = \epsilon_1$$

Donde:

α : Absorbancia
 ϵ : Emisividad

7.7 Teorema de Stefan-Boltzmann

La radiación total de un cuerpo negro perfecto es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Basándose en la segunda ley de la termodinámica, Boltzmann estableció que la velocidad a la cual una fuente da calor es

Ecuación 29:

$$E = \sigma T^4$$

Donde:

E	:	Energía de radiación emitida (W / m ²)
σ	:	Constante de Boltzmann (5.676 x 10 ⁻⁸ W / m ² K ⁴)
T	:	Temperatura absoluta (K)

La ecuación de transferencia de calor por radiación de un cuerpo negro perfecto con emisividad $\epsilon = 1.0$ es:

Ecuación 30:

$$q = A\sigma T^4$$

Donde:

q	:	Velocidad de transferencia de calor (W)
A	:	Área superficial del cuerpo (m ²)
σ	:	Constante de Boltzmann (5.676 x 10 ⁻⁸ W / m ² K ⁴)
T	:	Temperatura absoluta (K)

Para un cuerpo no negro con emisividad $\epsilon < 1.0$, el poder de emisión se reduce por un factor igual a ϵ , lo cual se conoce como Ley de la Cuarta Potencia.

Ecuación 31:

$$q = A \epsilon \sigma T^4$$

Donde:

q	:	Velocidad de transferencia de calor (W)
A	:	Área superficial del cuerpo (m ²)
ϵ	:	Emisividad (adimensional)
σ	:	Constante de Boltzmann ($5.676 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$)
T	:	Temperatura absoluta (K)

7.8 Características de la transferencia de calor por radiación

Hay varias características que se deben tomar en cuenta en cualquier intercambio de calor por radiación:

- Posición
- Forma
- Tamaño relativo
- Emisividad de cada superficie (que tan cerca está de ser un cuerpo negro)

8. EVAPORACIÓN

El archivo “07 – Evaporación.ppt” consta de 65 *slides* en los cuales se describen los principios fundamentales de la evaporación.

8.1 Factores del proceso

Las propiedades físicas y químicas de la solución que se está concentrando y del vapor que se separa tienen un efecto considerable sobre el tipo de evaporador que debe usarse y sobre la presión y la temperatura del proceso. A continuación se analizan algunas propiedades que afectan a los métodos de procesamiento.

8.1.1 Concentración en el líquido

A medida que se verifica la evaporación, la solución se concentra y su viscosidad puede elevarse notablemente, causando una marcada disminución del coeficiente de transferencia de calor. Se requiere entonces una circulación o turbulencia adecuada para evitar que el coeficiente se reduzca demasiado.

8.1.2 Solubilidad

A medida que se calienta la solución y aumenta la concentración del soluto, puede exceder el límite de solubilidad del material en solución y se formarán cristales. Esto limita la concentración máxima que puede obtenerse por evaporación de la solución.

8.1.3 Sensibilidad térmica de los materiales

Muchos productos, en especial los alimentos y otros materiales biológicos, son sensibles a la temperatura y se degradan cuando ésta sube o el calentamiento es muy prolongado. La cantidad de degradación está en función de la temperatura y del tiempo.

8.1.4 Formación de espumas

En algunos casos, los materiales constituidos por soluciones cáusticas (leche desnatada, etc.) forman espuma durante la ebullición. Esta espuma es arrastrada por el vapor que sale del evaporador y puede producir pérdidas de material.

8.1.5 Presión y temperatura

El punto de ebullición de la solución está relacionado con la presión del sistema. Cuanto más elevada sea la presión de operación del evaporador, mayor será la temperatura de ebullición. Además, la temperatura de ebullición también se eleva a medida que aumenta la concentración del material disuelto por la acción de la evaporación. Este fenómeno se llama elevación del punto de ebullición. Para mantener a un nivel bajo la temperatura de los materiales termosensibles suele ser necesario operar a presiones inferiores a 1 atm, esto es, al vacío.

8.1.6 Formación de incrustaciones y materiales de construcción.

Algunas soluciones depositan materiales sólidos llamados incrustaciones sobre las superficies de calentamiento.

Estas incrustaciones se forman a causa de los productos de descomposición o por disminución de la solubilidad. El resultado es una reducción del coeficiente de transferencia de calor, lo que obliga a limpiar el evaporador. La selección de los materiales de construcción del evaporador tiene importancia en la prevención de la corrosión.

8.2 Tipos de equipo de evaporación

El tipo de equipo usado depende tanto de la configuración de la superficie para la transferencia de calor como de los medios utilizados para lograr la agitación o circulación del líquido. A continuación los tipos generales de equipo:

- a. Marmita abierta o artesa
- b. Evaporador de tubos horizontales con circulación natural
- c. Evaporador vertical con circulación natural
- d. Evaporador vertical de tubos largos.
- e. Evaporador de caída de película
- f. Evaporador de circulación forzada
- g. Evaporador de película agitada
- h. Evaporador solar de artesa abierta

8.3 Métodos de operación para evaporadores

Los métodos de operación para evaporadores utilizados son los siguientes.

8.3.1 Evaporadores de efecto simple

La temperatura del vapor es la misma que la temperatura del producto concentrado, pues está en equilibrio con la solución en ebullición. Los evaporadores de efecto simple se usan con frecuencia cuando la capacidad necesaria de operación es relativamente pequeña o el costo del vapor es relativamente barato comparado con el costo del evaporador.

8.3.2 Evaporadores de efecto múltiple con alimentación hacia delante

Un evaporador de simple efecto desperdicia bastante energía, pues el calor latente del vapor que sale no se utiliza. No obstante, una buena parte de este calor latente se recupera y se utiliza al emplear evaporadores de múltiple efecto.

El primer efecto opera a una temperatura suficientemente alta como para que el agua que se evapora sirva como medio de calentamiento del segundo efecto. Nuevamente, en el segundo efecto se evapora casi 1 kg de vapor, que se emplea como medio de calentamiento del tercer efecto. Por consiguiente, el resultado es un aumento de la economía de vapor de agua, que es kg de vapor evaporado/ kg de vapor de agua usado. Sin embargo, la economía del vapor de agua en un evaporador de efecto múltiple se logra a expensas de mayor inversión en el equipo.

En la operación de alimentación hacia delante, la alimentación se introduce en el primer efecto y fluye hacia el siguiente en el mismo sentido del flujo del vapor.

Éste es el método de operación que se emplea cuando la alimentación está caliente o cuando el producto concentrado final puede dañarse a temperaturas elevadas. Esta es la alimentación más utilizada.

Las temperaturas de ebullición van disminuyendo de efecto a efecto. Esto significa que si el primer efecto está a 1 atm abs de presión, el último estará al vacío.

8.3.3 Evaporadores de efecto múltiple con alimentación en retroceso

La alimentación entra al último efecto, que es el más frío, y continúa hacia atrás hasta que el producto concentrado sale por el primer efecto. Este método de alimentación en retroceso tiene ventajas cuando la alimentación es fría, pues la cantidad de líquido que debe calentarse a temperaturas más altas en el segundo y primer efecto es más pequeña. Sin embargo, es necesario usar bombas en cada efecto, pues el flujo va de baja a alta presión. Este método también es muy útil cuando el producto concentrado es bastante viscoso. Las altas temperaturas de los primeros efectos reducen la viscosidad y permiten coeficientes de transferencia de calor de valor razonable.

8.3.4 Evaporadores de efecto múltiple con alimentación en paralelo

La alimentación en paralelo en evaporadores de efecto múltiple implica la adición de alimentación nueva y la extracción de producto concentrado en cada uno de los efectos. El vapor de cada efecto se usa para calentar el siguiente.

Este método de operación se utiliza principalmente cuando la alimentación está casi saturada y el producto son cristales sólidos, tal como sucede en la evaporación de salmueras para la producción de sal.

8.4 Efectos de las variables de proceso en la operación de evaporadores

1. Efecto de la temperatura de alimentación
2. Efecto de la presión
3. Efecto de la presión de vapor de agua

8.5 Elevación del punto de ebullición de las disoluciones

En la mayoría de los casos de evaporación, las soluciones no son tan diluidas, por lo que las propiedades térmicas de las soluciones que se evaporan pueden ser muy diferentes a las del agua.

En soluciones concentradas de solutos disueltos no es posible predecir la elevación del punto de ebullición debido a la presencia del soluto. Sin embargo, se puede usar una ley empírica muy útil conocida como regla de Dühring.

En un evaporador de múltiple efecto bien diseñado, siempre se asume que la concentración de la solución dentro del evaporador es la misma que la que sale, debido a que las condiciones conocidas son las de entrada y salida, y no las de la solución, ya que se asume una mezcla perfecta.

8.6 Gráficas de entalpía y concentración de soluciones

Cuando el calor de disolución de la solución acuosa que se está concentrando en el evaporador es bastante alto, despreciarlo en los balances de calor puede causar errores considerables.

Cuando se disuelven lentejas de NaOH en cierta cantidad de agua, se observa que se presenta una elevación considerable de la temperatura, esto es, se desprende calor, al cual se le llama calor de disolución. La cantidad de calor desprendida depende del tipo de sustancia y de la cantidad de agua usada.

Otro factor que es útil para medir la eficacia de un evaporador es la entalpía, la cual se encuentra en gráficas. Para conocer la entalpía se necesita conocer la temperatura y la concentración.

8.7 Balances de evaporadores

La idea general aplicada para un evaporador de efecto simple es la misma que para uno de efectos múltiples.

Los balances realizados en un evaporador son los siguientes:

- a. Balance de masa
- b. Balance de energía

8.8 Condensadores para evaporadores

Por regla general, los vapores del último efecto de los evaporadores de efecto múltiple salen al vacío, esto es, a presiones inferiores a la atmosférica.

Estos vapores deben condensarse y descargarse como líquido a presión atmosférica. El condensador puede ser de superficie o de contacto directo.

8.8.1 Condensador de superficie

En este condensador el vapor por condensar y el líquido de enfriamiento están separados por una pared metálica.

8.8.2 Condensador de contacto directo

El vapor y el líquido de enfriamiento se mezclan directamente. Los condensadores de superficie son mucho más costosos y utilizan mayor cantidad de agua de enfriamiento, por lo que no se emplean cuando un condensador de contacto directo resulta adecuado.

Uno de los tipos más comunes de condensadores de contacto directo es el barométrico.

8.8.2.1 Condensador barométrico de contacto

El agua de enfriamiento se pone en contacto directo con el vapor para condensarlo. Los condensadores barométricos de contacto pueden ser de dos tipos:

- a. Flujo a contracorriente
- b. Flujo paralelo

El vapor entra al condensador y se condensa al elevarse contra una cortina de gotas de agua de enfriamiento. El condensador se sitúa en la parte superior de un tubo largo de descarga. El condensador está a una altura suficiente por encima del punto de descarga del tubo como para que la columna de agua en el interior de éste compense de manera sobrada la diferencia de presión entre la presión absoluta baja en el condensador y la atmósfera. De esta manera, el agua se descarga por gravedad a través de un recipiente de sellado en el extremo inferior.

Para mantener un proceso a un vacío sustancialmente completo, se requiere una pierna barométrica de 10.4 metros (34 pies) de agua considerándose desde la descarga del condensador hasta el pozo caliente.

El condensador barométrico es barato y ahorrador en cuanto al consumo de agua.

Como la cantidad de agua que sale es muy grande, se hace un circuito cerrado. El pozo caliente sirve para que no se pierda el vacío. En la torre de enfriamiento, el agua está en contacto con el aire, cediéndole calor y transfiriendo masa al aire. El aire debe estar lo más seco posible ya que si está húmedo o saturado, no absorberá. La idea principal es que la torre de enfriamiento sirva para enfriar el agua, dado a que el aire absorbe parte del agua, perdiendo entalpía el agua del tanque, enfriándose.

El agua que está en el pozo caliente subirá porque se hace vacío hasta una altura tal que se iguale la presión atmosférica que de ser 1 atm o 760 mmHg sería 10.34 m.

CONCLUSIONES

En base a los antecedentes sobre este método de enseñanza-aprendizaje, se concluye lo siguiente:

1. El uso de aparatos visuales, como lo es una presentación de diapositivas por computadora, permite percibir el mensaje de una forma más clara, logrando un proceso de aprendizaje eficiente, motivador y duradero.
2. Al utilizar una presentación de diapositivas, el docente puede optimizar el tiempo destinado a su período de clase para presentar al alumno el contenido del curso, ya que evita la transcripción de fórmulas, gráficas y esquemas en el pizarrón.
3. Los medios visuales contribuyen a que el docente desarrolle el contenido del curso en forma dinámica, ya que promueve la participación del estudiante.
4. Es importante que los docentes utilicen aparatos visuales como apoyo didáctico para tener una mejor planificación y programación de sus cursos.

RECOMENDACIONES

Después de evaluar el método de enseñanza, a través de una presentación de diapositivas por computadora en el curso Transferencia de Calor, se recomienda lo siguiente:

1. Despertar el interés del sector docente de la Escuela de Ingeniería Química por el conocimiento y uso de los recursos visuales para el desarrollo del proceso enseñanza-aprendizaje.
2. Fomentar el uso de aparatos visuales en otros cursos de la Escuela de Ingeniería Química, ya que éstos hacen que el proceso de aprendizaje sea efectivo, motivador y duradero, obteniendo como resultado un mejor rendimiento académico.
3. Coordinar actividades conjuntas a este método de enseñanza, como hojas de trabajo, investigaciones, exámenes, visitas técnicas, etc., para complementar el curso.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Basco Engineered Shell & Tube Heat Exhangers.** Estados Unidos de América: API Heat Transfer Inc., 2003.
2. **Basco Type 500 Heat Exchangers.** Estados Unidos de América: API Heat Transfer Inc., 2000.
3. Fernández Díez, Pedro. **Ingeniería térmica y de fluidos.** España: Universidad de Cantabria, 2003.
4. Geankoplis, Christie. **Procesos de transporte y operaciones unitarias.** Tercera edición. México: Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V., 1998.
5. Kern, Donald Q. **Procesos de transferencia de calor.** México: Compañía Editorial Continental, 1965.
6. McCabe, Warren, *et al.* **Operaciones unitarias en ingeniería química.** Cuarta edición. España: McGraw-Hill, 1991.
7. Perry, Robert, *et al.* **Manual del ingeniero químico.** Quinta edición. México: McGraw-Hill, 1982.
8. Rodas Martini, Alvaro Hugo. **Mecanismos para el transporte de fluidos en ingeniería química presentados mediante ayudas audio-visuales.** Tesis Ingeniería Química. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1981.

9. Rodríguez, Marco Antonio. Utilización y uso adecuado de los recursos audiovisuales en el proceso enseñanza-aprendizaje de la Escuela de Ciencias Psicológicas de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Tesis Ciencias Psicológicas. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ciencias Psicológicas, 1988.

10. Sagastume, Herminia. Los aparatos audiovisuales y su incidencia en el proceso de aprendizaje; en el programa integral de licenciatura en el interior del país, en 1987. Tesis Licenciatura en Pedagogía y Ciencias de la Educación. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Humanidades, 1988.