



**Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de energía con y sin reacción química; y balances simultáneos de materia y energía**

Duque Osorio, Jorge Geovanny

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de

Petroquímico

Ing. Luna Ortiz, Eduardo David

27 de agosto del 2021



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el Trabajo de Unidad de Integración Curricular, “**Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de energía con y sin reacción química; y balances simultáneos de materia y energía**” fue realizado por el señor **Duque Osorio, Jorge Geovanny** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 27 de agosto del 2021



Firmado electrónicamente por:

**EDUARDO  
DAVID LUNA**

.....  
**Ing. Luna Ortiz, Eduardo David**

**C.C.: 1802724912**



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

### REPORTE DE VERIFICACIÓN



#### Document Information

Analyzed document	Duque_Osorio_Jorge_Geovanny_UIC-202150.pdf (D111762887)
Submitted	8/27/2021 9:35:00 PM
Submitted by	Lorena Ibarra
Submitter email	loretaibarra@yahoo.es
Similarity	4%
Analysis address	lorenadibarra.uta@analysis.arkund.com



Ing. Luna Ortiz, Eduardo David

C.C.: 1802724912

#### Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="https://qdoc.tips/principios-elementales-de-los-procesos-quimicos-jpr504-pdf-free.html">https://qdoc.tips/principios-elementales-de-los-procesos-quimicos-jpr504-pdf-free.html</a> Fetched: 5/17/2021 6:22:02 PM		10
<b>W</b>	URL: <a href="http://148.206.53.233/tesiuami/UAMI10854.pdf">http://148.206.53.233/tesiuami/UAMI10854.pdf</a> Fetched: 11/25/2020 12:29:20 AM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://pdfcookie.com/documents/principios-elementales-de-los-procesos-quimicos-felder-52e1d009ydv8">https://pdfcookie.com/documents/principios-elementales-de-los-procesos-quimicos-felder-52e1d009ydv8</a> Fetched: 5/18/2021 5:42:31 AM		13
<b>W</b>	URL: <a href="https://hdquimicaeiqtal.files.wordpress.com/2018/10/libro-de-balance-felder.pdf">https://hdquimicaeiqtal.files.wordpress.com/2018/10/libro-de-balance-felder.pdf</a> Fetched: 11/5/2019 6:22:05 PM		14
<b>W</b>	URL: <a href="https://pdfcoffee.com/introduccion-a-los-procesos-quimicos-regina-m-murphy-4-pdf-free.html">https://pdfcoffee.com/introduccion-a-los-procesos-quimicos-regina-m-murphy-4-pdf-free.html</a> Fetched: 6/12/2021 2:36:29 AM		4
<b>W</b>	URL: <a href="https://pdfcoffee.com/1-termodinamica-6ta-edicion-kurt-c-rolle-pdf-free.html">https://pdfcoffee.com/1-termodinamica-6ta-edicion-kurt-c-rolle-pdf-free.html</a> Fetched: 5/17/2021 6:47:52 AM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://dokumen.site/download/termodinamica-basica-a5b39efc2377a3">https://dokumen.site/download/termodinamica-basica-a5b39efc2377a3</a> Fetched: 8/16/2021 5:10:53 AM		1



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

#### RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Duque Osorio, Jorge Geovanny**, con cédula de ciudadanía n° 0503506859, declaro que el contenido, ideas y criterios del Trabajo de Unidad de Integración Curricular: **Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de energía con y sin reacción química; y balances simultáneos de materia y energía** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 27 de agosto del 2021

.....  
**Duque Osorio, Jorge Geovanny**

C.C.: 0503506859



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Duque Osorio, Jorge Geovanny**, con cédula de ciudadanía n°0503506859, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el Trabajo de Unidad de Integración Curricular: **Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de energía con y sin reacción química; y balances simultáneos de materia y energía** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 27 de agosto del 2021

.....  
**Duque Osorio, Jorge Geovanny**

C.C.: 0503506859

## DEDICATORIA

Con todo mi amor y mi cariño para mi madre, quien hizo todo en la vida para que yo pueda lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que no podía continuar, para mi madre por siempre mi corazón y mi gratitud.

Con todo mi cariño y gratitud a Mirian Merino y su hermosa familia, por ser como una hermana, una madre y estar conmigo siempre apoyándome e impulsándome a seguir adelante.

A mis primos Bertha, Diego, Gladys, Miguel, Willian y a mis tíos María, Pablo, Nelson, Genaro y Milton por siempre estar conmigo y apoyarme, de todo corazón muchas gracias, ojala algún día yo me convierta en esa fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino así como ustedes lo son en el mío.

A la memoria de Agustín Duque y Guillermo Duque, un abrazo desde la tierra al cielo.

## **AGRADECIMIENTO**

Le agradezco a mi madre por apoyarme en todo momento, por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mi prima Mirian Merino por ser como una madre y estar presente en todo momento para ayudarme e impulsarme a seguir adelante.

A mi tutor Ing. David Luna O. por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia y su enseñanza ha logrado guiarme para poder concluir con el trabajo de integración curricular.

A Alex, Brayan, Dayanara, Diego, Lili, Paola, Romi y Vanesa, agradecerles por su amistad y su apoyo en todos estos años que hemos compartido como compañeros y amigos.

**Tabla de contenidos**

<b>Carátula.....</b>	<b>1</b>
<b>Certificación .....</b>	<b>2</b>
<b>Reporte de verificación .....</b>	<b>3</b>
<b>Responsabilidad de autoría.....</b>	<b>4</b>
<b>Autorización de publicación.....</b>	<b>5</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>7</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>9</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>10</b>
<b>    Generalidades .....</b>	<b>11</b>
<b>Antecedentes.....</b>	<b>11</b>
<b>Planteamiento del problema.....</b>	<b>11</b>
<b>Justificación e importancia .....</b>	<b>11</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>12</b>
<b><i>Objetivo general .....</i></b>	<b>12</b>
<b><i>Objetivos específicos .....</i></b>	<b>12</b>
<b>Capítulo ii.....</b>	<b>13</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>14</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>14</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>14</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>16</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>18</b>

## RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en una compilación bibliográfica orientada a convertirse en un instrumento de gran utilidad para estudiantes de pre-grado de ingeniería química y petroquímica. En el capítulo uno se presentan conceptos fundamentales de energía, se define la primera ley de la termodinámica en sistemas cerrados y abiertos, se explica los tipos de energía que puede poseer un sistema y se trata balances de energía mecánica y la ecuación de Bernoulli. El segundo capítulo muestra como formular y aplicar los balances de energía para sistemas abiertos con múltiples entradas y salidas sin reacciones químicas, además de revisar las trayectorias hipotéticas de procesos para cambios de estados y como utilizar los diagramas psicrométricos. En el capítulo tres se indica cómo calcular el calor de reacción a una temperatura específica e ilustra cómo estimar el calor de reacción estándar a partir del calor de formación y combustión, además se muestra los balances de energía para un sistema reactivo utilizando el método de calor de reacción y el método de calor de formación. En el capítulo cuatro se presentan balances de materia y energía simultáneos que se aplican a procesos complejos que se llevan a cabo industria química y petroquímica. La metodología académica desde lo básico a lo complejo es esencial para la buena comprensión y la estimulación del razonamiento de los estudiantes, por tal razón se desarrolló ejercicios de aplicación para diferentes unidades de proceso partiendo desde lo esencial hasta ejercicios complejos en los que se desarrollan un sistema de resolución.

*Palabras clave:*

- **ENERGÍA**
- **BALANCE DE ENERGÍA**
- **BALANCE CON REACCIÓN QUÍMICA**
- **BALANCE SIN REACCIÓN QUÍMICA**

## ABSTRACT

The present work focuses on a bibliographic compilation aimed at becoming a very useful instrument for undergraduate students of chemical and petrochemical engineering. In chapter one fundamental concepts of energy are presented, the first law of thermodynamics in closed and open systems is defined, the types of energy that a system can pose are explained, and mechanical energy balances and the Bernoulli equation are discussed. The second chapter shows how to formulate and apply energy balances for open systems with multiple inputs and outputs without chemical reactions, as well as reviewing the hypothetical trajectories of processes for changes of states and how to use psychrometric diagrams. Chapter three indicates how to calculate the heat of reaction at a specific temperature and illustrates how to estimate the standard heat of reaction from the heat of formation and combustion, it also shows the energy balances for a reactive system, using the method of heat of reaction and heat of formation method. In chapter four simultaneous mass and energy balances are presented that are applied to complex processes carried out in the chemical and petrochemical industry. The academic methodology from the basic to the complex is essential for the good understanding and the stimulation of the students' reasoning, for this reason, he sealed application exercises for different process units, starting from the essential to complex exercises in which a system of resolution.

*Keywords:*

- **ENERGY**
- **ENERGY BALANCE**
- **BALANCE WITH CHEMICAL REACTION**
- **BALANCE WITHOUT CHEMICAL REACTION**

## Capítulo I

### 1. Generalidades

#### 1.1 Antecedentes

El sector de la industria petrolera que incluye a la petroquímica, tiene por característica principal la integración de procesos relacionados a operaciones unitarias y balances de materia y energía, es fundamental conocer los cambios que se llevan a cabo para de esta manera entender su funcionamiento y poder ofrecer alternativas de operación para poder optimizar los consumos de energía (Balcão et al., 2001; Gary & Handwerk, 1994).

Los balances de materia y energía son los primeros pasos para iniciar los cálculos en ingeniería química, petroquímica y afines, porque sirven para caracterizar cualquier proceso y de esta manera determinar el grado de eficiencia, permitiendo analizar instalaciones en las etapas correspondientes al diseño y producción tanto a nivel piloto y a escala de industria (González et al., 2009). Los ingenieros entenderán mejor los principios de la termodinámica cuando se tenga una buena percepción de los balances de materia y energía (Ashrafizadeh & Tan, 2018).

#### 1.2 Planteamiento del Problema

En los procesos de ingeniería química y petroquímica, entender los balances de energía y balances simultáneos de materia y energía presentan cierta complejidad. Si bien existe variedad en trabajos bibliográficos sobre balances de energía, no existe suficiente información para balances de energía aplicado a procesos relacionados a la petroquímica.

#### 1.3 Justificación e Importancia

La compilación y generación de información bibliográfica de balances de energía con y sin reacción química en procesos de ingeniería química aplicada a la petroquímica, está destinado principalmente a exponer conceptos, métodos y consideraciones para la resolución de problemas que surgen en relación con los procesos que involucran o no a reactores químicos, centrándose en los sistemas con y sin reacción química y en balances simultáneos de materia y energía, con el fin de

poder aplicar los conceptos y resolver problemas que se presentan en la ingeniería química, petroquímica y afines.

El objetivo de compilar y generar material bibliográfico, es el de utilizar esta información para elaborar un capítulo de balance de energía con y sin reacción química, y balances simultáneos de materia y energía, que servirá para la elaboración de un libro que se presentará como una alternativa de aprendizaje de los principios básicos y las técnicas de cálculo utilizadas, además de familiarizarlos con los fundamentos de la aplicación de los balances de materiales y energía en la ingeniería química y petroquímica.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Compilar y generar información referente a los balances de energía con y sin reacción química, además de analizar y compilar información sobre los balances simultáneos de materia y energía.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información referente a la conceptualización de la energía para el desarrollo de la ecuación general de balance de energía en sistemas abiertos y cerrados utilizando los procesos de la termodinámica.
- Describir los procesos de balance de energía sin reacción química, utilizando las bases de la termodinámica y la ecuación de balances de energía.
- Describir los procesos de balance de energía con reacción química, utilizando las bases de la termodinámica y la ecuación de balances de energía.
- Identificar los conceptos sobre ecuaciones generales de balance de materia y energía, para la resolución de sistemas simultáneos.
- Elaborar material bibliográfico referente a los balances de energía con y sin reacción química y balances simultáneos de materia y energía.

## Capítulo II

El producto acreditable a presentar es el material bibliográfico compilado sobre el tema “Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de energía con y sin reacción química; y balances simultáneos de materia y energía”, para ser utilizado en la elaboración de un libro de balance de materia y energía se encuentra detallado en el anexo 1.

## Capítulo III

### Conclusiones y recomendaciones

#### 3.1 Conclusiones

- El desarrollo de buenas estrategias de resolución de problemas basado en la compilación de información científica, es importante para que el estudiante genere un enfoque sistemático adecuado, que le permita derivar ecuaciones especificando los procesos y tenga noción referente a la aplicación de procesos en ingeniería.
- Los balances simultáneos de materia y energía son empleados en el desarrollo de procesos de la industria química y petroquímica permitiendo controlar y mejorar el rendimiento de los productos cuando el sistema no permite realizar balances de materia y energía por separado.
- En el proceso de compilación de información correspondiente a balances de energía con reacción química se puede concluir que, para resolver estos problemas se debe utilizar los métodos de calor de reacción o el método de calor de formación dependiendo del proceso que se lleve a cabo.
- La petroquímica involucra varios sistemas que requiere cantidades considerables de energía para que se puedan llevar a cabo, por lo tanto es importante determinar cómo fluye la energía desde o hacia las unidades involucradas y de esta manera mejorar los procesos y obtener mejores rendimientos de productos.
- La compilación de información bibliográfica que se llevó a cabo permitió recolectar datos suficientes para poder presentar al lector un material de estudio que le ayude a resolver problemas balances de energía aplicados a la petroquímica y afines.

#### 3.2 Recomendaciones

- Utilizar balances de materia y energía para realizar análisis económico, mejoramiento del rendimiento de productos deseados y búsqueda de nuevas alternativas de procesos.

- Utilizar programas de computadora que permitan simular procesos químicos que se presentan en el material bibliográfico para complementar el aprendizaje en balances de materia y energía.
- Para la generación de diagramas psicrométricos a condiciones específicas de operación se recomienda el uso de programas de computadora como Greenheck, Psicro entre otros.
- Se recomienda que en el desarrollo de nuevos materiales bibliográficos de balances de materia y energía se incluya información referente a procesos de refinería y biorrefinería.

## Bibliografía

- Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Mass and Energy Balances: Basic Principles for Calculation, Design, and Optimization of Macro/Nano Systems*.  
<http://www.springer.com/series/1161>
- Balcão, V. M., Mateo, C., Fernández-Lafuente, R., Malcata, F. X., & Guisán, J. M. (2001). Structural and functional stabilization of L-asparaginase via multisubunit immobilization onto highly activated supports. *Biotechnology Progress*, 17(3), 537–542. <https://doi.org/10.1021/BP000163R>
- Bruschi, Y. M., Izurieta, E. M., López, E., Pedernera, M. N., & Borio, D. O. (2013). Combustión de etanol sobre catalizadores estructurados para el acoplamiento térmico de reacciones. Estudio cinético. *XVIII Congreso Argentino de Catálisis, November 2017*.
- Cardoso, G., Puzhi, M., & Zhinín, S. (2016). Simulación de los Procesos Psicrométricos Simulation of Psychrometric Processes. *Facultad de Ciencias Químicas*, 13, 25–39. <http://www.vpclima.upv.es/psicro.htm>
- Chaudhuri, U. R. (2016). Fundamentals of Petroleum and Petrochemical Engineering. *Fundamentals of Petroleum and Petrochemical Engineering*.  
<https://doi.org/10.1201/b10486>
- Delgado Linares, J. G., Delgado Linares, G. A., & Mercado Ojeda, R. A. (2009). Balances de masa y energía simplificados, aplicados a un proceso de craqueo catalítico de petróleo. *Educación Química*, 20(4), 456–460.  
[https://doi.org/10.1016/s0187-893x\(18\)30050-8](https://doi.org/10.1016/s0187-893x(18)30050-8)
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos* (G. Noriega (ed.)). Limusa S.A. de C.V.
- Gary, J. H., & Handwerk, G. E. (1994). Petroleum Refining: Technology and Economics. In *Chemical Engineering Science* (Vol. 49, Issue 16). [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(94\)87025-x](https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)87025-x)
- Ghasem, N., & Henda, R. (2012). Principles of chemical engineering processes. In *Principles of Chemical Engineering Processes*. <https://doi.org/10.1201/b17696>

- González, L. P., Puchol, R. Q., Castellanos, J. E., Crespo, A. C., & Pérez, C. R. G. (2009). *Instalaciones Experimentales En La Producción De Ferroaleaciones Y Escorias*. 221–226. <https://www.elsevier.es/es-revista-educacion-quimica-78-articulo-balances-masa-energia-simplificados-aplicados-S0187893X18300508>
- Herrera, L. Á., & Calvo Sánchez, J. C. (2012). Formalina: características y mecanismos de control ante la exposición del personal en los servicios de anatomía patológica a nivel hospitalario. 2012. *Revista Medica de Costa Rica y Ccentroamerica LXIX*, 602, 235–339.
- Himmelblau David. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (Sexta). University of Texas.
- Izquierdo, J., Costa, J., Martínez de la Ossa, E., Rodríguez, J., & Izquierdo, M. (2011). *Introducción a la Ingeniería Química: Problemas resueltos de balances de materia y energía*. Editorial Reverté.
- Matar, S., & Hatch, Lewis F. (1995). Chemistry of petrochemical processes. In *World Pumps* (Vol. 1995, Issue 345). [https://doi.org/10.1016/s0262-1762\(99\)81158-4](https://doi.org/10.1016/s0262-1762(99)81158-4)
- Murphy, R. M. (2007). *Introducción a los procesos químicos: principios, análisis y síntesis*. (2da ed.). McGraw-Hill.
- Saravia, D. (n.d.). Calculadora psicrometrica, su recodificacion y preparacion para internet. *Universidad Nacional de Salta*.
- Sullivan, D., Metro, S., & Pujadó, P. R. (2015). Isomerization in Petroleum Processing. In *Handbook of Petroleum Processing*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14529-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14529-7_7)
- Torres Robles, R., & Castro Arellano, J. J. (2002). *Análisis y simulación de procesos de refinación del petróleo*. <http://site.ebrary.com/id/10365911>
- Turton Richard, Bailie Richard, Whiting Wallace, S. J. (2009). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*.
- Veverka, V. V., & Madron, F. (1997). *Material and Energy Balancing in the Process Industries: From Microscopic Balances to Large Plants* (L. M. Rose (ed.)). Elsevier Science B.V.

**ANEXOS**

**Anexo 1**

**Análisis y compilación de información bibliográfica  
referente a los balances de energía con y sin  
reacción química; y balances simultáneos de materia  
y energía**

## Contenido

Energía y Balances de Energía .....	1
Objetivos de aprendizaje .....	1
1.1 Balances de Energía.....	2
1.1.1 Primera Ley de la Termodinámica .....	2
1.1.2 Formas de Energía.....	3
1.1.3 Balances de Energía para un Sistema Cerrado .....	7
1.1.4 Balances de Energía para un Sistema Abierto .....	11
1.1.5 Turbina de Vapor .....	17
1.1.6 Calentadores y Enfriadores.....	19
1.1.7 Compresores .....	21
1.2 Procedimientos para resolver el Balance de Energía.....	26
1.3 Balance de Energía Mecánica .....	29
1.4 Ecuación De Bernoulli .....	35
Balances de Energía en Procesos sin Reacción Química .....	41
Objetivos de aprendizaje .....	41
2.1 Estados de referencia.....	41
2.2 Trayectorias Hipotéticas de Procesos .....	44
2.3 Cálculos de Entalpía.....	49
2.3.1 Cambios de Entalpía por Variación de la Temperatura .....	49
2.3.2 Capacidad de Calor Constante .....	54
2.3.3 Calculo de Entalpía con Cambio de Fase .....	58
2.3.4 Balances de Energía para Sistemas Abiertos con Múltiples Entradas y Múltiples Salidas .....	60
2.3.5 Cambio de Entalpía debido a una Mezcla .....	64
2.4 Diagramas psicrométricos .....	67
Balance de Energía con Reacción Química.....	80
Objetivos de aprendizaje .....	80
3.1 Calor de Reacción.....	81
3.2 Calores de Formación y Calor de Combustión .....	82

3.2.1 Avance de la Reacción.....	88
3.3 Balance de Energía para Procesos Reactivos.....	92
3.3.1 Método de Calor de Reacción.....	92
3.3.2 Método de Calor de Formación .....	93
3.4 Balances Simultáneos de Materia y Energía.....	95
3.4.1 Temperatura Desconocida de Salida del Proceso.....	117
3.5 Procesos de combustión.....	121
Balances Simultáneos de Material y Energía.....	131
Objetivos de aprendizaje.....	131
4.1 Balances de Materia.....	131
4.1.1 Conversión.....	132
4.1.2 Rendimiento .....	132
4.1.3 Selectividad .....	133
4.1.4 Alcance de la Reacciónξ.....	133
4.2 Balances de Energía.....	133
4.2.1 Método de Calor de Reacción.....	134
4.2.2 Método de Calor de Formación .....	134
4.2.3 Concepto de Equilibrio Atómico.....	134
4.2.4 Formulación Matemática del Equilibrio Atómico.....	135
4.2.5 Análisis de Grados de Libertad para el Equilibrio Atómico.....	135
4.2.6 Implementación del Reciclaje en el Proceso de Separación.....	138
Apéndice.....	156

## Simbología

$E_k$	Energía cinética
$\dot{E}_k$	Velocidad de transporte de la energía cinética
$m$	Masa de un cuerpo
$v$	velocidad
$V$	volumen
$\dot{m}$	Flujo másico
$n$	Cantidad en moles
$\dot{n}$	Flujo molar
$P$	Presión
$R$	Constante de gases
$T$	Temperatura
$\dot{V}$	Flujo volumétrico
$\widehat{V}$	Volumen específico
GDL	Grados de libertad. (Abreviatura en castellano)
$E_p$	Energía potencial gravitacional
$g$	Aceleración de la gravedad
$z$	Altura
$i$	Estado inicial
$fi$	Estado final
$U$	Energía interna
$\dot{U}$	Velocidad de transporte de la energía interna
$\widehat{U}$	Energía interna específica
$Q$	Calor
$\dot{Q}$	Flujo de calor
$W$	Trabajo
$\dot{W}_s$	Trabajo de flecha
$\dot{W}_f$	Trabajo de flujo
$e$	Entrada
$s$	Salida
$H$	Entalpía
$\dot{H}$	Flujo entálpico
$\widehat{H}$	Entalpía específica
$\widehat{H}_v$	Entalpía específica de vaporización
$\Delta$	Es el cambio de una variable en el proceso
$\xi$	Avance de reacción, en una reacción química solo existe un valor de avance de reacción
$\gamma_i$	Coefficiente estequiométrico de un componente $i$ en una reacción química
$\rho$	Densidad

f	Conversión fraccional
Ge	Gravedad específica
F	Pérdida de fricción
A	Área
D	Diámetro
$C_p$	Capacidad calorífica a presión constante
$C_v$	Capacidad calorífica a volumen constante
$T_{bs}$	Temperatura de bulbo seco
$T_{bh}$	Temperatura de bulbo Húmedo
$T_{pr}$	Temperatura de rocío
$h_r$	Humedad relativa
$\widehat{\Delta H}_{Rx}$	Calor de reacción
$\widehat{\Delta H}_{Rx}^o$	Calor de reacción estándar
$\widehat{\Delta H}_f^o$	Calor estándar de formación
$\widehat{\Delta H}_f$	Calor de formación
$\widehat{\Delta H}_c^o$	Calor estándar de combustión
$\widehat{\Delta H}_c$	Calor de combustión
$\widehat{\Delta U}_{Rx}$	Energía interna de reacción

# 1

## Energía y Balances de Energía

En el presente capítulo se revisarán conceptos fundamentales de energía, que servirán para aplicarse en los distintos procesos que impliquen balances de energía. Se definirá la primera ley de la termodinámica en sistemas cerrados y abiertos, luego se explicarán los tipos de energía que puede poseer un sistema, y como esta energía se transmite, además, se utilizarán ejercicios de aplicación para resolver balances de energía en las diferentes unidades de proceso y en los equipos utilizados principalmente en la industria química y petroquímica. En este capítulo, además, se tratará balances de energía mecánica y la ecuación de Bernoulli.

### Objetivos de aprendizaje

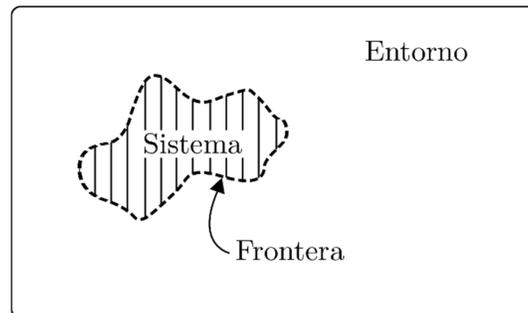
1. Definir un sistema y los componentes que conforman un balance de energía general para un proceso.
2. Calcular los balances de energía para las diversas formas de transferencia entre un sistema y sus alrededores.
3. Usar tablas de vapor sobrecalentado y saturado para determinar propiedades termodinámicas a condiciones diferentes.
4. Explicar el procedimiento para resolver problemas con balances de energías.
5. Derivar ecuaciones de balance de energía mecánica a partir de los balances de un sistema abierto.

## 1.1 Balances de Energía

### 1.1.1 Primera Ley de la Termodinámica

La termodinámica se encarga de estudiar los sucesos de diversos procesos de intercambio, interacción y uso óptimo de la energía, además de analizar las propiedades térmicas de la materia.

La termodinámica estudia la relación que existe entre calor y el trabajo en referencia a la energía de un determinado universo. Este universo hace referencia a un sistema termodinámico arbitrario, con un límite definido que encierra a un volumen, ocurriendo cambios físicos o químicos, con el propósito de llegar implícitamente al concepto de frontera, en donde se separa al sistema del resto de universo y se lo denominará entorno, como por ejemplo un recipiente, un metal, un equipo mecánico, etc.



**FIGURA 1.1**

Esquema de un sistema, frontera y entorno

Entorno.- También llamado ambiente o medio circundante, es la materia o región que rodea el sistema.

Frontera.- Es el límite de un sistema.

Sistema.- Es una región parte del universo sobre la que se fija el estudio.

Sistemas aislados.- Sistemas donde no existe intercambio de materia y energía con el entorno.

Sistemas cerrados.- Sistemas donde no existe intercambio de materia, pero si hay intercambio de energía.

Sistemas abiertos.- Sistemas donde existe intercambio de materia y energía a través de sus fronteras.

### 1.1.2 Formas de Energía

La primera ley de la termodinámica “Ley de la Conservación de la Energía”, donde la energía no se crea ni se destruye, pero puede transformarse o transferirse de un cuerpo a otro por medio de un flujo de calor, transferencia de materia o al realizar un trabajo.

Las energías de un sistema están comprendidas por cinética, potencial e interna; la primera hace referencia al movimiento del sistema, mientras que la energía potencial se enfoca en el estudio de la posición del sistema en un campo gravitacional y la energía interna se da por los movimientos e interacciones moleculares, atómicas y subatómicas del sistema que no esté inmerso con las definiciones de energía cinética y potencial.

#### 1.1.2.1 Energía Cinética

Es la energía que posee un sistema que se encuentra en movimiento debido a una velocidad. La energía cinética ( $E_k$ ) de un cuerpo de masa ( $m$ ) que se mueve a una velocidad ( $v$ ) y se representa de la siguiente forma:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

Para el caso en el que un fluido ingrese a un sistema con una velocidad de flujo másico ( $\dot{m}$ ), y a una velocidad ( $v$ ), la energía cinética es representada por:

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad (1.2)$$

### Ejemplo 1.1 Cálculo de la Energía Cinética

Un gas metano se transporta por una tubería horizontal de 6 cm de diámetro interno a una temperatura de 250 °C y presión de 150 kPa con una velocidad de 38 m/s, suponiendo que el gas se comporta de manera ideal cual es el valor de la energía cinética en W (watt).

#### Solución

Para calcular la energía cinética se debe conocer una masa y una velocidad de flujo, la velocidad se conoce pero la masa es desconocida. Al suponer comportamiento de gas ideal, se hará el uso de la ecuación de los gases ideales para calcular el número de moles, y con el peso molecular del metano se encontrará su masa.

La ecuación de los gases ideales viene dada por:

$$PV = nRT$$

donde (P) es la presión, (V) es el volumen, (n) son las moles del gas, (R) es la constante universal de los gases y (T) es la temperatura.

Para calcular el volumen primero se deberá conocer el área de la tubería y multiplicarla por la velocidad del fluido, para obtener un flujo volumétrico  $\dot{V}$ .

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi(3\text{cm})^2$$

$$A = 28.27\text{cm}^2 \frac{1\text{m}^2}{(100\text{cm})^2} = 0,00287\text{m}^2$$

$$\dot{V} = \frac{38\text{m}}{\text{s}} \times 0,00287\text{m}^2 = 0.107 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$P\dot{V} = \dot{n}RT$$

$$\dot{n} = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

$$\dot{n} = \frac{(150 \text{ kPa}) \left(0.107 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{\left(8.3144598 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}}\right) (523.15\text{K})} = 3.689 \times 10^{-3} \frac{\text{kmol de CH}_4}{\text{s}}$$

$$\dot{m} = 3.689 \times 10^{-3} \frac{\text{kmol CH}_4}{\text{s}} \frac{16 \text{ kg CH}_4}{1 \text{ kmol CH}_4} = 0.059 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ de CH}_4$$

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$$

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \left(0.059 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(\frac{38\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$\dot{E}_k = 42.626 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

$$\text{Cambio de unidades: } J = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \text{ y } W = \frac{J}{\text{s}}$$

$$\dot{E}_k = 42.626 \text{ W}$$

### 1.1.2.2 *Energía Potencial*

Es la energía que posee o adquiere un cuerpo al momento de desplazarse en forma vertical en un campo gravitacional, un ejemplo común es el dejar caer un objeto sobre otro a una cierta altura del suelo sin hacer ningún esfuerzo, lo más probable es que el objeto que ya se encontraba en el suelo se mueva, entonces la energía que necesitaba este objeto para poder moverse proviene del objeto que cayó de una cierta altura, es decir la energía se obtuvo de la altura en la que se encontraba el objeto que se dejó caer al estar atraída por la energía gravitacional del suelo, a esta energía se le conoce como energía potencial gravitacional.

La energía potencial gravitacional se representa por:

$$E_P = mgz \tag{1.3}$$

donde ( $E_P$ ) es la energía potencial gravitacional, ( $m$ ) es la masa del cuerpo, ( $g$ ) es la aceleración de la gravedad y ( $z$ ) la altura a la que se encuentra un cuerpo en relación a un punto de referencia.

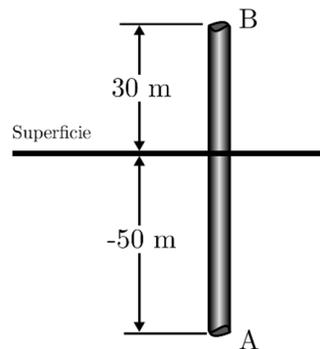
Generalmente se puede calcular los cambios de energía potencial cuando un fluido o cuerpo se mueve verticalmente de un punto A hasta un punto B aplicando la variación de energías ( $E_{P_B} - E_{P_A}$ ).

### Ejemplo 1.2 Cálculo de la Energía Potencial

Se desea bombear agua que se encuentra en un pozo a 50 metros por debajo de la superficie terrestre hasta un tanque que se encuentra a 30 metros por encima de la superficie, el flujo másico a la que se bombea al agua es de 20 kg/s. Determinar la tasa de cambio en la energía potencial.

### Solución

Punto de referencia es la superficie terrestre



**FIGURA DEL EJEMPLO 1.2.1**

Esquema del punto de referencia para un pozo de agua

Altura punto A = -50 m

Altura punto B = +30 m

$$E_{P_A} = mgz_A$$

$$E_{P_B} = mgz_B$$

$$E_{PB} - E_{PA} = mgz_B - mgz_A$$

$$\Delta E_P = mg(z_B - z_A)$$

$$\Delta E_P = 20 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (30 - (-50))$$

$$\Delta E_P = 20 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (30 - (-50))$$

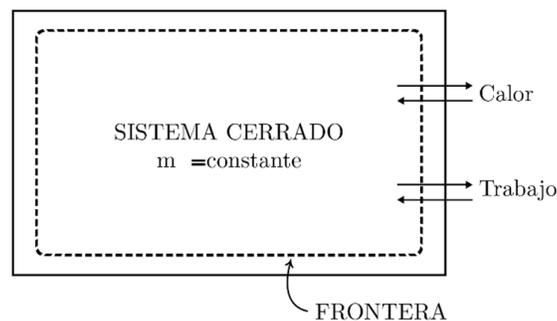
$$\Delta E_P = 15680 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$$

$$\Delta E_P = 15680 \text{ W}$$

### 1.1.3 Balances de Energía para un Sistema Cerrado

En un sistema cerrado la masa no traspasa las fronteras, pero la energía si puede cruzar en forma de trabajo y calor. Para calcular la cantidad de energía que fluye desde o hacia el sistema se realizan balances de energía, estos balances son de utilidad para determinar la energía neta requerida en cada proceso, y así, poder especificar formas en las que se puede reducir el consumo de energía con el fin de mejorar la eficiencia y rentabilidad del proceso.

Se debe tener en cuenta que un proceso por lotes es un sistema cerrado y los procesos semicontinuos o continuos son sistemas abiertos.



**FIGURA 1.2**

Balances de Energía para un Sistema Cerrado

La ecuación del balance de energía para un sistema cerrado es la siguiente:

$$\text{entrada} - \text{salida} + \text{generación} - \text{consumo} = \text{acumulación} \quad (1.4)$$

Como la energía no se puede crear y destruir, los términos de generación y consumo se cancelan, simplificándose la ecuación a:

$$\text{entrada} - \text{salida} = \text{acumulación} \quad (1.5)$$

En procesos de energía los términos de entrada y salida en el balance se definen como la energía neta transferida, y la acumulación como la diferencia entre la energía final e inicial del sistema.

$$\text{energía neta transferida} = \text{energía final} - \text{energía inicial} \quad (1.6)$$

$$\text{energía inicial del sistema} = U_i + E_{K_i} + E_{P_i} \quad (1.7)$$

$$\text{energía final del sistema} = U_{fi} + E_{K_{fi}} + E_{P_{fi}} \quad (1.8)$$

$$\text{energía neta transferida al sistema} = Q - W \quad (1.9)$$

donde (i) y (fi) son estado inicial y final del sistema, (U) es la energía interna, ( $E_K$ ) es la energía cinética, ( $E_P$ ) es la energía potencial, (Q) es el calor transferido al sistemas desde los alrededores y (W) es el trabajo que realiza el sistema sobre los alrededores.

$$Q - W = (U_{fi} + E_{K_{fi}} + E_{P_{fi}}) - (U_i + E_{K_i} + E_{P_i}) \quad (1.10)$$

$$Q - W = (U_{fi} - U_i) + (E_{K_{fi}} + E_{K_i}) + (E_{P_{fi}} - E_{P_i}) \quad (1.11)$$

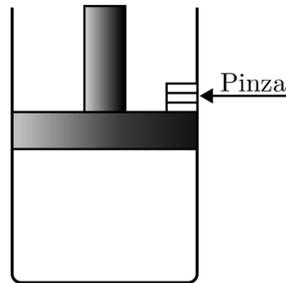
$$Q - W = \Delta U + \Delta E_K + \Delta E_P \quad (1.12)$$

### **Ejemplo 1.3 Balances de Energía para un Sistema Cerrado**

Un gas de comportamiento ideal contenido en un cilindro con un émbolo se encuentra a una temperatura de 30 °C.

El émbolo es fijado con una pinza para que no se mueva y el cilindro se introduce en agua hirviendo, se sabe que se transfiere 3 kcal de calor al gas y esto ocasiona que se equilibre a 95 °C. Luego se libera el émbolo

y se observa que se desplaza debido al trabajo de 100 joules que realiza el gas, la temperatura final del gas es de 100 °C.



**FIGURA DEL EJEMPLO 1.3.1**

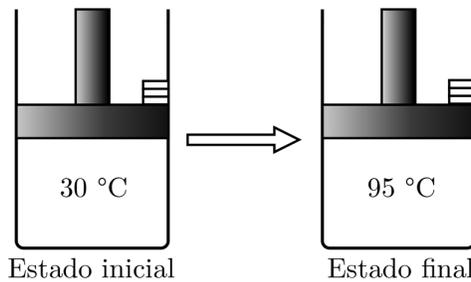
Esquema de un émbolo fijado con una pinza

Para todas las etapas de este proceso escribir las ecuaciones de balance de energía y resolver.

Consideraciones: Ignore el cambio de energía potencial del gas al momento en que se desplaza el émbolo en dirección vertical.

### Solución

En la primera etapa del proceso se observa que la temperatura del sistema (gas) aumenta y el émbolo se mantiene en posición fija.



**FIGURA DEL EJEMPLO 1.3.2**

Cambio de presión en un cilindro émbolo

El balance general de energía para la primera etapa es:

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_K + \Delta E_P$$

Consideraciones del proceso:

El sistema se encuentra en estado estacionario, debido a que los parámetros no varían a través del tiempo; a pesar que la temperatura cambie los valores al inicio y al final del proceso son constantes, es decir, siempre serán 30 °C y 95 °C respectivamente. Por lo tanto,  $\Delta E_K = 0$ .

Al no considerar el movimiento del émbolo verticalmente la  $\Delta E_P = 0$ .

El sistema no realiza ningún trabajo sobre los alrededores, ni tampoco existe un instrumento mecánico en el sistema, por tanto  $W = 0$

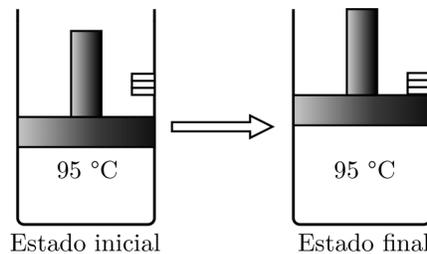
Simplificando la ecuación general se obtiene:

$$Q = \Delta U$$

$$Q = 3 \text{ kcal (Calor que ingresa al sistema)}$$

$$\Delta U = 3 \text{ kcal}$$

En la segunda etapa del proceso se observa que la temperatura del sistema (gas) es constante y el émbolo se eleva debido al trabajo que realiza el gas.



**FIGURA DEL EJEMPLO 1.3.3**

Esquema de un cambio de posición del émbolo en el cilindro

El balance general de energía para la segunda etapa es:

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_K + \Delta E_P$$

El sistema se encuentra en estado estacionario, debido a que los parámetros no varían a través del tiempo, por lo tanto,  $\Delta E_K = 0$ .

No es considerada en el problema por lo tanto  $\Delta E_P = 0$ .

Debido a que la energía interna  $U$  depende solo de la variación de la temperatura y esta no cambia, por lo tanto,  $W=0$

Simplificando la ecuación general se obtiene:

$$Q - W = 0$$

$$Q = W$$

$$W = 100 \text{ Joules (Trabajo que ejerce el gas)}$$

$$Q = 100 \text{ Joules}$$

### 1.1.4 Balances de Energía para un Sistema Abierto

Por definición la masa atraviesa las fronteras del sistema para un proceso abierto según se va ocurriendo. Para que se origine la transferencia de materia desde los alrededores hacia el sistema por medio de las fronteras, el trabajo debe ser realizado en el sistema para empujar el fluido de entrada a una presión. Ahora, si la transferencia de materia se realiza desde el sistema hacia los alrededores, se efectuará un trabajo sobre los alrededores para impulsar el fluido de salida a una presión.

#### 1.1.4.1 Trabajo de Flujo y Flecha

El trabajo total que realiza un sistema sobre los alrededores es la suma del trabajo de flecha y de flujo, expresado de la siguiente manera:

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \dot{W}_{fl} \quad (1.13)$$

##### 1.1.4.1.1 Trabajo de Flecha $\dot{W}_s$ .

Es el trabajo que realiza el fluido sobre alguna parte móvil dentro del sistema, puede ser el mecanismo de una bomba, pistón, turbina etc.

#### **1.1.4.1.2 Trabajo de Flujo $\dot{W}_{fl}$ .**

Es la diferencia de trabajo que realiza el fluido a la salida y a la entrada del sistema expresada de la siguiente forma:

$$\dot{W}_{fl\text{entrada}} = P_e \dot{V}_e \quad (1.14)$$

$$\dot{W}_{fl\text{salida}} = P_s \dot{V}_s \quad (1.15)$$

$$\dot{W}_{fl} = \dot{W}_{fl\text{salida}} - \dot{W}_{fl\text{entrada}} = P_s \dot{V}_s - P_e \dot{V}_e \quad (1.16)$$

donde (P) es la presión y ( $\dot{V}$ ) es el flujo volumétrico.

Si el proceso está constituido de varias corrientes de entrada (e) y salida (s) al sistema, el producto de P $\dot{V}$  de cada corriente se tendrá sumar.

#### **1.1.4.2 Propiedades Intensivas, Extensivas y Específicas.**

##### **1.1.4.2.1 Propiedad Extensiva**

Son propiedades que dependen de la masa, como el peso, el volumen, el calor, etc.

##### **1.1.4.2.2 Propiedad Intensiva**

Son propiedades que no dependen de la masa, como la temperatura, la presión, la densidad, el volumen específico, etc.

Por ejemplo, al sumar 1 litro de agua a 20 °C y 2 litros a 20 °C se obtiene 3 litros de agua a 20 °C, el volumen es considerado propiedad extensiva ya que se puede sumar, pero la temperatura es una propiedad intensiva porque no depende de la cantidad de agua, es decir, la temperatura no se puede sumar, la temperatura siempre será 20 °C independiente del volumen que se tenga.

### 1.1.4.2.3 Propiedad Específica

Es una magnitud intensiva que se obtiene al dividir dos propiedades extensivas entre sí o una extensiva para una cantidad de masa, se denota con el símbolo ( $\hat{\quad}$ ), por ejemplo el volumen específico de un líquido que tiene como volumen 500  $\text{cm}^3$  y masa de 250 g será  $\hat{V} = 2 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$ .

### 1.1.4.3 Entalpía

Es la cantidad de energía térmica que un sistema llega a intercambiar con sus alrededores, se define como la suma entre la energía interna (U) del volumen del fluido que se agrega al sistema y el trabajo de flujo (PV) realizado en el sistema, con el fin de impulsar el fluido dentro o fuera del sistema. La función de la entalpía es importante para analizar sistemas abiertos y se expresa de la siguiente forma:

$$H = U + PV \quad (1.17)$$

De manera idéntica la velocidad de transporte de la entalpía (ecuación 1.18) y la entalpía específica (ecuación 1.19) viene dada por:

$$\dot{H} = \dot{U} + P\dot{V} \quad (1.18)$$

$$\hat{H} = \hat{U} + P\hat{V} \quad (1.19)$$

El balance de materia para un sistema abierto en estado estacionario establece el término de la acumulación en cero y por la primera ley de la termodinámica se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Entrada de energía} = \text{Salida de energía} \quad (1.20)$$

Para este caso los términos de generación y consumo de la ecuación general del balance de materia no desaparecen, dado que la entrada de energía hace referencia a la velocidad total del transporte de energías, como son la cinética, potencial e interna en todas las corrientes existentes incluyendo la velocidad de transferencia

de energía en forma de calor, y a la salida se tendrá la velocidad total de transporte de energías en todas las corrientes salientes más la velocidad de transferencia de energía hacia afuera del sistema en forma de trabajo.

$$\dot{Q} + \sum_e (\dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{U}) = \dot{W} + \sum_s (\dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{U}) \quad (1.21)$$

$$\sum_s \dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{U} - \sum_e \dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{U} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (1.22)$$

donde (e) hace referencia a las corrientes de entrada y (s) hace referencia a las corrientes de salida.

El trabajo total que realiza el sistema sobre sus alrededores es igual a la suma del trabajo de flecha y el trabajo de flujo, por tanto, la ecuación se reescribe de la siguiente forma:

$$\sum_s (\dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{U}) - \sum_e (\dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{U}) = \dot{Q} - (\dot{W}_s + \dot{W}_f) \quad (1.23)$$

Por la definición del trabajo de flujo se tiene que:

$$\dot{W}_{fl} = \sum_s P \dot{V} - \sum_e P \dot{V} \quad (1.24)$$

Reemplazando en la ecuación 1.23 se obtiene:

$$\sum_s (\dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{U} + P \dot{V}) - \sum_e (\dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{U} + P \dot{V}) = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (1.25)$$

Por definición, se sabe que la entalpía es la suma de la energía interna y el trabajo de flujo, por tanto:

$$\sum_s (\dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{H}) - \sum_e (\dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{H}) = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (1.26)$$

Finalmente se usará el símbolo delta ( $\Delta$ ) para indicar las corrientes totales a la salida menos la entrada de corrientes totales para cada término de energía presente en la ecuación de balance.

$$\Delta \dot{E}_K + \Delta \dot{E}_P + \Delta \dot{H} = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (1.27)$$

### Ejemplo 1.4 Balances de Energía para un Sistema Abierto

Un vapor que fluye a 25 kg/h entra en una turbina de vapor con una velocidad de 65 m/s y sale en un sitio a 8 m debajo de la entrada a una velocidad de 250 m/s. Una estimación es la pérdida de calor de la turbina con un valor de 15 kW, la turbina genera un trabajo de flecha de 65 kW. Calcular el cambio de flujo entálpico del proceso.

#### Solución

Se considera a la turbina como un sistema abierto, entonces:

Balance de energía para un sistema abierto:

energía de entrada=energía de salida

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p$$

El calor perdido en un sistema será negativo:

$$\dot{Q} = -15 \text{ kW}$$

Las unidades de kW equivalen a kJ/s:

$$\dot{Q} = -15 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

La turbina genera trabajo el valor será positivo:

$$\dot{W}_s = 65 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_s = 65 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Cálculo de cambio en la energía cinética, aplicando el concepto de energía cinética:

$$\Delta\dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{m}(v_2^2 - v_1^2)$$

Se reemplazará los valores de flujo másico ( $\dot{m}$ ), velocidad de entrada ( $v_1$ ), velocidad de salida ( $v_2$ ) dados en el problema, y se ajustan a las unidades correspondientes:

$$\Delta \dot{E}_k = \frac{1}{2} \left( 25 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \left( \left( 250 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left( 65 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \right)$$

$$\Delta \dot{E}_k = 728437.5 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2 \times \text{h}}$$

$$\Delta \dot{E}_k = 728437.5 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2 \text{h}} \times \frac{\text{N}}{\text{kg m/s}^2} \times \frac{\text{J}}{\text{Nm}} \times \frac{\text{kJ}}{1000 \text{ J}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$\Delta \dot{E}_k = 0.2023 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Cálculo de cambio en la energía potencial, aplicando el concepto de energía potencial:

$$\Delta \dot{E}_p = \dot{m} g (z_2 - z_1)$$

Se sustituye el valor de flujo másico  $\dot{m}$ , el cambio de altura en la entrada y salida de la turbina ( $z_2 - z_1$ ):

$$\Delta \dot{E}_p = \dot{m} g (z_2 - z_1)$$

$$\Delta \dot{E}_p = 25 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times (-8 - 0) \text{m}$$

$$\Delta \dot{E}_p = -1962 \frac{\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{h} \times \text{s}^2}$$

Cambio de unidades:

$$\Delta \dot{E}_p = -1962 \frac{\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{hs}^2} \times \frac{\text{N}}{\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \times \frac{\text{J}}{\text{Nm}} \times \frac{\text{kJ}}{1000 \text{ J}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = -0.00055 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

En algunos casos se puede simplificar los cálculos para el cambio de energía potencial, dado que este valor es insignificante en la ecuación de balance de energía.

Se sustituyen los valores calculados de  $\dot{Q}$ ,  $\dot{W}_s$ ,  $\Delta\dot{E}_p$ ,  $\Delta\dot{E}_k$  en la ecuación de balance de energía:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p$$

El cambio de entalpía será:

$$\Delta\dot{H} = -15 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 65 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 0.2023 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - \left( -0.00055 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right) = -80.202 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

### 1.1.5 Turbina de Vapor

Las turbinas de vapor son sistemas abiertos, en la mayoría de los casos funcionan adiabáticamente y la presión de salida es menor que la presión de entrada. La turbina es un motor giratorio que convierte la energía de una corriente de un gas en energía mecánica, el eje de la turbina o rodete cuenta con álabes, cuchillas, hélices o discos, el fluido que ingresa en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. La energía mecánica producida se transfiere a través de un eje. Las turbinas producen trabajo, y este trabajo producido debe ser transferido o proporcionado a un compresor o una bomba.

#### Ejemplo 1.5 Trabajo de Turbina y Tablas de Vapor

Con el fin de calentar una corriente de un proceso se usa vapor que ingresa a una turbina a una velocidad de 1750 kg/s, la turbina opera a 40 bar y 400° C. Sale fuera de turbina como vapor húmedo a 4 bar. La turbina funciona adiabáticamente produciendo 2500 MW de trabajo. Calcular: la temperatura del vapor que sale de la turbina y la fracción de masa de vapor en la corriente dejando la turbina.

#### Solución

Mediante el uso de la tabla A.5 del apéndice A se obtienen los valores de entalpía a las condiciones de entrada y salida del vapor.

Las condiciones de entrada del vapor son 40 bar y 400 °C.

Entalpía de vapor a las condiciones de entrada: 3216 kJ/kg.

Dado que el vapor que sale de la turbina es una mezcla de líquido y vapor, debe estar saturado o húmedo.

La condición de la mezcla de vapor y líquido a la salida es 4 bar.

Entalpías de líquido (apéndice A, tabla A.4) y el vapor (apéndice A, tabla A.5) son 604,7 y 2737,6 kJ/kg respectivamente, y la temperatura es 143,6 °C.

Se debe considerar una turbina adiabática, los términos de energía potencial y cinética no son tomados en cuenta porque no se presentan datos concernientes, obteniendo la expresión:

$$\Delta\dot{H} = -\dot{W}_s$$

Detallando la expresión

$$-\dot{W}_s = \Delta\dot{H} = \dot{H}_{\text{salida}} - \dot{H}_{\text{entrada}} = \dot{m}(\hat{H}_{\text{salida}} - \hat{H}_{\text{entrada}})$$

Sustituyendo valores conocidos de trabajo, caudal másico y entalpía específica de entrada obtenidas anteriormente de tablas bibliográficas.

$W_s$  hace referencia al trabajo que está produciendo la turbina.

$$-\dot{W}_s = -2500 \text{ MW} = -2,5 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 1750 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (\hat{H}_{\text{salida}} - 3216 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$\hat{H}_{\text{salida}} = 1787.4285 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para obtener a X que expresa la fracción de masa que está en fase de vapor, procedemos a:

$$\hat{H}_{\text{salida}} = 1787.4285 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \hat{H}_f + x\hat{H}_{fg} = 604.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + x(2737.6 - 604.7) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$1787.4285 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 604.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + x(2132.9) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x = 0.5545$$

Obteniendo que la composición de vapor es  $x = 0,5545$  equivalente al 55.45 % en peso de vapor. Por tanto, hay un 55.45% de humedad en el vapor de agua y la diferencia de 44,54% en peso de agua líquida.

### 1.1.6 Calentadores y Enfriadores

Los calentadores y enfriadores como los intercambiadores de calor de tubo y carcasa son sistemas abiertos que se emplean para enfriar o calentar fluidos. En la mayoría de los casos estos sistemas en la superficie están aislados por lo que el calor solo se transfiere entre las corrientes de fluido frías y calientes a través de las paredes de los tubos.

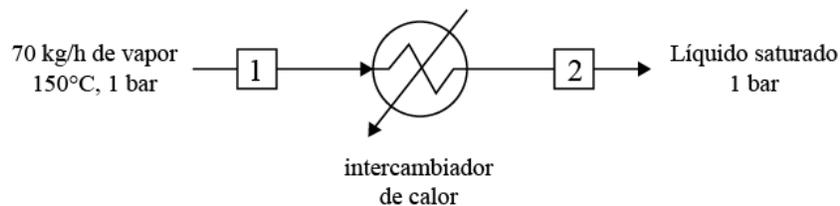
El intercambio de calor se enfoca en la tasa de transferencia de calor entre cuerpos fríos y calientes. Existen tres métodos en los que se puede dar la transferencia de calor como la conducción, convección y radiación. En un intercambiador, el calor únicamente se transfiere por conducción y por convección. Los intercambiadores se diseñan específicamente para el uso que se requiere.

Los intercambiadores de carcasa y tubos son los que más se utilizan en una planta de proceso. Está estructurado con un paquete de tubos encerrados en un caparazón. Es económico y el mantenimiento y limpieza es relativamente fácil, la mayoría tienen paquetes extraíbles para facilitar la limpieza. Estos intercambiadores se usan para condensar vapores, para enfriar líquidos de proceso, intercambio de calor entre dos corrientes de proceso y recalentadores (ebullición en servicio de fraccionamiento).

### Ejemplo 1.6 Intercambiador de Calor

En un intercambiador de calor de tubos y carcasa ingresa vapor por los tubos a un flujo másico de 70 kg/h a 150 °C y 1 bar de presión. Este vapor es usado para calentar agua fría que fluye por la carcasa y sale como líquido saturado, sin considerar una caída de presión en el sistema. Calcular cuánto calor se debe transferir del vapor al agua fría.

### Solución



**FIGURA DEL EJEMPLO 1.7.1**

Esquema de un intercambiador de calor

Usando la tabla de vapor sobrecalentado (apéndice A, tabla A.5) se obtiene que la entalpía específica a la entrada

$$\hat{H}_{\text{entrada}}(1 \text{ bar}, 150^{\circ}\text{C}) = 2776 \text{ kJ/kg}$$

Usando la tabla de vapor saturado (apéndice A, tabla A.4) se obtiene que la entalpía específica a la salida

$$\hat{H}_{\text{salida}}(1 \text{ bar}) = 417.5 \text{ kJ/kg}$$

No existe cambio en el caudal másico de vapor:

$$\dot{m} = \dot{m}_{\text{entrada}} = \dot{m}_{\text{salida}} = 70 \text{ kg/h}$$

Al ser un sistema abierto el balance general es:

$$\Delta\dot{H} + \Delta E_K + \Delta E_P = \dot{Q} - \dot{W}_S$$

Supuestos:

El fluido no realiza trabajo sobre alguna parte móvil:  $\dot{W}_S = 0$

No existe variación en la altura, es decir la entrada y salida están al mismo nivel:  $\Delta E_P = 0$

Al no conocer los diámetros de los tubos de las corrientes de entrada y salida se asume que son los mismos, y no existe variación en las velocidades y el cambio de energía cinética es insignificante:  $\Delta E_K = 0$

Al simplificar el balance general se obtiene:

$$\Delta \dot{H} = \dot{Q}$$

La velocidad de flujo entálpico en función de la entalpía específica es:

$$\Delta \dot{H} = \dot{m} \Delta \hat{H}$$

Reemplazar en el balance general el flujo entálpico por la entalpía específica

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta \hat{H}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} (\hat{H}_{\text{sale}} - \hat{H}_{\text{entra}})$$

$$\dot{Q} = 70 \frac{\text{kg}}{\text{h}} (417.5 - 2776) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -165095 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

### 1.1.7 Compresores

Los compresores son sistemas abiertos usados para aumentar la presión en las corrientes de vapor. La presión en la entrada de un compresor será menor que a la salida. Los compresores necesitan de trabajo para poder funcionar.

Existen cuatro tipos generales de compresores como centrífugo, axial, reciprocante y rotatorio. El nombre de cada tipo de compresor es dado descriptivamente por la utilidad que tendrá en el proceso.

Los compresores centrífugos son utilizados ampliamente en las industrias del petróleo, el gas y la química, debido a las grandes cantidades que deben procesarse y para controlar derrames. El funcionamiento continuo a largo plazo sin revisión hace que el compresor centrífugo sea adecuado para su uso en aplicaciones de refinación de petróleo y gas natural. Un ejemplo típico es un compresor de reciclaje para procesar corrientes ricas en hidrógeno en algunos procesos petroquímicos y de refinación de petróleo.

Los compresores axiales se utilizan ampliamente como compresores para motores a reacción y turbinas de gas y consisten en impulsores que giran entre los estatores del impulsor. El aire fluye paralelo al eje de rotación a través del compresor. Los compresores axiales son más atractivos económicamente que los compresores centrífugos en aplicaciones donde las tasas de flujo de aire exceden los 70,000 pies cúbicos efectivos por minuto en condiciones de succión. Los compresores son muy pequeños en comparación con la capacidad y ligeramente más eficientes que las centrífugas.

Los compresores reciprocantes se utilizan ampliamente en la industria química y del petróleo. Consisten en pistones móviles en un cilindro con válvulas de admisión y escape. Su principal ventaja es que pueden manejar de manera eficiente cargas intermitentes, independientemente de las características del gas. Se usa en aplicaciones que son demasiado lentas para centrifugadoras y se usa casi exclusivamente en servicios donde las presiones generales no exceden los 5,000 psig. En comparación con los compresores centrífugos, los compresores alternativos deben apagarse con más frecuencia para mantener las válvulas y otras piezas desgastadas. Para servicios críticos, esto requiere el reemplazo del compresor o la instalación de varios compresores para mantener la planta en funcionamiento. Además, son grandes y pesados debido a su capacidad.

Los compresores rotativos consisten en dos hélices giratorias en una carcasa sin contacto real. Los compresores rotativos son más económicos y tienen una mayor eficiencia que los compresores centrífugos. No son sensibles a las características del gas ya que son máquinas de desplazamiento positivo. Este compresor es ruidoso y sensible al aumento de temperatura.

### **Ejemplo 1.7 Compresor**

Se alimenta vapor a un compresor a 350 °C y 2 bar de presión absoluta. El vapor entra al compresor a una velocidad de 30 m/s. El diámetro interior del tubo a la entrada es de 0,12 m. En la parte de descarga de la tubería, después del compresor, el diámetro interior es menor y la velocidad de descarga es de 165 m/s. En la salida del compresor se encuentra vapor sobrecalentado a 400 °C y 60 bar absoluto. El compresor tiene una pérdida de calor al ambiente de 7 kW. Determinar la potencia del compresor.

### **Solución**

Se considera al compresor como un sistema abierto en estado estacionario, entonces:

Balance de energía para un sistema abierto:

energía de entrada=energía de salida

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p$$

El sistema no presenta una variación en la altura, entonces:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k$$

Se determina los valores de la entalpía específica y volumen específico de vapor sobrecalentado de la tabla A. 5 (apéndice A):

Para la corriente de entrada del compresor:

$$\widehat{H}_{\text{entrada}} (20 \text{ bar}, 350 \text{ }^\circ\text{C}) = 3139 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\widehat{V}_{\text{entrada}} (20 \text{ bar}, 350 \text{ }^\circ\text{C}) = 0.139 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Para la corriente de salida del compresor:

$$\widehat{H}_{\text{salida}} (60 \text{ bar}, 400 \text{ }^\circ\text{C}) = 3180 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\widehat{V}_{\text{salida}} (60 \text{ bar}, 400 \text{ }^\circ\text{C}) = 0.0474 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Se calcula el flujo másico en la entrada utilizando la definición de densidad multiplicado por flujo volumétrico:

$$\dot{m} = \rho \times \dot{V}$$

Ahora se utilizan definiciones de la densidad y el flujo volumétrico, entonces:

$$\rho = \frac{1}{\widehat{V}}$$

$$\dot{V} = v \times \text{Area} = v \times \frac{\pi D^2}{4}$$

Se reemplaza las definiciones de densidad y flujo volumétrico en la ecuación para obtener el flujo másico:

$$\dot{m} = \frac{1}{\widehat{V}} \left( v \times \frac{\pi D^2}{4} \right)$$

Se sustituyen los valores de velocidad y diámetro dados en el problema y el valor de volumen específico previamente obtenido:

$$\dot{m} = \frac{1}{0.139 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \left( 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{\pi (0.12\text{m})^2}{4} \right) = 2.441 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Se calcula el cambio en el flujo de entalpía, tomando en cuenta que el flujo másico no cambiará en el sistema:

$$\Delta\dot{H} = \dot{m}(\widehat{H}_{\text{salida}} - \widehat{H}_{\text{entrada}})$$

$$\Delta\dot{H} = 2.441 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( 3180 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3139 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 100.1 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Se calcula el cambio de energía cinética:

$$\Delta\dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{m}(v_2^2 - v_1^2)$$

Se reemplaza los valores de flujo másico ( $\dot{m}$ ), velocidad de entrada ( $v_1$ ), velocidad de salida ( $v_2$ ) dados en el problema:

$$\Delta\dot{E}_k = \frac{1}{2} \times 2.441 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \left( \left( 165 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left( 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \right)$$

$$\Delta\dot{E}_k = 32129.663 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$$

$$\Delta\dot{E}_k = 32129.663 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3} \times \frac{\text{N}}{\text{kg m/s}^2} \times \frac{\text{J}}{\text{N} \times \text{m}} \times \frac{\text{kJ}}{1000 \text{ J}}$$

$$\Delta\dot{E}_k = 32.13 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

El calor perdido por el compresor será negativo, dado que el calor sale del sistema:

$$\dot{Q} = -7 \text{ kW}$$

Se calcula  $\dot{W}_s$  con la ecuación de balance de energía:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p$$

Se reemplazan los valores obtenidos:

$$-7 \text{ kW} - \dot{W}_s = 100.1 \text{ kW} + 32.13 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_s = -139.23 \text{ kW}$$

El trabajo es negativo porque es realizado sobre el sistema, para convertir a caballos de fuerza se usa un factor de conversión, y se toma el valor positivo del trabajo de flecha:

$$\text{Potencia} = 139.23 \text{ kW} \times \frac{1.341 \text{ hp}}{1 \text{ kW}} = 186.71 \text{ hp}$$

## 1.2 Procedimientos para resolver el Balance de Energía

Para resolver un balance de energía es fundamental diagramar y etiquetar el proceso con las corrientes y las respectivas unidades de procesos que se lleva a cabo, se debe incluir toda la información necesaria para encontrar la entalpía de cada especie que se encuentre involucrada en el proceso, la temperatura y presión, y los estados de agregación de cada componente (sólido, líquido o vapor).

### Ejemplo 1.8 Balance de Energía de un solo Componente

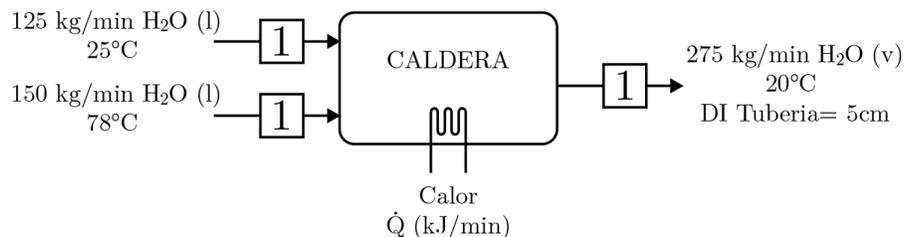
A una caldera ingresan dos corrientes de agua que se mezclan y a la salida de la caldera se obtiene vapor que fluye por una tubería de 5 cm de diámetro interno. Calcule la alimentación necesaria de calor en kJ/min si el vapor está saturado, ignore la energía cinética.

Corriente de alimentación 1    125 kg/min a 25 °C

Corriente de alimentación 2    150 kg/min a 78 °C

Presión caldera                    20 bar

#### Solución



**FIGURA DEL EJEMPLO 1.8.1**

Esquema de una caldera

**1. De ser posible se deberá determinar las velocidades de flujo de las especies en las corrientes mediante balance de masa,** para este ejercicio el flujo másico que entra será igual al que sale, la velocidad del vapor es 295 kg/min.

**2. Se determinará las entalpías específicas para cada componente de las corrientes.** Las tablas A.4 del apéndice A, se usan para determinar las entalpías específicas para agua líquida a las temperaturas de 25 °C y 78 °C y para determinar la entalpía específica a una presión de 20 bar donde se encuentra el vapor saturado esta tabla también aporta la temperatura de vapor saturado a la presión correspondiente.

$$\hat{H} \text{ a } 25 \text{ °C} = 104.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\hat{H} \text{ a } 78 \text{ °C} = 326.4 \text{ kJ/kg}$$

$$\hat{H} \text{ a } 20 \text{ bar} = 2797.2 \text{ kJ/kg}$$

$$T \text{ a } 20 \text{ bar} = 212.4 \text{ °C}$$

**3. Por último se deberá escribir los balances de energía.** En este ejercicio se trata de un sistema abierto.

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p$$

Suposiciones

$\dot{W}_s=0$  no existe partes móviles que realicen algún trabajo en el sistema

$\Delta\dot{E}_p=0$  no hay desplazamientos de alturas

$$\dot{Q} = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k$$

$$\dot{H} = \sum_{\text{salida}} \dot{m}_i \hat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{m}_i \hat{H}_i$$

$$\dot{H} = \left(275 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right) \left(2797.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) - \left[ \left(125 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right) \left(104.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right) \left(326.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) \right]$$

$$\dot{H} = 7.07 \times 10^5 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}$$

Calcular la energía cinética

El volumen específico del vapor saturado es 0.0995 m<sup>3</sup>/kg.

Se debe calcular el área transversal para una tubería de 5cm.

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi (2.5 \text{ cm})^2 \times \frac{1 \text{ m}^2}{(100 \text{ cm})^2}$$

$$A = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Para calcular la velocidad del vapor se aplica la siguiente fórmula:

$$v = \frac{\dot{m} \hat{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{A}$$

Para las entradas el volumen se puede suponer insignificantes por ser valores que tienden a cero, por tanto se calculará solo para la salida.

$$v = \frac{\left(275 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) \left(0.0995 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)}{1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2}$$

$$v = 232.674 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La energía cinética de la entrada es insignificante

$$\Delta \dot{E}_k = \frac{\dot{m} v^2}{2}$$

$$\Delta \dot{E}_k = \frac{1}{2} \left(275 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right) \left(232.674 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$\Delta \dot{E}_k = 7.443 \times 10^6 \frac{\text{kg m}^2}{\text{min s}^2}$$

Cambio de unidades: 1N = kg  $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  y 1kJ = 1000N m

$$\Delta \dot{E}_k = 7.443 \times 10^6 \frac{\text{N m}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{kJ}}{1000 \text{ N m}} = 7.44 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}$$

Reemplazar los valores calculados en la ecuación de balance de energía para este proceso.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k \\ \dot{Q} &= 7.07 \times 10^5 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} + 7.44 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} \\ \dot{Q} &= 7.78 \times 10^5 \text{ kJ/min} \end{aligned}$$

Cuando el proceso tiene 2 o más componentes se deben determinar por separado las entalpías de cada sustancia, cuando se trata de gases ideales o de líquidos con estructuras parecidas se puede suponer que la entalpía específica es la misma para una mezcla o la sustancia pura a las mismas presiones y temperaturas.

### 1.3 Balance de Energía Mecánica

En la mayoría de procesos mecánicos los cambios en la energía potencial y energía cinética presentan mayor relevancia que los cambios casi insignificantes de energía interna o calor. Los balances que incluyen energía mecánica son utilizados en proceso de plantas hidroeléctricas, máquinas de vapor, motor de combustión interna, motor eléctrico, etc.

En un análisis de un balance general de energía mecánica, se debe tomar en cuenta un sistema abierto, que tendrá una entrada y una salida. Para evitar acumulación en el sistema, el régimen será estacionario, esto ocasionará que el flujo másico sea igual en la entrada y salida del sistema. Entonces, el análisis será:

$$\text{energía de salida} - \text{energía de entrada} = \text{energía transferida} \quad (1.28)$$

Al describir todas las energías:

$$\left( \dot{U}_s + \dot{E}_{K_s} + \dot{E}_{P_s} + P_s \dot{V}_s \right) - \left( \dot{U}_e + \dot{E}_{K_e} + \dot{E}_{P_{,e}} + P_e \dot{V}_e \right) = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (1.29)$$

Se obtiene el flujo másico como factor común de todos los términos de la parte izquierda de la ecuación, se obtendrá términos como el volumen específico  $\widehat{V}$  y la energía interna específica  $\widehat{U}$ :

$$\dot{m} \left( \widehat{U}_s + \frac{v_s^2}{2} g z_s + P_s \widehat{V}_s - \widehat{U}_e + \frac{v_e^2}{2} g z_e + P_e \widehat{V}_e \right) = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (1.30)$$

donde las abreviaturas (s) y (e), son la salida y entrada del sistema respectivamente, (g) es la gravedad, (z) es altura, (P) es presión, ( $\widehat{V}$ ) es volumen específico, (Q) es calor y ( $\dot{W}_s$ ) es el trabajo de flecha.

Para abreviar la ecuación de balance general se tomarán algunas consideraciones como:

$$\widehat{V} = 1/\rho \quad (1.31)$$

Asumiendo que en el sistema entra un fluido incompresible

$$\widehat{V}_s = \widehat{V}_e = 1/\rho \quad (1.32)$$

La variación de energía interna

$$\Delta \widehat{U} = \widehat{U}_s - \widehat{U}_e \quad (1.33)$$

Variación de presión

$$\Delta P = P_s - P_e \quad (1.34)$$

Basándose en las consideraciones anteriores el balance general de energía mecánica, será el siguiente:

$$\frac{-\dot{W}_s}{\dot{m}} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g \Delta z + \Delta \widehat{U} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \quad (1.35)$$

En esta nueva ecuación encontramos el término  $\Delta \widehat{U} - \dot{Q}/\dot{m}$ , este término, cuando no existen reacciones químicas y cambios de fase, se considera una pérdida debido

a la fricción viscosa generada por el fluido. Esta pérdida de fricción se representa con la letra F.

$$\frac{-\dot{W}_s}{\dot{m}} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z + F \quad (1.36)$$

donde  $(\dot{W}_s/\dot{m})$  representa el trabajo realizado hacia los alrededores por el sistema por unidad de masa.

### **Ejemplo 1.9 Ecuación de Balance de Energía Mecánica**

Un tanque que contiene agua puede proveer  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  para que sea utilizado en el sistema contra de incendios en un laboratorio químico. El suministro de agua proviene de una reserva principal, la elevación de la reserva es de 1000 m, la elevación del laboratorio es 820 m sobre nivel del mar. La tubería que transporta el agua se ubica a una profundidad de 20 m desde la superficie de la reserva principal. Las pérdidas por fricción en la línea de agua a la planta están dadas por la relación de  $0.02 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}L$ , L es la longitud de la tubería. El tubo que lleva el agua de la reserva al tanque tiene un diámetro interior de 0.2 m y una longitud de 5000 m. Determine la energía que debe proporcionar la bomba.

### **Solución**

En el enunciado se tienen los siguientes valores:

Flujo volumétrico,  $\dot{V} = 0.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Las elevaciones inicial y final son:

Elevación final,  $z_1 = (1000 - 20) \text{ m}$

Elevación final,  $z_2 = 820 \text{ m}$

La pérdida de fricción se da por la relación:  $F = 0.02 \frac{m}{s^2} L$

Diámetro del tubo,  $D=0.2$

Densidad del agua,  $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$

El balance general de energía mecánica:

$$\frac{-\dot{W}_S}{\dot{m}} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z + F$$

En este problema la presión en los dos puntos será la misma, están a presión atmosférica. Entonces, se procede a calcular la velocidad en el punto final, tomando en cuenta que la velocidad inicial es cero.

$$v_2 = \frac{\dot{V}}{A}$$

Cálculo del área de un tubo:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.2)^2}{4} = 0.0314 \text{ m}^2$$

Cálculo de la velocidad:

$$v_2 = \frac{0.5 \frac{m^3}{s}}{0.0314 m^2} = 15.9236 \frac{m}{s}$$

Flujo másico:

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho$$

$$\dot{m} = 0.5 \frac{m^3}{s} \times 1000 \frac{kg}{m^3} = 500 \frac{kg}{s}$$

Variación de elevación:

$$\Delta Z = 980m - 820 = 160m$$

Cálculo del trabajo con el balance general de energía mecánica:

$$\frac{-\dot{W}_s}{\dot{m}} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z + 0.02 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} L$$

$$\frac{-\dot{W}_s}{500 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = \frac{0}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{(15.9236 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - 0}{2} + \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (160\text{m}) + \left(0.02 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (5000\text{m})$$

$$-\dot{W}_s = 898180.2592 \text{ W} \times \frac{\text{hp}}{746\text{W}} = 1204 \text{ hp}$$

El signo es tomado como un vector de dirección de la energía, atribuyendo a que la energía ingresa al sistema.

### **Ejemplo 1.10 Incendio en la Planta de Producción Esterigénica**

En el año 2004 una explosión con óxido de etileno usado en el proceso de esterilización provocó un incendio en la planta de producción esterigénica, que causó grandes daños materiales según informó el Concejo de Seguridad Química de EEUU. Se usó un tanque lleno de agua y abierto a la atmósfera, donde el agua es extraída, pasa por una bomba con rendimiento del 80% y se espera una descarga de agua a 3000 L por minuto y una presión de 15 bar (manómetro). No existe una elevación significativa o variaciones de diámetros de manguera en el control del incendio. ¿Qué trabajo debe abastecerse a la bomba para cumplir las especificaciones de presión y el caudal de descarga?

### **Solución**

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z + F = -\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$$

Debido a la ausencia de variaciones del diámetro de la tubería y de altura del sistema se desprecian las pérdidas por fricción, además, si las presiones en ambos extremos es la misma (presión atmosférica en

este ejemplo) se desprecia también la pérdida por carga. Entonces, la ecuación se reduce a:

$$\frac{\Delta P}{P} = -\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$$

Determinar la cantidad de flujo másico de agua a partir del caudal requerido.

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho$$

$$\dot{m} = 3000 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ kg}}{\text{L}}$$

$$\dot{m} = 50 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El agua se descarga de la tubería a 15 bar manométricos, entonces la presión total es la presión manométrica más la presión ambiental.

$$\frac{\Delta P}{P} = -\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$$

$$\frac{[(15 \text{ bar} + P_{\text{ambiental}}) - P_{\text{ambiental}}]}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = -\frac{\dot{W}_s}{50 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$P_{\text{ambiental}} = 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx \frac{\text{kg}}{\text{s m}}$$

$$P = 15 \text{ bar} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\text{Pa}} = 1500000 \text{ N/m}^2 \approx \frac{\text{kg}}{\text{s m}}$$

$$\frac{\left(15 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s m}} + 1.013 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s m}}\right) - 1.013 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s m}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = -\frac{\dot{W}_s}{50 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$-\dot{W}_s = 75000 \frac{\text{N m}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{N m}} \times \frac{\text{kJ}}{1000 \text{ J}} = 75 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \approx \text{kW}$$

$$-\dot{W}_s = 75 \text{ kW} \times \frac{1 \text{ hp}}{0.754 \text{ kW}} = 99.46 \text{ hp}$$

Los 99.46 hp calculados aplica para una bomba que trabaje al 100% de eficiencia, pero al considerar la eficiencia de la bomba del 80% la bomba deberá suministrar mayor potencia para poder obtener el valor requerido, por lo tanto se tiene:

$$-W_s = 99.46 \frac{\text{hp}}{0.8} = 124.325 \text{ hp}$$

Cuando el valor del trabajo es negativo, significa que el trabajo se realiza en el sistema. Por lo tanto, el trabajo real que debe suministrarse a la bomba es mayor que el trabajo teórico para cumplir las especificaciones.

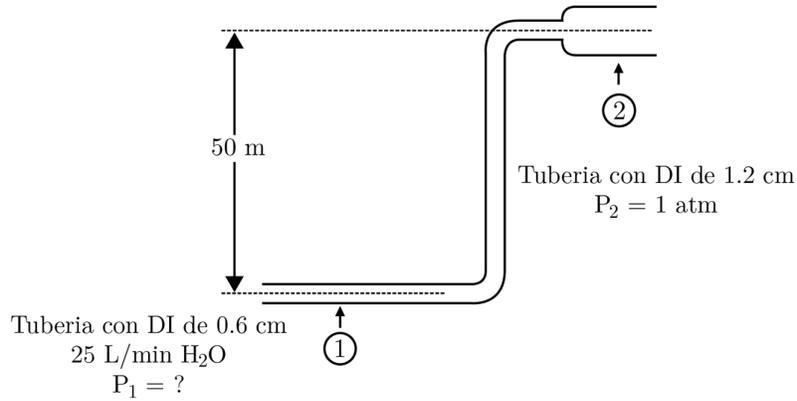
#### 1.4 Ecuación De Bernoulli

En algunos casos, la perdida por fricción de un fluido es insignificante en comparación con la magnitud de los otros términos en el balance general de energía mecánica. Entonces, en el balance  $F = 0$ . Además, en muchos sistemas de tubería el flujo que se transporta no genera trabajo, por lo que,  $\dot{W} = 0$ . El balance de energía mecánica se reducirá a la ecuación de Bernoulli:

$$0 = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z \quad (1.37)$$

#### Ejemplo 1.11 Ecuación de Bernoulli

En el sistema que se muestra en la siguiente figura fluye agua con un flujo volumétrico de 25 L/min y se solicita estimar la presión en el pinto 1 Considere las pérdidas de fricción despreciables.



**FIGURA DEL EJEMPLO 1.11.1**

Esquema de una tubería de Bernoulli

**Solución**

Los datos que se conocen son el flujo volumétrico con lo cual se calculará la velocidad lineal en el punto 1 y 2 ya que se conocen los diámetros del tubo en los dos puntos,  $\Delta z$  es 50m, la gravedad se sabe que es  $9.81 \text{ m/s}^2$ , la densidad del agua es  $1000 \text{ kg/m}^3$  la presión en el punto 2 es 1 atm.

Se calculará la velocidad en el punto 1

Área del tubo en el punto 1

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.006\text{m})^2}{4} = 2.827 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

$$\dot{V} = 20 \frac{\text{L}}{\text{min}} \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 3.33 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v_1 = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{3.33 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}}{2.827 \times 10^{-5} \text{m}^2} = 11,791 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se calculará la velocidad en el punto 2

Área del tubo en el punto 2

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.012\text{m})^2}{4} = 1,131 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$\dot{V} = 20 \frac{\text{L}}{\text{min}} \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 3.33 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v_2 = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{3.33 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}}{2.827 \times 10^{-5} \text{m}^2} = 2,94 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La variación de la velocidad se expresara como:

$$\Delta v^2 = v_2^2 - v_1^2 = (2,94^2 - 11,791^2) \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = -130,38 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de Bernoulli se obtendrá

$$0 = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z$$

$$0 = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z$$

$$0 = \frac{1,01325 \times 10^5 \text{ Pa} - P_1}{1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{-130,38 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2} + (9,8 \text{ m/s}^2)50\text{m}$$

$$P_2 = 5.26135 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 5.26 \text{ bar}$$

### **Ejemplo 1.12 Velocidad del Aire en el Ala de un Avión**

Un avión viaja de una ciudad a otra a una velocidad de 325 m/s a 12000 metros de altura, la densidad del aire es de 0.45 kg/m<sup>3</sup>. El ala del avión presenta una variación de presión de 0.09 atm entre la parte inferior y superior, este valor es necesario para mantener elevado al avión. A partir de las especificaciones anteriores calcule la velocidad del aire en la parte superior del ala, necesaria para generar la diferencia de presión del avión. Considere una velocidad de 325 m/s en la parte inferior del ala y desprecie el grosor del ala.

### Solución

Se usará la ecuación de Bernoulli considerando la parte superior (1) e inferior (2) del ala.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z = 0$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0$$

Al no considerar el grosor del ala la ecuación se reduce a:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = 0$$

Reemplazar los valores proporcionados en el ejemplo

$$\Delta P = 0.09 \text{ atm} \times \frac{101.325 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} = 9.119 \text{ Pa}$$

$$\frac{9.119 \text{ Pa}}{0.45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{(325 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - v_1^2}{2} = 0$$

$$-v_1^2 = (2) \left( -\frac{9.119 \text{ Pa}}{0.45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) - \left( 325 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2$$

$$v_1 = 325.062 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La velocidad en la parte superior del ala es mayor que la de la parte inferior del ala.

### Ejercicios Propuestos

- 1.1 Se bombea alcohol etílico líquido desde un tanque a través de una tubería de 5 cm de diámetro interno con un flujo volumétrico de 2.5 gal/min. Determine a qué velocidad en ft lb<sub>f</sub>/s y hp transporta el alcohol la energía cinética por la tubería.
- 1.2 En un recipiente rígido cerrado y que se encuentra perfectamente aislado ocurre una reacción. Escriba y simplifique el balance energético que ocurre

en el sistema cerrado, indicar si los términos de trabajo y calor son positivos, negativos o diferentes de cero.

- 1.3 Un cilindro con un pistón móvil contiene un gas a 25 °C y 4 bar de presión en un volumen de 5 litros. Si el pistón se desliza despacio y comprime el gas a 7.5 bar, para un sistema cerrado escriba el balance de energía y simplifique, considere que el gas es el sistema y desprece la energía potencial.
- 1.4 Una corriente de agua fluye a través de un intercambiador de calor de tubo y coraza, en este proceso el agua se calienta de 20 °C a 85 °C, el diámetro de las tuberías en la entrada y salida es el mismo y no existe elevación entre estos puntos. Defina un sistema y simplifique la ecuación del balance energético para un sistema abierto, indicar para los términos de trabajo y calor si son positivos negativos o cero.
- 1.5 Calcular el cambio de entalpía asociado con la disolución de 3 gmol de ácido acético en un vaso de precipitados grande con agua.
- 1.6 Se mezclaron corrientes de 53 gmol/s de N<sub>2</sub> y 70 gmol/s de H<sub>2</sub> a 210 kPa y 30 °C, y luego se calentaron a 310 °C. ¿Cuánto calor se necesita (kJ/s)?
- 1.7 Suponer que vacía un galón de agua a 3 metros por debajo de la ventana de un edificio.
  - a) ¿Cuánta energía potencial (ft-lbf) pierde el agua?
  - b) ¿Cuál es la velocidad del agua (ft/s) justo antes del impacto?
- 1.8 Presurizar un kilogramo de agua a 2 bar y 35°C y caliéntelo a 15 bar y 150 °C. ¿Cuál es el cambio de entalpía asociado con este proceso? Primero use la ecuación del modelo para calcular y luego compare con la tabla de vapor.
- 1.9 El butano entra en la tubería de 6 cm de DI a una velocidad promedio de 8,00 m /s a 60 ° C y 20 bar, y aparece en un punto 400 m por debajo de la entrada a 37 ° C y 12 bar.
  - a) Sin cálculo, predice los signos (+ o -) de  $\Delta\dot{E}_k$  y  $\Delta\dot{E}_p$ , donde  $\Delta$  significa (salida-entrada). Explique brevemente su razonamiento.
  - b) Suponiendo que el butano se comporta como un gas ideal, calcule  $\Delta\dot{E}_k$  y  $\Delta\dot{E}_p$  (W).
- 1.10 Un gas confinado en un recipiente rígido ejerce una presión manométrica de 170 kPa cuando su temperatura es de 10°C. ¿Qué presión ejercería el gas a 70 °C? La presión barométrica permanece constante en 820 mmHg.
- 1.11 Cuando un vaso de agua se enfría de 65 °C a temperatura ambiente, ¿Aproximadamente cuánto calor se pierde? Calcule en J y Btu. Tome todas las aproximaciones razonables.
- 1.12 Un recipiente de 8 m<sup>3</sup> contiene vapor a 250 °C y 12 atm de presión, si el recipiente y el gas se enfrían hasta que la presión llega a 1 atm, asumiendo que se condensa algo de vapor, determinar el calor que se transfirió del

recipiente, la temperatura final del gas en el recipiente y la masa de vapor que se consensó.

- 1.13 En un mezclador se introducen 2 kg de vapor sobrecalentado a una temperatura  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y presión de 15 bar con 1 kg vapor saturado a  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 8 bar. La corriente de salida del mezclador está a  $240^{\circ}\text{C}$  y 8 bar. Si el proceso opera en estado estacionario determinar  $T_1$  y  $T_2$  cuando el mezclador es adiabático.
- 1.14 El vapor húmedo a 17 atm con una calidad del 95% pasa a través de una válvula de estrangulación y se expande a 1 atm de presión. Calcular la temperatura del vapor que sale de la válvula de expansión adiabática.

## Referencias

- Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Mass and Energy Balances: Basic Principles for Calculation, Design, and Optimization of Macro/Nano Systems*. <http://www.springer.com/series/1161>
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos* (G. Noriega (ed.)). Limusa S.A. de C.V.
- Ghasem, N., & Henda, R. (2012). Principles of chemical engineering processes. In *Principles of Chemical Engineering Processes*. <https://doi.org/10.1201/b17696>
- Himmelblau David. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (Sexta). University of Texas.
- Matar, S., & Hatch, Lewis F. (1995). Chemistry of petrochemical processes. In *World Pumps* (Vol. 1995, Issue 345). [https://doi.org/10.1016/s0262-1762\(99\)81158-4](https://doi.org/10.1016/s0262-1762(99)81158-4)

# 2

## Balances de Energía en Procesos sin Reacción Química

En el presente capítulo se mostrará como formular y aplicar los balances de energía para sistemas abiertos con múltiples entradas y salidas sin reacciones químicas. Se definirá los estados de referencia y su relación con entalpías, se explicará las trayectorias hipotéticas de procesos para cambios de estados, se mostrará cómo realizar cálculos de entalpía por variación de temperatura relacionando capacidades caloríficas y los cálculos de entalpía debido a los cambios de fase, además se mostrará cómo utilizar usar los diagramas psicrométricos.

### Objetivos de aprendizaje

1. Definir que es un estado de referencia y como se relaciona con los cambios de estado y cambios de entalpía.
2. Trazar trayectorias hipotéticas de procesos y describir sus usos en función de los cambios de estado.
3. Establecer balances de energía para sistemas abiertos con múltiples entradas y múltiples salidas.
4. Utilizar los diagramas psicrométricos para encontrar propiedades termofísicas.

### 2.1 Estados de Referencia

Los valores absolutos para la entalpía y la energía interna en los procesos son imposibles conocer, pero el cambio de la entalpía ( $\Delta\hat{H}$ ) y la energía interna ( $\Delta\hat{U}$ ) que poseen cambios específicos como temperatura, presión y estado de

agregación, pueden ser determinados utilizando un estado de referencia. Por ejemplo el monóxido de carbono tiene un estado de referencia en estado gas a una temperatura de 0°C, presión de una atmósfera y pasa a dos estados diferentes, a continuación se reportan los cambios de entalpía para cada caso.

Estado de referencia	Cambio de estado	Cambios de entalpía
CO(g, 0°C, 1 atm)	CO(g, 100°C, 1 atm)	$\Delta\hat{H}_1 = 2919 \text{ J/mol}$
CO(g, 0°C, 1 atm)	CO(g, 500°C, 1 atm)	$\Delta\hat{H}_2 = 15\,060 \text{ J/mol}$

Por conveniencia se puede asignar el valor de cero para la entalpía del estado de referencia  $\hat{H}_0$  entonces.

Para la variación de la energía entálpica desde el estado de referencia hasta el cambio de estado 1 será  $\Delta\hat{H}_1 = \hat{H}_1 - \hat{H}_0$ , como  $\hat{H}_0$  es el estado de referencia tiene el valor de cero por tanto  $\Delta\hat{H}_1 = \hat{H}_1 - 0 = \hat{H}_1$  y para otro cambio estado 2 medido desde el estado de referencia será  $\Delta\hat{H}_2 = \hat{H}_2$ .

Para el monóxido de carbono a 1 atm se puede construir una tabla de temperaturas y entalpías:

T (°C)	$\hat{H}$ (J/mol)
0	0
100	2919
500	15060

A 0 °C la entalpía es de valor cero debido a que se tomó como estado de referencia, a 100 °C y 1 atm se tiene una entalpía de 2919 J/mol, esto no quiere decir que la entalpía absoluta de CO a 100 °C sea de 2919 J/mol, este valor se debe entender como el cambio de entalpía para el CO cuando pasa de 0°C y 1 atm a 100°C y 1 atm. Por lo tanto se puede decir que el cambio de entalpía específica del CO a 10 °C y 1 atm con relación al CO a 0°C y 1 atm es de 2919 J/mol.

Existen tablas de entalpías que muestran los datos de estados de referencias en los que se calcularon las entalpías y algunas tablas no las proporcionan, pero no es necesario conocer esos valores para calcular los cambios de entalpía específica ( $\Delta\widehat{H}$ ), debido a que si se conoce la entalpía específica de un estado 1 ( $\widehat{H}_1$ ) y estado 2 ( $\widehat{H}_2$ ) el cambio de entalpía será la diferencia de los dos estados de referencia  $\widehat{H}_2 - \widehat{H}_1$ . Se debe tener en consideración evitar utilizar tablas de entalpías determinadas a diferentes condiciones.

A continuación se indica un ejemplo en el que no es necesario conocer el estado de referencia para calcular los cambios de entalpía.

Para un estado de referencia de datos conocidos.

<b>Estado de referencia</b>	<b>Cambio de estado</b>	<b>Cambios de entalpía</b>
CO(g, 0°C, 1 atm)	CO(g, 0°C, 1 atm)	$\Delta\widehat{H}_1 = 0$ J/mol
CO(g, 0°C, 1 atm)	CO(g, 100°C, 1 atm)	$\Delta\widehat{H}_2 = 2919$ J/mol
CO(g, 0°C, 1 atm)	CO(g, 500°C, 1 atm)	$\Delta\widehat{H}_3 = 15\ 060$ J/mol

El cambio de entalpía del CO en estado gas desde 100 °C a 500 °C será:

$$\Delta\widehat{H} = \widehat{H}_3 - \widehat{H}_2$$

$$\Delta\widehat{H} = 15\ 060 \frac{\text{J}}{\text{mol}} - 2919 \frac{\text{J}}{\text{mol}} = 12141 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Para un estado de referencia de datos desconocidos.

<b>Estado de referencia</b>	<b>Cambio de estado</b>	<b>Cambios de entalpía</b>
CO	CO(g, 0°C, 1 atm)	$\Delta\widehat{H}_1 = -2500$ J/mol
CO	CO(g, 100°C, 1 atm)	$\Delta\widehat{H}_2 = 419$ J/mol
CO	CO(g, 500°C, 1 atm)	$\Delta\widehat{H}_3 = 12560$ J/mol

El cambio de entalpía del CO en estado gas desde 100 °C a 500 °C será:

$$\Delta\widehat{H} = \widehat{H}_3 - \widehat{H}_2$$

$$\Delta\widehat{H} = 12560 \frac{\text{J}}{\text{mol}} - 419 \frac{\text{J}}{\text{mol}} = 12141 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Se puede evidenciar que al usar diferentes estados de referencias los valores individuales de cada entalpía específica  $\widehat{H}_1$ ,  $\widehat{H}_2$  y  $\widehat{H}_3$  es diferente, pero el cambio de un estado a otro  $\Delta\widehat{H}$  será el mismo. Esto se debe a que  $\widehat{U}$  y  $\widehat{H}$  son propiedades de estado o de un componente en particular cuyo valor depende del estado de sistema como la temperatura, presión, fase y composición, y no de la forma o circunstancias a las que el sistema llegó a dicho estado.

## 2.2 Trayectorias Hipotéticas de Procesos

Usar trayectoria para el cambio de estado es de mucha ayuda para determinar el cambio en la entalpía o energía interna del proceso, pero se debe tener en cuenta que cuando una especie pasa de un estado a otro, la variación de la entalpía y variación de la energía interna en el proceso son independientes de la trayectoria que se siga de un proceso a otro.

Al pasar de un estado a otro el procedimiento que se debe seguir consiste en construir una trayectoria hipotética de proceso desde el estado inicial al final, en una serie de pasos y en cada paso se calculará los valores del cambio de entalpía, y el valor final del cambio de entalpía del proceso será la sumatoria de las entalpías en cada paso.

Para cada paso, se debe tener en cuenta los cambios de temperatura, estados de agregación, y presión. Se debe considerar que la temperatura no puede cambiar de un valor a otro cuando se trata de distintas fases en un solo paso, por ejemplo si en un estado inicial se tiene agua en a 30 °C y 1 atm y se desea pasar a un estado final a 150 °C y 1 atm, en el estado inicial el agua es líquida, por tanto el primer cambio de temperatura será hasta los 100 °C que es el punto de ebullición en la que el agua pasa de estado líquido a vapor, a esta temperatura ocurre el

cambio de fase de líquido a vapor, y posteriormente cambia la temperatura de 100 °C a 150 °C que es el estado final.

Para el cambio de fase existen tablas con datos correspondientes a la variación de entalpía medidas a ciertas condiciones, para esto se deberá adaptar a las condiciones medidas para lograr encontrar el valor de la trayectoria hipotética, por ejemplo, sí se tiene en un estado inicial agua a 30 °C y 3 atm y se requiere pasar a un estado final de 150 °C y 3 atm, y se conoce que el valor de la entalpía para el cambio de fase está tabulada a 1 atmósfera en los 100 °C, se sugiere como primer paso cambiar la temperatura de 30 °C a 100 °C y 3 atm en estado líquido, como segundo paso cambiar la presión por lo que se tendrá agua líquida a 100 °C y 1 atm, en el tercer paso se deberá cambiar la fase líquida a vapor, en este paso se tomara el valor tabulado del calor de vaporización  $\Delta\widehat{H}_v$  (tabulado a 1 atm), los pasos restantes será llegar a la temperatura y presión finales de 150 y 3 atm. Se sugiere en cada paso realizar un cambio de estado (Temperatura, presión, estado de agregación y fracción molar en caso de mezclas) y mantener las demás constantes.

Los tipos de cambios que se pueden dar por pasos para completar una trayectoria de un estado inicial a un estado final es:

1. Cambio de presión manteniendo constante la temperatura y el estado de agregación.
2. Cambio de temperatura mantenido constante la presión y el estado de agregación.
3. Cambio de estado de agregación o fase manteniendo la temperatura y presión constante. Se puede lograr por fusión, solidificación, vaporización, condensación sublimación.

4. Mezcla de dos líquidos, solución de un gas en un líquido o solución de un sólido en un líquido manteniendo la presión y temperatura constante.
5. Reacción química con presión y temperaturas constantes (Capítulo 3).

### **Ejemplo 2.1 Cambio de Estado**

Las fuentes primarias del benceno, tolueno y xileno (BTX) son las corrientes de refinería, especialmente las de reformado y craqueo catalítico, y la pirolisis para la obtención de gasolina. Son compuestos aromáticos, no polares, insolubles en agua y solubles en disolventes orgánicos como hexano, éter dietílico y tetracloruro de carbono, son intermedios y precursores petroquímicos importantes en la obtención de fenol, trinitrotolueno (TNT), nylon y plásticos.

Trace una trayectoria hipotética para los siguientes procesos

- a. Se tiene tolueno líquido a una temperatura de 25 °C y 1 atm y se desea cambiar a un estado vapor de 120 °C y 1 atm.
- b. Se tiene benceno sólido a 0 °C y 1 atm y se desea cambiar a un estado de vapor de 100 °C y 1 atm.
- c. El ciclohexano en vapor a 190 °C y 5 atm se enfría y se condensa a líquido a 20 °C y 5 atm.

### **Solución.**

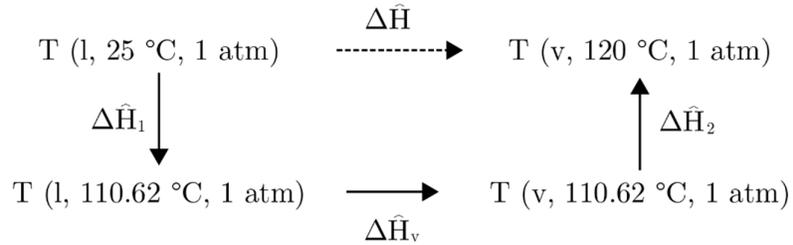
Las entalpías para los cambios de fase de distintos componentes se encuentran en la tabla B.1.

### **Para el tolueno (T)**

En el primer paso se hará un cambio de temperatura a presión y estado de agregación constante.

En el segundo paso se hará un cambio de fase a temperatura y presión constante.

En el tercer paso se hará un cambio de temperatura a presión y estado de agregación constante.



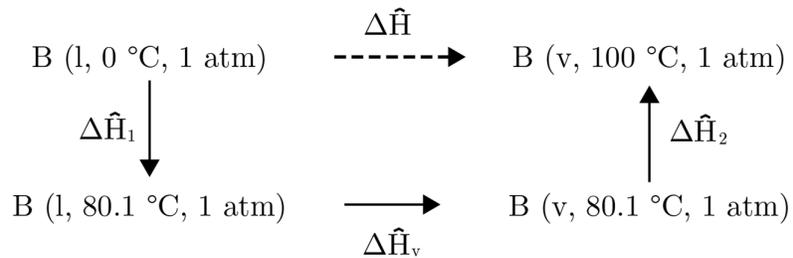
$$\Delta\hat{H} = \Delta\hat{H}_1 + \Delta\hat{H}_v + \Delta\hat{H}_2$$

### Para el benceno (B)

En el primer paso se hará un cambio de temperatura a presión y estado de agregación constante.

En el segundo paso se hará un cambio de fase a temperatura y presión constante.

En el tercer paso se hará un cambio de temperatura a presión y estado de agregación constante.



$$\Delta\hat{H} = \Delta\hat{H}_1 + \Delta\hat{H}_v + \Delta\hat{H}_2$$

### Para el ciclohexano (CH)

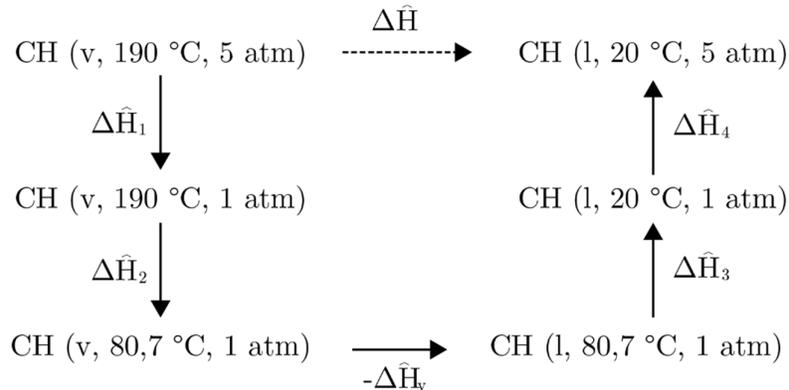
En el primer paso se hará un cambio de presión a temperatura y estado de agregación constante.

En el segundo paso se hará un cambio de temperatura a presión y estado de agregación constante.

En el tercer paso se hará un cambio de fase a temperatura y presión constante.

En el cuarto paso se hará un cambio de temperatura a presión y estado de agregación constante.

En el quinto paso se hará un cambio de presión a temperatura y estado de agregación constante.



$$\Delta\hat{H} = \Delta\hat{H}_1 + \Delta\hat{H}_2 + (-\Delta\hat{H}_v) + \Delta\hat{H}_3 + \Delta\hat{H}_4$$

La entalpía de evaporación para el ciclo benceno se toma como negativo debido a que el valor dado en la tabla B.1 es para la evaporación, y en para este ejercicio se solicita la entalpía de condensación, al ser un proceso contrario se toma el valor de la entalpía de evaporación con signo cambiado.

## 2.3 Cálculos de Entalpía

Los cambios de entalpía ocurren cuando existe una variación de temperatura y/o estado de agregación, en una mezcla de soluciones o al darse una reacción química.

### 2.3.1 Cambios de Entalpía por Variación de la Temperatura

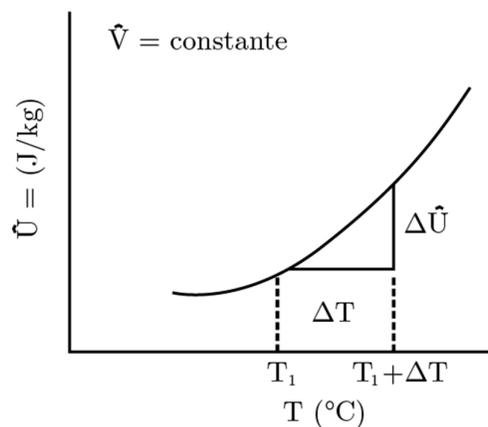
Para que exista variación en la temperatura de un cuerpo o material sin cambio de fase debe existir una transferencia de calor (calor sensible). El calor requerido para cambiar la temperatura se puede calcular con la ecuación apropiada de la primera ley de la termodinámica, despreciando los cambios de energía cinética, potencial y el trabajo.

Para un sistema cerrado  $Q = \Delta U$

Para un sistema abierto  $\dot{Q} = \Delta \dot{H}$

La energía interna específica cambia cuando varía la temperatura a volumen constante como se muestra en la figura 2.1, y la pendiente de la curva representa la capacidad calorífica a volumen constante, y se representa de la siguiente manera

$$d\hat{U} = C_v(T)dT \quad (2.1)$$



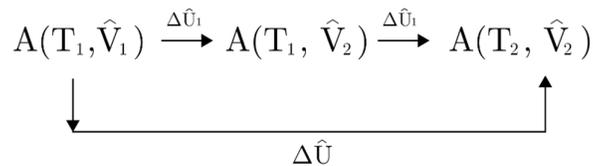
**FIGURA 2.1**

Cambio de la energía interna en función de la temperatura

Para el cambio de la energía interna  $\Delta\hat{U}$  debido al incremento de la temperatura de un estado  $T_1$  a  $T_2$  a volumen constante se tendrá:

$$\Delta\hat{U} = \int_{T_1}^{T_2} C_v(T)dT \quad (2.2)$$

Para procesos en los que se tenga que modificar el volumen y la temperatura, el cálculo correspondiente a la variación de la energía interna específica se divide en dos pasos, primero un cambio de volumen manteniendo la temperatura constante, y luego un cambio en la temperatura manteniendo volumen constante, en cada paso se calculará un cambio de  $\hat{U}$ , la variación total de energía interna  $\Delta\hat{U}$  será la sumatoria de las energías obtenidas en cada paso como se muestra en la figura 2.2.



**FIGURA 2.2**

Cambio de la energía con cambio de volumen y temperatura

Para cálculos de balance de energía, el calor sensible se determina haciendo el uso de la propiedad conocida como capacidad calorífica a presión constante o solo capacidad calorífica ( $C_p$ ).

Cuando existe cambio de temperatura y la capacidad calorífica  $C_p$  y la presión es constante, la variación de la entalpía de una sustancia es:

$$\Delta H = mC_p (T - T_{ref}) = mC_p dT \quad (2.3)$$

Para la mayoría de sustancias las capacidades caloríficas varían con el cambio de temperatura. Para calcular los valores de  $C_p$  se debe hacer uso de la ecuación (2.4) que es una función polinómica de temperatura. La relación entre  $C_p$  y  $C_v$

para líquidos y sólidos son los mismos es decir  $C_P = C_V$  y para gases ideales  $C_P = C_V + R$  (R es la constante de los gases).

$$C_P = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (2.4)$$

Los coeficientes a, b, c y d son constantes diferentes para cada sustancia y se dan en el apéndice A, Tabla A.2 y el cambio de entalpía se reescribe como:

$$\Delta H = mC_P dT \quad (2.5)$$

$$\Delta \dot{H} = \dot{m} \int_{T_{\text{final}}}^{T_{\text{inicial}}} C_P dT = \dot{m} \int_{T_{\text{final}}}^{T_{\text{inicial}}} (a + bT + cT^2 + dT^3) dT \quad (2.6)$$

En algunas situaciones se necesitará una estimación de la entalpía específica, la energía interna específica o el volumen específico a una temperatura y presión que se encuentran entre los valores tabulados, en estos casos se debe hacer uso de una interpolación lineal.

En el ejemplo siguiente se demuestra cómo se debe determinar la energía interna a partir de la capacidad calorífica.

### **Ejemplo 2.2 Capacidad Calorífica y Energía Interna**

En un recipiente rígido se encuentra 200 kg un fluido que se calienta de 20 °C a 150 °C. Calcule el calor que debe usarse para alcanzar este propósito.

La capacidad calorífica del fluido viene dada por la siguiente relación:

$$C_v \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right) = a + bT = 0.855 + 9.42 \times 10^{-4}T$$

### **Solución**

Se conoce la masa del fluido, temperatura inicial ( $T_1$ ) y final ( $T_2$ ) y la capacidad calorífica a volumen constante ( $C_v$ ) y se debe calcular el

calor necesario para calentar el contenido del recipiente, no existe intercambio e materia por tanto se considerará un sistema cerrado.

Se hará uso del balance de energía para un sistema cerrado, en la que no existe variación en la energía cinética y potencial ya que el recipiente es rígido, por tanto:

$$Q - W = \Delta U$$

En el recipiente no existe parte móvil alguna y al ser rígido no existe trabajo  $W = 0$ . El cambio de energía interna es:

$$Q = \Delta U$$

La variación de la energía interna es una función de la capacidad calorífica a volumen constante. La capacidad calorífica es función de la temperatura y de la masa por tanto se multiplicara la capacidad calorífica de la siguiente manera:

$$\Delta U = m \int_{T_1}^{T_2} C_v dT$$

Se Reemplazará la capacidad calorífica a volumen constante por el valor que se da en el enunciado.

$$\Delta U = m \int_{T_1}^{T_2} (0.855 + 9.42 \times 10^{-4}T) dT$$

Se integra la ecuación anterior.

$$\Delta U = m \left[ 0.855(T_2 - T_1) + 9.42 \times 10^{-4} \left( \frac{T_2^2 - T_1^2}{2} \right) \right]$$

Finalmente se sustituirá los valores de las temperaturas y de la masa que son valores conocidos.

$$Q = \Delta U = 200 \text{ kg} \left[ 0.855(150 - 20) + 9.42 \right. \\ \left. \times 10^{-4} T \left( \frac{150^2 - 20^2}{2} \right) \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$Q = \Delta U = 24.312 \text{ kJ}$$

### Ejemplo 2.3 Uso de Tabla de Datos y Estados de Referencia

En la tabla E1.12 se muestran datos para un fluido saturado. Calcule  $\Delta\hat{H}$  y  $\Delta\hat{U}$  para la transición de vapor saturado de 10 °C a -20 °C.

**Tabla E2.3**

Propiedades del Cloruro de Metilo Saturado

Estado	T(°C)	P (atm)	v(m <sup>3</sup> /kg)	$\hat{H}$ (kJ/kg)
Líquido	-40	0.47	0.001	0.00
Vapor	-20	1.30	0.310	456
Vapor	10	3.54	0.120	570

### Solución

Es estado de referencia es líquido a -40 °C, porque a esta temperatura el valor de la entalpía es cero. El cambio de la entalpía específica y cambio en la energía específica para la transición de vapor saturado del cloruro de metilo de 10 °C a -20 °C se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta\hat{H} = \Delta\hat{H}_{-20^\circ\text{C}} - \Delta\hat{H}_{10^\circ\text{C}} = (456 - 470)\text{kJ/kg} = -14 \text{ kJ/kg}$$

Para el cambio de energía interna se usará  $\hat{H} = \hat{U} + P\hat{v}$ , para una variación de sus propiedades se reescribe  $\Delta\hat{H} = \Delta\hat{U} + \Delta(P\hat{v})$ .

Reordenando la ecuación para  $\Delta\hat{U}$  se obtendrá:

$$\Delta\hat{U} = \Delta\hat{H} - \Delta(P\hat{v}) = \Delta\hat{H} - [(P\hat{v})_{-20^\circ\text{C}} - (P\hat{v})_{10^\circ\text{C}}]$$

Se sustituirá los valores para los términos conocidos

$$\Delta \hat{U} = -14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - [(1.30)(0.31) - (3.54)(0.12)] \left( \text{atm} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \left( \frac{101.325 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{1 \text{ atm}} \right) \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kN m}} \right)$$

El cambio de energía interna es

$$\Delta \hat{U} = -12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

### 2.3.2 Capacidad de Calor Constante

La expresión de la entalpía específica al variar la temperatura y manteniendo la presión constante es  $\Delta \hat{H} = \int C_p dT \approx C_p dT$ . No se necesita conocer el estado de referencia para calcular  $\Delta \hat{H}$  para la transición de un estado a otro. La entalpía específica ( $\hat{H}$ ) del estado 1 al estado 2 es igual a  $\hat{H}_2 - \hat{H}_1$ . Se recomienda utilizar tablas de un mismo autor, y en caso de usar diferentes hay que asegurarse que los valores hayan sido calculados en las mismas condiciones. Los valores para  $\hat{U}$  dependen únicamente del estado de la especie, la temperatura y la presión. Cuando una especie cambia de estado, la  $\Delta \hat{U}$  y la  $\Delta \hat{H}$  no depende de la trayectoria que se tome para pasar de un estado a otro.

#### Ejemplo 2.4 Capacidad Calorífica Constante

Determinar el cambio de entalpía para un flujo másico de 100 g/s de una sustancia que se calentó en un intercambiador de calor de 20 °C a 80 °C, si la capacidad calorífica a presión constante es de 0,5 cal/g °C.

La variación del flujo entálpico en función de la capacidad calorífica  $C_p$  esta dado por:

$$\Delta \dot{H} = \int_{T_1}^{T_2} \dot{m} C_p dT$$

Debido a que la capacidad calorífica es constante la ecuación anterior se reescribirá como:

$$\Delta\dot{H} = \dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

Se reemplazará los valores conocidos en la ecuación anterior.

$$\Delta\dot{H} = \left(100 \frac{\text{g}}{\text{s}}\right) \left(0.5 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}\right) (80 - 20)^\circ\text{C} = 3000 \frac{\text{cal}}{\text{s}}$$

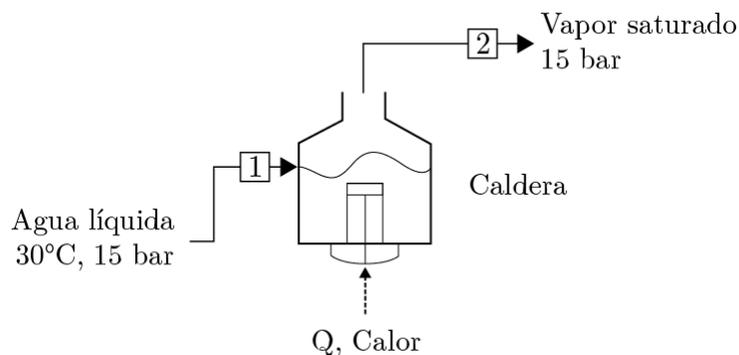
El cambio en la velocidad de transporte de la entalpía es

$$\Delta\dot{H} = 3 \frac{\text{kcal}}{\text{s}}$$

### Ejemplo 2.5 Calor Agregado a una Caldera

Se alimenta agua líquida a una caldera a 30 °C con una presión de 15 bar, y se convierte a presión constante en vapor saturado. Calcule  $\Delta\hat{H}$  para esto proceso y el aporte de calor necesario para producir 18.000 m<sup>3</sup>/h de vapor en la corriente de salida. Se supone que la velocidad de ingreso a la caldera del líquido es insignificante y que el vapor sale por medio de una tubería de 0,15 m de diámetro interior. La entrada y salida de las tuberías están al mismo nivel.

### Solución



**FIGURA DEL EJEMPLO 2.5.1**

Esquema de una caldera

Se considera a la caldera como un sistema abierto en estado estacionario, entonces:

Balance de energía para un sistema abierto:

energía de entrada=energía de salida

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p$$

El sistema no presenta una variación en la altura y no existe trabajo en el sistema, entonces:

$$\dot{Q} = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k$$

Para la corriente de entrada a la caldera (agua saturada) apéndice A, tabla A.5 a 30 °C:

$$\widehat{H}_{\text{entrada}} (15 \text{ bar}, 30 \text{ °C}) = 125.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para la corriente de salida de la caldera (vapor saturado) apéndice A, tabla A.5:

$$\widehat{H}_{\text{salida}} (15 \text{ bar}, \text{sat}) = 2789.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Se calcula el cambio de la entalpía específica en el sistema:

$$\Delta\widehat{H} = \widehat{H}_s - \widehat{H}_e$$

$$\Delta\widehat{H} = 2789.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 125.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2664.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Se encontrará el flujo másico a la salida de la caldera con el flujo volumétrico proporcionado en el problema y el diámetro interno de la tubería:

El flujo másico se definirá como:

$$\dot{m} = \rho \times \dot{V}$$

Ahora se utilizan definiciones de la densidad, entonces:

$$\rho = \frac{1}{\widehat{V}}$$

Se reemplaza la definición de densidad en la ecuación para obtener el flujo másico:

$$\dot{m} = \frac{1}{\widehat{V}} (\dot{V})$$

Se reemplazan los valores para el volumen específico ( $\widehat{V}$ ) de vapor saturado a 15 bar se tiene un valor de  $0.1317 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ , entonces:

$$\dot{m}_s = \frac{1}{0.1317 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \left( 18000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 37.97 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

La velocidad en la salida ( $v_s$ ) de la tubería se puede calcular con el flujo volumétrico a la salida dividido para el área de sección transversal de la tubería:

$$\dot{V} = v \times \text{Área sección transversal}$$

$$v_s = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

$$v_s = \frac{18000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\frac{\pi (0.15 \text{ m})^2}{4}} \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 282.94 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Del balance general de energía simplificado se obtiene:

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta \widehat{H} + \frac{1}{2} \dot{m} ((v_s)^2 - (v_e)^2)$$

Se reemplazan los valores para el calor necesario:

$$\dot{Q} = \left( 37.97 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) 2664.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{1}{2} \left( 37.97 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \left( \left( 282.94 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - 0 \right) \times \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}}$$

$$\dot{Q} = 102788.85 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

### 2.3.3 Calculo de Entalpía con Cambio de Fase

Para modificar el estado en un sistema se puede variar la temperatura o cambiar su composición. Las propiedades de estado son las que dependen únicamente del estado inicial y final del sistema, y no depende de la forma en cómo se realizará este cambio.

Para los cambios de fase como la evaporación y fusión, se necesita una gran cantidad de energía entálpica e interna debido a que los enlaces entre moléculas se rompen y se reordenan. El calor latente, es aquel que se transfiere desde o hacia un sistema el cual provoca que se cambie de fase a condiciones de presión y temperatura constante.

El calor latente de vaporización es la cantidad de energía necesaria para vaporizar un líquido, el calor latente de fusión es el que transforma un sólido a líquido, y el calor latente de sublimación es el calor que se necesita para vaporizar directamente un sólido. El calor se libera cuando existe condensación, y se requiere calor para vaporizar un líquido o derretir un sólido. El calor sensible es el calor que se transfiere para poder variar la temperatura de una sustancia sin cambiar su fase o estado actual.

La capacidad calorífica a presión constante,  $C_P$ , para la mayoría de los sólidos y líquidos incompresibles es  $C_P \approx C_v$  y para gases ideales es  $C_P = C_v + R$ .

#### **Ejemplo 2.6 Entalpía de Cambio de Fase**

En un intercambiador de calor de tubo y carcasa se usa un flujo másico de vapor de 120 kg/h para calentar una corriente de un gas que fluye por el tubo. El vapor entra por la carcasa como vapor saturado a 9 bar con una calidad de 85% y sale como agua líquida saturada a 9 bar. Calcule la tasa de transferencia de calor al gas.

### Solución

Se hará uso del balance de energía general para un sistema abierto alrededor del intercambiador de calor. El balance de energía es:

$$\Delta\dot{H} + \Delta E_K + \Delta E_P = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

En el sistema se asume que no hay variación de altura en las entradas y salidas de los tubos y que tienen el mismo diámetro, por tanto no existe variación en la energía potencial y cinética, el fluido no realiza trabajo sobre alguna parte móvil y se asume que no hay trabajo. La ecuación se reduce a:

$$\Delta\dot{H} = Q$$

El flujo entálpico en términos de la entalpía específica se expresara como:

$$\Delta\dot{H} = \dot{m}_v (\hat{H}_2 - \hat{H}_1) = Q$$

El cambio en la entalpía específica del vapor es:

$$\Delta\hat{H}_v = \hat{H}_{v,2} - \hat{H}_{v,1}$$

La entalpía específica de vapor en la entrada  $\hat{H}_{v,1}$  de vapor saturado a 10 bar y 90% de calidad será:

$$\hat{H}_{v,1} \Big|_{10 \text{ bar}, x=0,9} = \hat{H}_f + x\hat{H}_{fg}$$

De la tabla A.4 del apéndice A Propiedades de vapor saturado se toman los valores para las entalpías a 10 bar.

$$\text{Entalpía de agua saturada } \hat{H}_f = 762.6 \text{ kJ/kg} = \hat{H}_{v,2}$$

$$\text{Entalpía de vapor saturado } \hat{H}_{fg} = 2013.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\widehat{H}_{v,1}|_{10 \text{ bar}, x=0,9} = 762.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (0.9) \left( 2013.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 2574.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Sustituyendo los valores de las entalpías específicas en la salida y entrada se tendrá la entalpía específica del vapor

$$\Delta \widehat{H}_v = \widehat{H}_{v,2} - \widehat{H}_{v,1} = 762.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2574.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -1812.24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

La tasa de transferencia de calor desde el vapor que se condensa a la corriente de gas será:

$$Q = \dot{m}_v \Delta \widehat{H}_v = \left( 100 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \left( -1812.24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = -50.34 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

El signo del valor Q es negativo; es decir se libera calor de la corriente de vapor, de tal manera podemos afirmar que el calor se transfiere desde el vapor condensado hacia la corriente de gas.

### 2.3.4 Balances de Energía para Sistemas Abiertos con Múltiples Entradas y Múltiples Salidas

El balance de energía general para un sistema abierto.

$$Q - \dot{W}_S = \Delta \dot{H} + \Delta E_K + \Delta E_P \quad (2.7)$$

El cambio en el flujo de entalpía para múltiples entradas será

$$\Delta \dot{H} = \sum \dot{H}_s - \sum \dot{H}_e \quad (2.8)$$

Reacomodando la ecuación anterior del flujo entálpico en términos de la entalpía específica se tendrá

$$\Delta \dot{H} = \sum \dot{m}_s \widehat{H}_s - \sum \dot{m}_e \widehat{H}_e \quad (2.9)$$

### Ejemplo 2.7 Cambio de entalpía de las mezclas y cambio de fase

Una mezcla líquida de 2000 kmol/h con 70 mol% de acetona y 30 mol% de benceno ingresa a un intercambiador de carcasa y tubos para elevar su temperatura de 10 °C a 60 °C. El intercambiador utiliza vapor saturado con calidad del 90% a 16 bar como medio de calentamiento.

Determinar el flujo másico del vapor necesario en la entrada del intercambiador.

#### Solución

Aplicar la ecuación de balance de energía para un sistema abierto

$$\Delta\dot{H} + \Delta E_k + \Delta E_p = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

Simplificar la ecuación acorde con los datos del ejemplo

$$\Delta\dot{H} = 0$$

$$\Delta\dot{H} = \sum \dot{H}_s - \sum \dot{H}_e \quad (i)$$

Establecer la ecuación (1) en términos de entalpía específica

$$\Delta\dot{H} = 0 = \sum \dot{m}_s \hat{H}_s - \sum \dot{m}_e \hat{H}_e$$

Acetona: a

Benceno: b

$$\begin{aligned} \Delta\dot{H} = 0 = & \left[ \dot{m}_{v,s} \hat{H}_{v,s} + \dot{m}_{a,s} \hat{H}_{a,s} + \dot{m}_{b,s} \hat{H}_{b,s} \right] \\ & - \left[ \dot{m}_{v,e} \hat{H}_{v,e} + \dot{m}_{a,e} \hat{H}_{a,e} + \dot{m}_{b,e} \hat{H}_{b,e} \right] \end{aligned}$$

donde

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{v,s} = \dot{m}_{v,e} = \text{Flujo másico de vapor}$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a,s} = \dot{m}_{a,e} = \text{Flujo másico de acetona}$$

$$\dot{m}_b = \dot{m}_{b,s} = \dot{m}_{b,e} = \text{Flujo másico de benceno}$$

Agrupar los flujos másicos por cada compuesto involucrado

$$\Delta\dot{H} = 0 = \dot{m}_v(\widehat{H}_{v,s} - \widehat{H}_{v,e}) + \dot{m}_a(\widehat{H}_{a,s} - \widehat{H}_{a,e}) + \dot{m}_b(\widehat{H}_{b,s} - \widehat{H}_{b,e})$$

$$\Delta\dot{H} = 0 = \dot{m}_v\Delta\widehat{H}_v + \dot{m}_a\Delta\widehat{H}_a + \dot{m}_b\Delta\widehat{H}_b \quad (\text{ii})$$

Donde

$\Delta\widehat{H}_v$  Variación de entalpía específica de vapor

$\Delta\widehat{H}_a$  Variación de entalpía específica de acetona

$\Delta\widehat{H}_b$  Variación de entalpía específica de benceno

Considerando las composiciones de 70% de acetona y un 30% de benceno en la mezcla líquida

El cambio de flujo másico de la mezcla se expresa como:

$$\dot{m}_{\text{mezcla}} = 0.7\dot{m}_a + 0.3\dot{m}_b$$

El cambio de entalpía de la mezcla se expresa como:

$$\Delta\widehat{H}_{\text{mezcla}} = 0.7\Delta\widehat{H}_a + 0.3\Delta\widehat{H}_b$$

El cambio de entalpía específica del vapor se expresa como:

$$\Delta\widehat{H}_v = \widehat{H}_{v,2} - \widehat{H}_{v,1} \quad (\text{iii})$$

Donde

$\widehat{H}_{v,1}$  Entalpía específica del vapor de entrada

$\widehat{H}_{v,2}$  Entalpía específica del vapor de salida

Valores para las entalpías específicas a 16 bar y 90% de calidad en la entrada y salida de vapor saturado obtenidos de la tabla A.4 del apéndice A.

$$\widehat{H}_{v,2@ 16 \text{ bar}} = 858.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\widehat{H}_{v,1@ 16 \text{ bar},x=0.9} = \widehat{H}_f + x\widehat{H}_{fg}$$

$$\widehat{H}_{v,1@ 16 \text{ bar},x=0.9} = 858.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.9 \left( 1933.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 2598.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Reemplazar los valores obtenidos en la ecuación (3)

$$\Delta\widehat{H}_v = 858.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2598.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -1740 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

El cambio en la entalpía específica de la mezcla de acetona y benceno, se expresa como:

$$\Delta\widehat{H}_{\text{mezcla}} = 0.7\Delta\widehat{H}_a + 0.3\Delta\widehat{H}_b = \int_{10}^{60} C_{p,\text{mezcla}} \, dT \quad (\text{iv})$$

La capacidad calorífica específica de la mezcla líquida

$$C_{p,\text{mezcla}} = \sum y_i C_{p_i}$$

$$C_{p,\text{mezcla}} = 0.7 C_{p,\text{acetona}} + 0.3 C_{p,\text{benceno}} \quad (\text{v})$$

Donde

$$C_{p,\text{acetona}} = 123 + 0.186 T \quad (\text{vi})$$

$$C_{p,\text{benceno}} = 126.5 + 0.234 T \quad (\text{vii})$$

Reemplazar las ecuaciones (vi) y (vii) en la ecuación (v)

$$C_{p,\text{mezcla}} = 0.7 (123 + 0.186 T) + 0.3 (126.5 + 0.234 T)$$

$$C_{p,\text{mezcla}} = 124 + 0.2T$$

Reemplazar la expresión  $C_{p,mezcla}$  en la ecuación (iv)

$$\Delta\hat{H}_{mezcla} = \int_{10}^{60} (124 + 0.2T) dT$$

$$\Delta\hat{H}_{mezcla} = 6550 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Reemplazar los valores determinados anteriormente en la ecuación (ii)

$$0 = \dot{m}_v \Delta\hat{H}_v + \dot{m}_a \Delta\hat{H}_a + \dot{m}_b \Delta\hat{H}_b$$

$$0 = \dot{m}_v \Delta\hat{H}_v + \dot{m}_{mezcla} \Delta\hat{H}_{mezcla}$$

$$0 = \dot{m}_v \left( -1740 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left( 2000 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right) \left( 1000 \frac{\text{mol}}{\text{kmol}} \right) \left( 6550 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right) \left( \frac{\text{kJ}}{1000 \text{ J}} \right)$$

$$\dot{m}_v = 7528.73 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

### 2.3.5 Cambio de Entalpía Debido a una Mezcla

Para determinar las propiedades termodinámicas de una mezcla se debe sumar las contribuciones individuales de cada compuesto que están inmerso en la mezcla.

#### Ejemplo 2.8 Mezcla

Se mezclan 150 kg/h de vapor saturado que se encuentra a 1 bar con vapor sobrecalentado que se encuentra a 450 °C y 1 bar para generar vapor sobrecalentado a 350 °C y 1 bar. Calcular la cantidad de vapor sobrecalentado a la temperatura de 350 °C, y el caudal másico requerido de vapor a 450 °C.

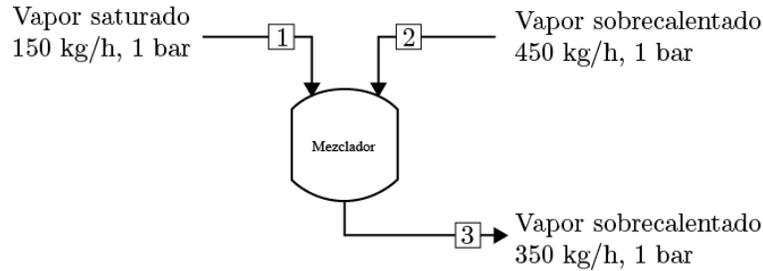
#### Solución

Se considera al mezclador como un sistema abierto en estado estacionario, entonces:

Balance de energía para un sistema abierto:

Energía de entrada = Energía de salida

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p$$



**FIGURA DEL EJEMPLO 2.8.1**

Esquema de una mezcla

El sistema no presenta una variación en la altura, no existe trabajo en el sistema, no hay cambio en la velocidad de las corrientes, y no presenta pérdida ni requiere calor, entonces:

$$\Delta\dot{H} = 0$$

El cambio de flujo de entalpía hace referencia las entradas y salidas del sistema, existen dos entradas y una salida

$$\Delta\dot{H} = 0$$

$$\dot{H}_3 - \dot{H}_1 - \dot{H}_2 = 0$$

En términos de entalpía específica para cada corriente se tiene:

$$\dot{m}_3 \widehat{H}_3 - \dot{m}_1 \widehat{H}_1 - \dot{m}_2 \widehat{H}_2 = 0$$

Se realiza un balance de materia para el sistema

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

$$\dot{m}_3 = 150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + \dot{m}_2 \quad (\text{i})$$

Se determina los valores de la entalpía específica de la tabla A.5 del apéndice A

Para la corriente uno de entrada al mezclador:

$$\widehat{H}_1 (1 \text{ bar, vapor saturado}) = 2675.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para la corriente dos de entrada al mezclador:

$$\widehat{H}_2 (1 \text{ bar, } 450 \text{ }^\circ\text{C}) = 3382 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para la corriente tres de salida del mezclador:

$$\widehat{H}_3 (1 \text{ bar, } 350 \text{ }^\circ\text{C}) = 3176 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Se sustituyen los valores en el balance de energía de entalpías específicas

$$\dot{m}_3 \widehat{H}_3 - \dot{m}_1 \widehat{H}_1 - \dot{m}_2 \widehat{H}_2 = 0$$

$$\dot{m}_3 \left( 3176 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - \left( 150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \left( 2675.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - \dot{m}_2 \left( 3382 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 0 \quad (\text{ii})$$

Se resuelve un sistema de ecuaciones entre la ecuación (i) y (ii):

Se reemplaza la ecuación (i) en (ii):

$$\left( 150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + \dot{m}_2 \right) 3176 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \left( 150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \left( 2675.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - \dot{m}_2 3382 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0$$

Arreglando la ecuación:

$$-206 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \dot{m}_2 = -75090 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_2 = 364.52 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Entonces:

$$\dot{m}_3 = 514.52 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

## 2.4 Diagramas Psicrométricos

Un diagrama psicrométrico o también llamado diagrama de humedad muestra la relación entre las temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo, punto de rocío, la humedad relativa y específica. Se hacen gráficas cruzadas de diversas propiedades de una mezcla de gas-vapor, esto constituye una recopilación concisa de datos de propiedades físicas, a partir de dos propiedades conocidas, las otras pueden ser determinadas.

Para usar el diagrama, se tomará el punto de intersección de las líneas de dos factores conocidos y de ser necesario se puede interpolar, desde ese punto de intersección, seguir las líneas de los factores desconocidos hasta sus escalas numeradas para conocer los valores que se desean. Las propiedades termofísicas que se encuentran en la mayoría de las cartas psicrométricas son las siguientes.

### **Temperatura de Bulbo Seco ( $T_{bs}$ )**

La temperatura de bulbo seco es la temperatura de una muestra de aire, determinada por un termómetro ordinario, termopar u otro instrumento que permita medir la temperatura. Por lo general, es el eje de abscisas u horizontal del gráfico. La unidad del SI para la temperatura es Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), y para el sistema inglés es Fahrenheit.

### **Temperatura del Bulbo Húmedo ( $T_{bh}$ )**

La temperatura de bulbo húmedo es la cuantificación de una muestra de aire después de que ha pasado por un proceso de saturación adiabática ideal a presión constante, es decir, después de que el aire ha pasado sobre una gran superficie de agua líquida en un canal aislado. En la práctica, esta es la lectura de un termómetro cuyo bulbo sensor está cubierto con un material poroso, como tela o algodón húmedo que se evapora en una corriente rápida de la muestra de aire. La

temperatura de bulbo húmedo es la misma que la temperatura de bulbo seco cuando la muestra de aire está saturada de agua.

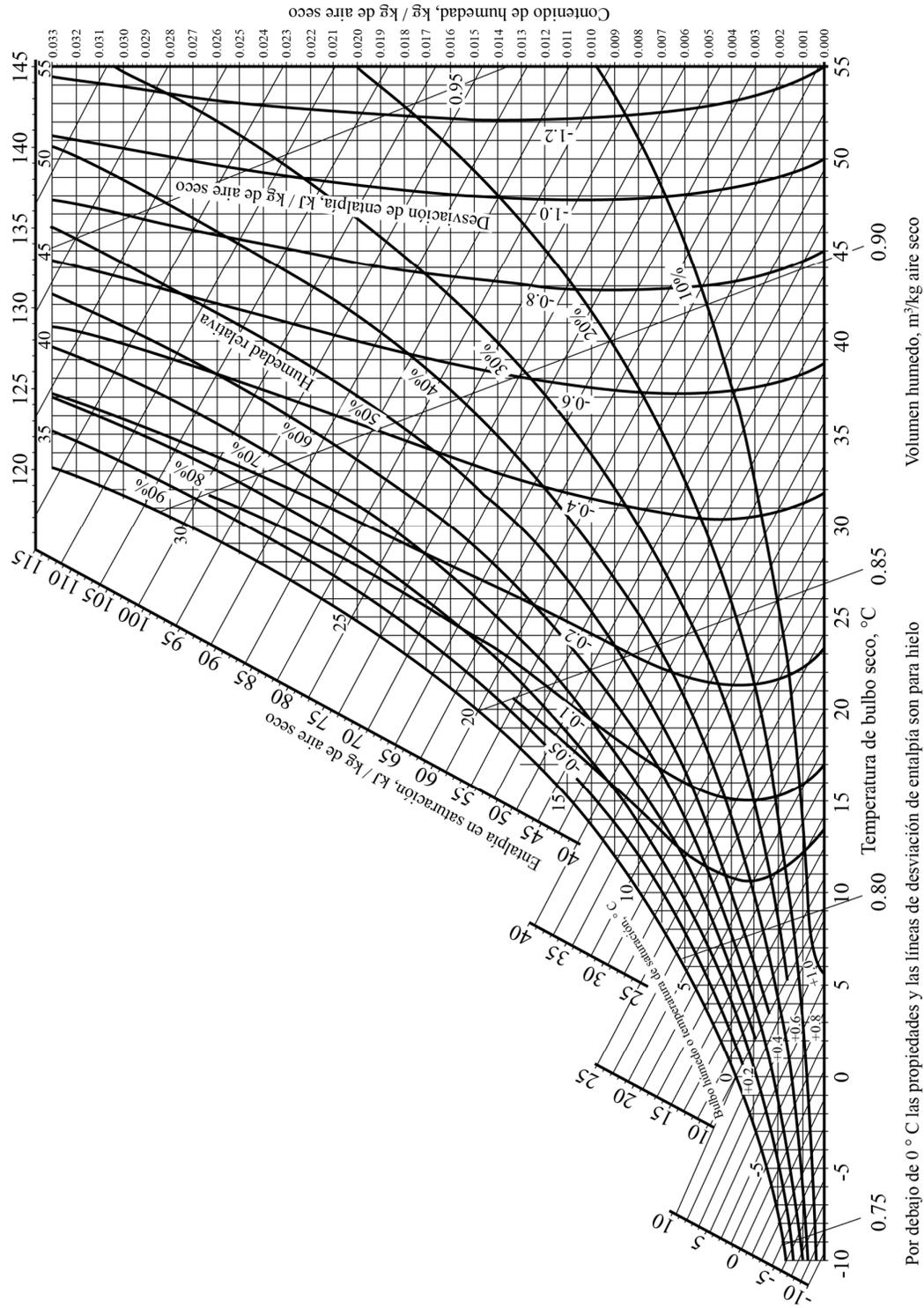


FIGURA 2.3

Diagrama Psicrométrico

### **Temperatura de Rocío ( $T_{pr}$ )**

La temperatura del punto de rocío es la cuantificación a la que una muestra de aire húmedo a la misma presión alcanza la saturación de vapor de agua. En este punto de saturación, el vapor de agua comienza a condensarse en una neblina líquida.

### **Humedad Relativa ( $h_r$ )**

La humedad relativa es la relación entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor de equilibrio del aire húmedo saturado a la misma temperatura y presión. La humedad relativa es adimensional y habitualmente se expresa como un porcentaje.

### **Relación de Humedad**

La proporción de humedad, también conocida como contenido de humedad, proporción de mezcla o humedad específica, es la proporción de masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco en las condiciones dadas. Para una temperatura de bulbo seco dada, habrá una proporción de humedad particular para la cual la muestra de aire estará al 100% de humedad relativa. La relación de humedad no tiene dimensiones, pero a veces se expresa como gramos de agua por kilogramo de aire seco.

### **Entalpía Específica ( $\widehat{H}$ )**

La entalpía específica, también llamada contenido de calor por unidad de masa, es la suma de la energía interna (calorífica) del aire húmedo en cuestión, incluido el calor del aire y el vapor de agua del interior. En la aproximación de gases ideales, las líneas de entalpía constante son paralelas a las líneas de temperatura constante de bulbo húmedo.

## Volumen Específico ( $\widehat{V}$ )

El volumen específico, también llamado densidad inversa, es el volumen por unidad de masa de la muestra de aire. La unidad del SI es metros cúbicos por kilogramo de aire; y en el sistema inglés pies cúbicos por libra de aire seco.

### **Ejemplo 2.9 Diagrama psicrométrico**

Se presenta aire húmedo a una temperatura de 30 °C y tiene un punto de rocío de 18 °C. Haciendo uso del Diagrama psicrométrico determinar la humedad relativa, humedad absoluta, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, volumen húmedo, entalpía específica, masa de aire que contiene 3 kg de agua y volumen ocupado por aire que contiene 1 kg de agua.

### **Solución:**

La humedad relativa es 50%. El proceso de calculo se presenta en la figura 2.9.1

La humedad absoluta es 0.013 kg de agua /kg de aires seco. El proceso de calculo se presenta en la figura 2.9.2

La temperatura de bulbo húmedo es 21.5 °C. El proceso de calculo se presenta en la figura 2.9.3

La temperatura de bulbo seco es 30 °C

El volumen húmedo es 0.875 m<sup>3</sup>/kg aire seco. El proceso de calculo se presenta en la figura 2.9.4

La entalpía específica se calcula como la suma entre la entalpía en saturación y la desviación entálpica. El proceso de calculo se presenta en la figura 2.9.5

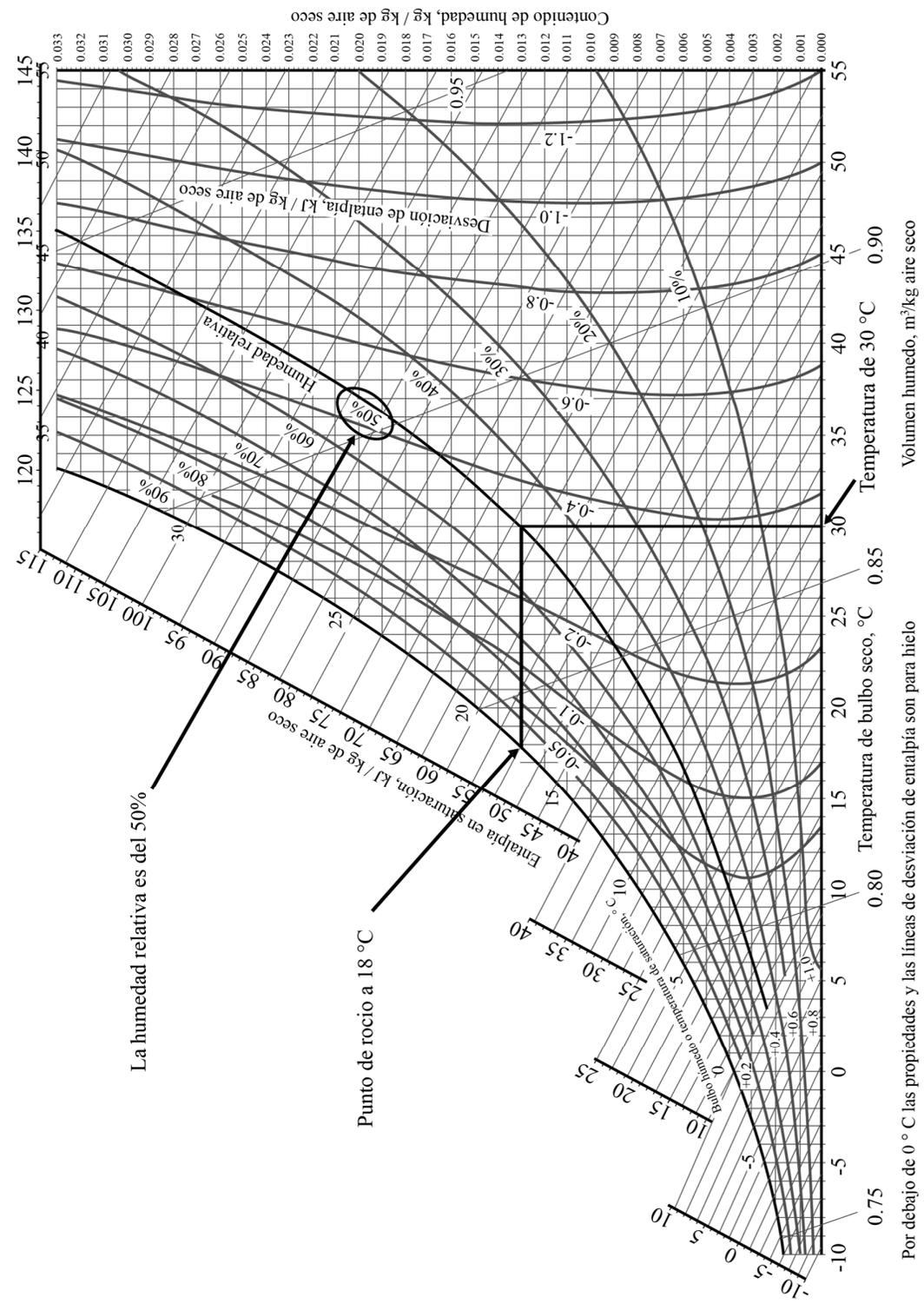


FIGURA DEL EJEMPLO 2.9.1

Calculo de la humedad relativa

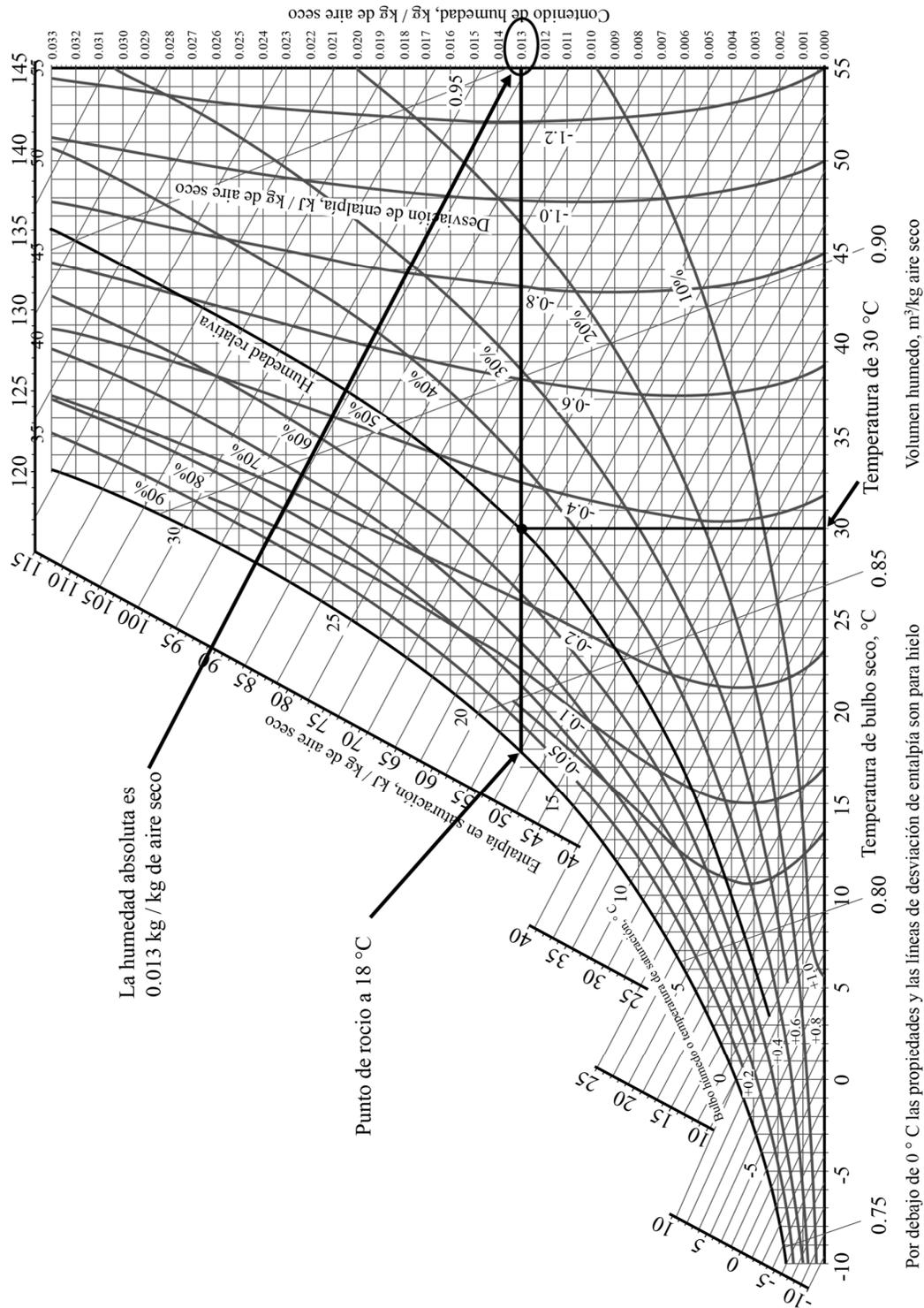


FIGURA DEL EJEMPLO 2.9.2

Calculo de la humedad absoluta

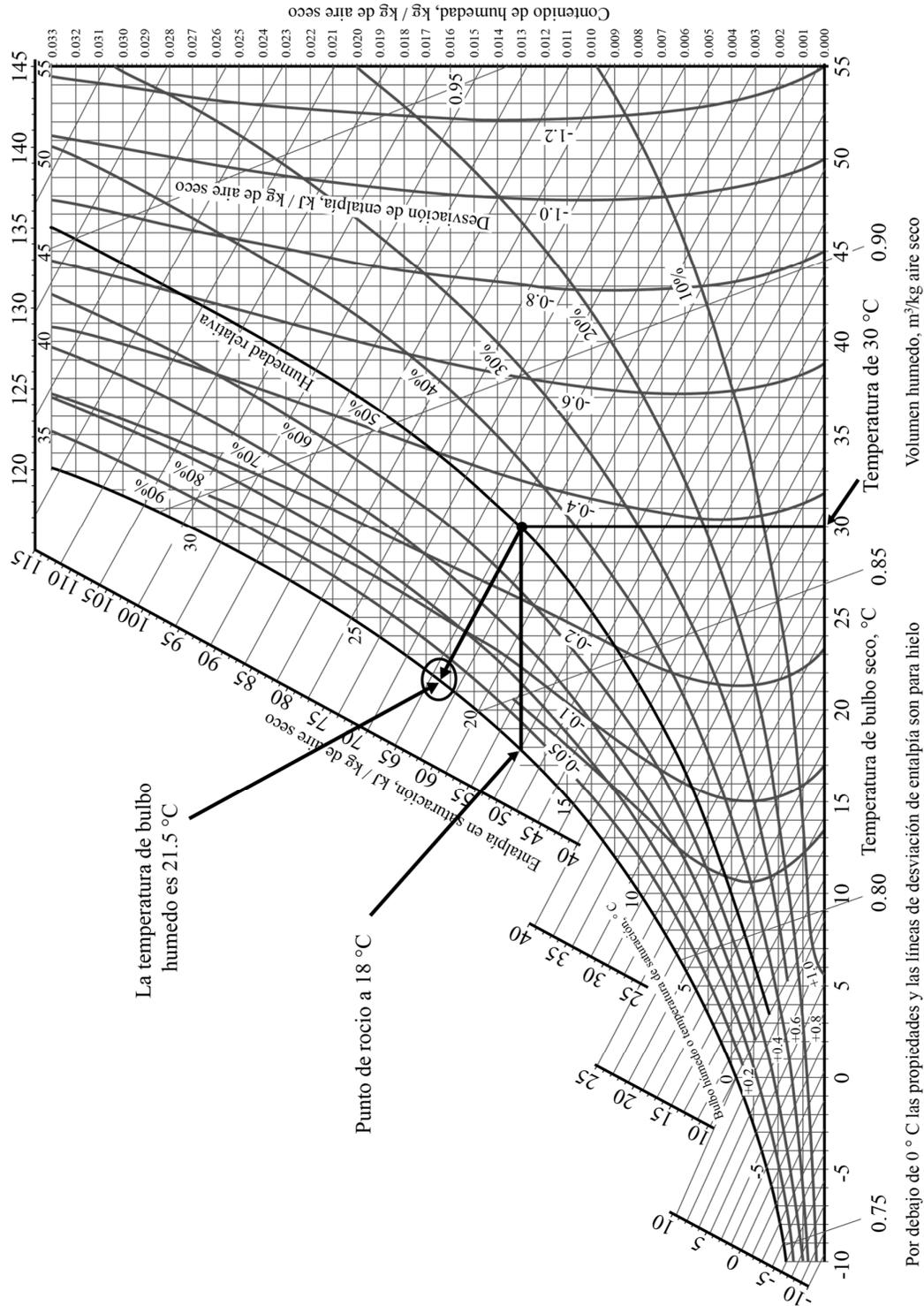


FIGURA DEL EJEMPLO 2.9.3

Calculo de la temperatura de bulbo húmedo

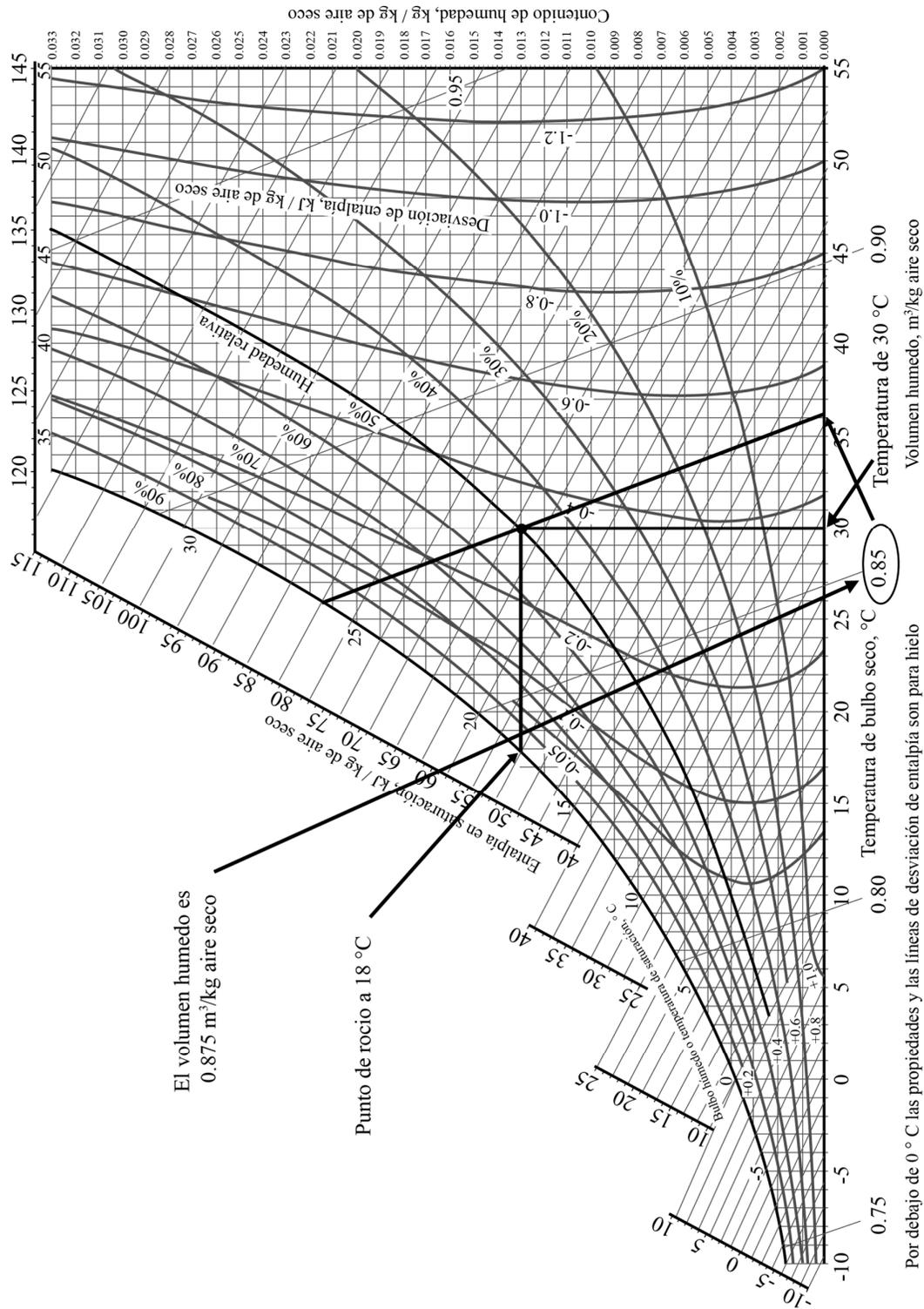
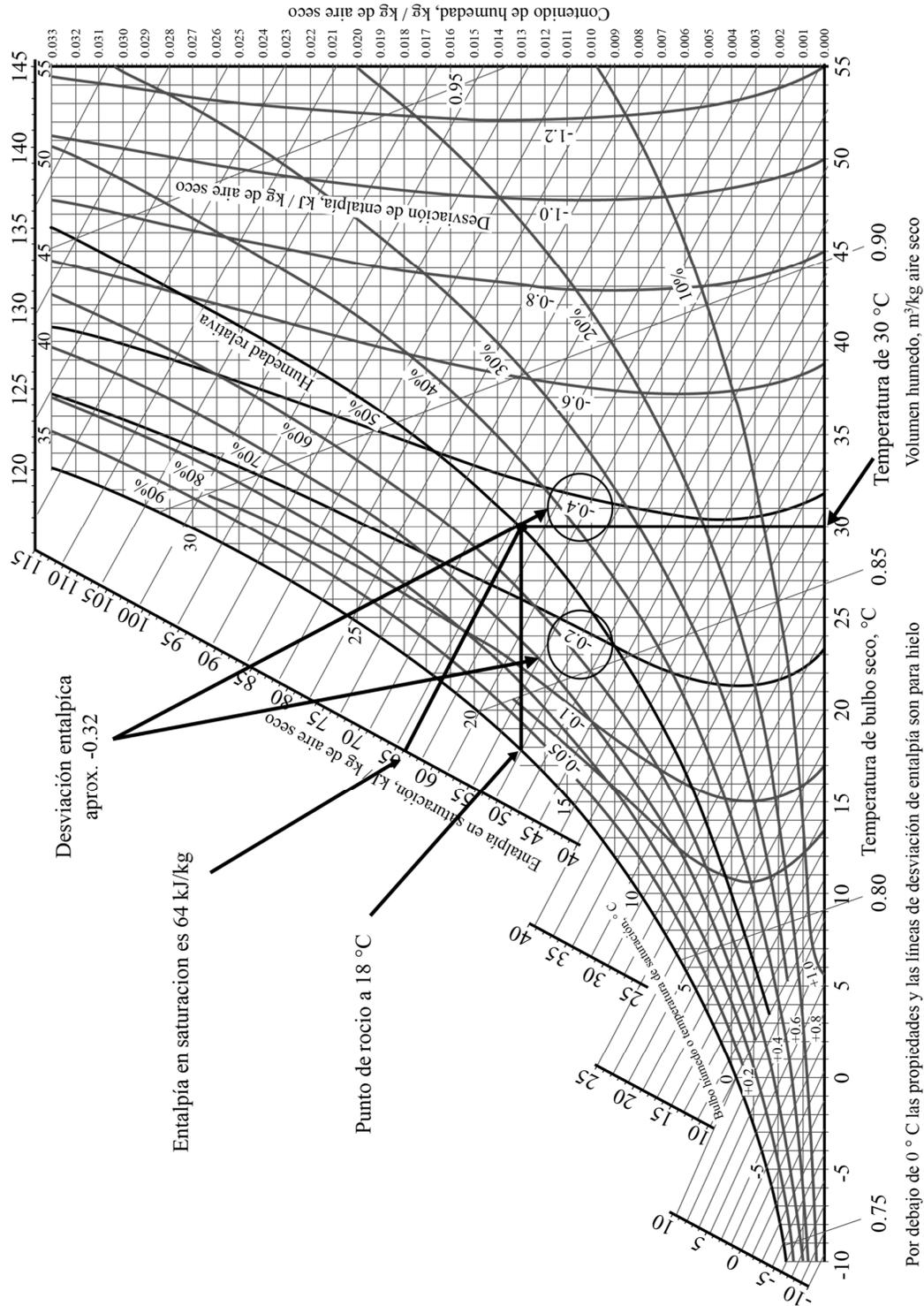


FIGURA DEL EJEMPLO 2.9.4

Calculo del volumen húmedo



Por debajo de 0 ° C las propiedades y las líneas de desviación de entalpia son para hielo

FIGURA DEL EJEMPLO 2.9.5

Calculo de la entalpia especifica

$$64 \text{ kJ/kg} + (-0.32 \text{ kJ/kg}) = 63.68 \text{ kJ/kg}$$

Masa de aire que contiene 3 kg de agua

$$3 \text{ kg H}_2\text{O} \frac{\text{kg de aire seco}}{0.013 \text{ kg H}_2\text{O}} = 230.769 \text{ kg de aire seco}$$

Volumen ocupado por aire que contiene 1 kg de agua

$$1 \text{ kg H}_2\text{O} \frac{0.875 \text{ m}^3 \text{ kg de aire seco}}{\text{kg aire seco} \cdot 0.013 \text{ kg H}_2\text{O}} = 67.307 \text{ m}^3$$

### Ejemplo 2.10 Humedad Relativa

A un proceso se alimenta un flujo volumétrico de 0.85 m<sup>3</sup>/h de aire que fluye a una presión de 2.5 bar y una temperatura de 30 °C. El aire seco tiene una composición molar de 21% oxígeno y 79% nitrógeno. Calcular los flujos molares del agua, oxígeno y aire seco que se alimentan al proceso cuando el aire presenta una humedad relativa del 75%.

Solución

Usando la definición de humedad relativa calcular la presión parcial para el agua.

$$0.75 = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^*}$$

La presión de vapor saturado a 30°C es 0.0424 bar (apéndice A.4).

$$0.75 = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{0.0424 \text{ bar}}$$

La presión parcial del vapor de agua ( $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ) es 0.0318 bar

La fracción molar del agua será

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = y_{\text{H}_2\text{O}} P_T$$

$$0.0318 \text{ bar} = (y_{\text{H}_2\text{O}})(2.5 \text{ bar})$$

$$y_{\text{H}_2\text{O}} = 0.01272 \text{ mol de agua/mol de aire humedo}$$

La fracción molar de agua es 0.01272 mol de agua/mol de aire húmedo y la fracción molar de aire seco es 0.98728.

Para calcular el flujo molar se puede hacer uso de la ecuación de los gases ideales.

$$PV = nRT$$

$$n_T = \frac{PV}{RT} = \frac{(2.5 \text{ bar}) (0.85 \text{ m}^3/\text{h})}{\left(8.314 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \text{bar}}{\text{mol K}}\right) (303.15 \text{ K})} = 84.312 \text{ mol/h}$$

En número de moles de aire seco es

$$n_{\text{aire seco}} = y_{\text{aire seco}} n_T$$

$$n_{\text{aire seco}} = (0.98728)(84.312 \text{ mol/h}) = 83.239 \text{ mol/h}$$

### Ejercicios Propuestos

- 2.1 Determinar la energía interna específica de vapor de un compuesto desconocido a 0 °C y 90 °C. La energía interna específica del compuesto a 1 atm está dado por  $\hat{U}(\text{J/mol}) = 24.67T + 0.003568T^2$  donde T esta en °C.
- 2.2 Haciendo uso de la tabla A.2 de apéndice A calcular:
  - a) La capacidad calorífica (Cp) de la acetona líquida 50 °C.
  - b) La capacidad calorífica a presión constante del vapor de acetona a 50 °C
- 2.3 Calcular la entalpia específica en (kJ/mol) para vapor de tolueno que pasa de 30 °C a 350 °C y para el carbón sólido que pasa de 40 °C a 325 °C.
- 2.4 Una corriente de vapor de agua tiene un flujo molar a 300 mol/h y pasa de 500°C y 10 atm a 100°C y 1 atm. Determinar la velocidad a la que se enfría en (kW) mediante el uso de tablas de vapor y empleando los datos de Cp de la tabla A.2.
- 2.5 Un recipiente contiene una mezcla de gases constituido por el 65% de etano en volumen y 35% es de oxígeno a 300 °C y 3 atm. Determinar la entalpia específica en kJ/kg, en relación a los componentes puros a 25°C y 1atm. Anotar todas las suposiciones que se realicen.

- 2.6 En un intercambiador de calor adiabático se usa vapor saturado a  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$  para calentar una corriente de vapor de etanol de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  que circula en contracorriente, el flujo volumétrico de etanol es de  $500\text{ l/min}$  y el vapor que se condensa sale del intercambiador como agua líquida a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- 2.7 Trace una trayectoria hipotética para los siguientes procesos:
- Se tiene acetaldehído líquido a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $1\text{ atm}$  y se desea cambia a  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $2\text{ atm}$ .
  - El metano se encuentra en fase vapor a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $3\text{ bares}$  y se desea enfriar y condensar a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $2\text{ atm}$ .
- 2.8 Determinar el cambio de entalpía para un flujo másico de  $150\text{ g/s}$  de una sustancia que se calentó en un intercambiador de calor de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , si la capacidad calorífica a presión constante es de  $0,7\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$ .
- 2.9 Una mezcla líquida de  $1600\text{ kmol/h}$  que tiene dos tercios de acetona y en balance con benceno ingresa a un intercambiador de carcasa y tubos para elevar su temperatura de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El intercambiador utiliza vapor saturado con calidad del  $85\%$  a  $15\text{ bar}$  como medio de calentamiento. Determinar el flujo másico del vapor necesario en la entrada del intercambiador.
- 2.10 En una turbina adiabática ingresa vapor a  $50\text{ atm}$  y  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  con un flujo másico de  $1\text{ kg/s}$ ; la corriente de salida de la turbina está a  $1\text{ atm}$  y  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las corrientes de entrada y salida de la turbina están a la misma altura y las tuberías tienen el mismo diámetro de  $0,15\text{ m}$ . ¿Cuánto trabajo se puede obtener de una turbina adiabática de flujo continuo?
- 2.11 En una turbina que se está operando, el vapor que sale de la turbina está a  $6\text{ atm}$  (absoluto). El vapor contiene  $97\%$  en peso de vapores. Si el trabajo que produce el eje en la turbina es de  $1050\text{ kJ/kg}$  y el vapor de alta presión y alta temperatura ingresa a la turbina a  $90\text{ atm}$  (absoluto), determinar la temperatura del vapor que ingresa a la turbina cuando se suministra agua a  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a la caldera para generar vapor, ¿cuánto calor se requiere por kilogramo de vapor producido? Asumir que las pérdidas de calor de la turbina son insignificantes.
- 2.12 Se presenta aire húmedo a una temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y tiene un punto de rocío de  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Haciendo uso del Diagrama psicrométrico determinar la humedad relativa, humedad absoluta, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, volumen húmedo, entalpía específica, masa de aire que contiene  $5\text{ kg}$  de agua y volumen ocupado por aire que contiene  $1,2\text{ kg}$  de agua.
- 2.13 Para que un apartamento en invierno sea cómodo se toma del aire exterior  $1000\text{ kg}$ . El aire exterior tiene una temperatura de bulbo seco de  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una temperatura de bulbo húmedo de  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se desea que el aire del apartamento tenga una temperatura de bulbo seco de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una humedad

- relativa del 65%, determinar la cantidad de agua que se debe añadir a los 1000kg del aire exterior para alcanzar el nivel de humedad deseado
- 2.14 Una vivienda de 200 m<sup>2</sup> debe tener un flujo de intercambio de aire de 60 ft<sup>3</sup> de aire seco/min con el exterior y una humedad relativa del 65%. Si el aire exterior está a 35 °F y una humedad relativa del 40% y se ingresa a la vivienda y se calienta a 75 °F sin agregar agua, ¿cuál es la humedad relativa?

## Referencias

- Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Mass and Energy Balances: Basic Principles for Calculation, Design, and Optimization of Macro/Nano Systems*. <http://www.springer.com/series/1161>
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos* (G. Noriega (ed.)). Limusa S.A. de C.V.
- Ghasem, N., & Henda, R. (2012). Principles of chemical engineering processes. In *Principles of Chemical Engineering Processes*. <https://doi.org/10.1201/b17696>
- Himmelblau David. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (Sexta). University of Texas.
- Matar, S., & Hatch, Lewis F. (1995). Chemistry of petrochemical processes. In *World Pumps* (Vol. 1995, Issue 345). [https://doi.org/10.1016/s0262-1762\(99\)81158-4](https://doi.org/10.1016/s0262-1762(99)81158-4)
- Murphy, R. M. (2007). *Introducción a los procesos químicos: principios, análisis y síntesis*. (2da ed.). McGraw-Hill.

# 3

## **Balance de Energía con Reacción Química.**

Cuando los procesos conllevan una reacción química, los cambios de entalpía y energía interna requieren una transferencia de calor significativa desde o hacia el reactor (calentando o enfriando) para mantenerlo en condiciones óptimas de funcionamiento u operatividad. En el presente capítulo se indica cómo calcular el calor de reacción a una temperatura específica, e ilustra cómo estimar el calor de reacción estándar a partir del calor de formación y combustión, además se mostrará los balances de energía para un sistema reactivo utilizando dos métodos el método de calor de reacción y el método de calor de formación. Al final del capítulo se abordaran problemas simultáneos de balances de materia y energía.

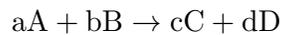
### **Objetivos de aprendizaje**

1. Definir el calor de reacción estándar y determinar la manera de calcularlo a partir de los calores de formación y de combustión.
2. Determinar el método adecuado para resolver los balances de energía con reacciones químicas
3. Calcular el calor de reacción a partir de los calores de formación de distintos componentes a condiciones estándar.
4. Establecer balances de energía para un sistema reactivo.
5. Entender y formular balances simultáneos de materia y energía.

### 3.1 Calor de Reacción

El calor de reacción,  $\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ$ , (T, P), también conocido como entalpía de reacción, se da cuando existe una alteración en la energía cuando los reactivos se comienzan a transformar en productos, es decir, es la energía que absorbe o libera las cantidades estequiométricas de reactivos que reaccionan completamente para formar productos a la misma temperatura y presión.

Considere la siguiente reacción:



Cuando el calor estándar de reacción ( $\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ$ ), tanto en productos como en reactivos en condiciones estándar, es decir, a 25 °C y 1 atm, se determina mediante la diferencia entre las entalpías de formación del producto y del reactivo. El símbolo "o" como superíndice denota que se encuentra en condiciones estándar. Por lo tanto,

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ (\text{kJ/mol}) = \widehat{H}_{\text{productos}} - \widehat{H}_{\text{reactivos}} \quad (3.1)$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ (\text{kJ/mol}) = c\Delta\widehat{H}_{\text{f,C}}^\circ + d\Delta\widehat{H}_{\text{f,D}}^\circ - a\Delta\widehat{H}_{\text{f,A}}^\circ - b\Delta\widehat{H}_{\text{f,B}}^\circ \quad (3.2)$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ (\text{kJ/mol}) = \sum \gamma_i \widehat{H}_i^\circ \quad (3.3)$$

donde  $\widehat{H}_f^\circ$  es el calor estándar de formación.

El  $\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ$  reportado se emplea a las cantidades estequiometrias de cada especie.

Considere el siguiente ejemplo:



El cambio de entalpía para la reacción dada es:

$$\frac{-130 \text{ kJ}}{1 \text{ mol A consumido}} = \frac{-130 \text{ kJ}}{3 \text{ mol B consumido}} = \frac{-130 \text{ kJ}}{2 \text{ mol C generado}}$$

Si se obtiene 100 mol/s de producto C a 90 °C y 1.2 atm, entonces

$$\Delta \dot{H} = \left( \frac{-130 \text{ kJ}}{2 \text{ mol C generado}} \right) \left( \frac{100 \text{ mol C generado}}{\text{s}} \right) = -6500 \text{ kJ/s}$$

Para una reacción exotérmica,  $\widehat{\Delta H}_{\text{Rx}}(T)$  es negativo, y para evitar que aumente la temperatura en el reactor, se debe retirar energía. Si  $\widehat{\Delta H}_{\text{Rx}}(T)$  es positivo, la reacción será endotérmica, por tanto la temperatura tiende a disminuir en el reactor, para mantener la temperatura estable, se debe introducir energía al reactor. Los calores de reacciones son dependientes de la ecuación estequiométrica y de la fase en la que se encuentren los productos y reactivos y normalmente no dependerá de la presión.

### 3.2 Calores de Formación y Calor de Combustión

El calor estándar de reacción ( $\widehat{\Delta H}_{\text{Rx}}^{\circ}$ ), es el cambio de entalpía cuando una sustancia pura se está formando a partir de productos en condiciones estándar, es decir, a 25 °C y 1 atm, y se lo puede determinar a partir del calor estándar de formación ( $\widehat{\Delta H}_{\text{f}}^{\circ}$ ), una sustancia pura puede ser un elemento o compuesto, sin embargo, el calor estándar de formación ( $\widehat{\Delta H}_{\text{f}}^{\circ}$ ) de todas las especies elementales son cero ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ). Los valores de  $\widehat{\Delta H}_{\text{f}}^{\circ}$  se pueden encontrar a partir de datos tabulados (Tabla A.1, apéndice A). La ecuación general queda de la siguiente manera:

$$\widehat{\Delta H}_{\text{Rx}}^{\circ} = \sum_i \gamma_i \widehat{\Delta H}_{\text{f},i}^{\circ} \quad (3.4)$$

donde

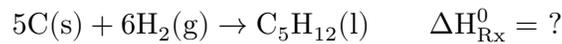
( $\gamma_i$ ) es el coeficiente estequiométrico de la especie de reactivo o producto  $i$

( $\widehat{\Delta H}_{\text{f},i}^{\circ}$ ) es el calor estándar de formación de las especies  $i$

El calor estándar de reacción  $\lim_{\Delta \rightarrow \infty} \widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ}$  de cualquier reacción que involucre solo oxígeno y una especie combustible se puede calcular como:

$$\Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = - \sum_i \gamma_i \Delta \widehat{H}_{\text{c},i}^{\circ} \quad (3.5)$$

El calor estándar de combustión  $\Delta \widehat{H}_{\text{C}}^{\circ}$  de un compuesto i, es la energía que se forma entre esa especie i con oxígeno, y es lo contrario a determinar los calores de reacción a partir de los calores de formación, en el caso de que algún reactivo o producto sean elementos de combustión ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ), su calor de combustión será iguales a cero. Para numerosas sustancias, es menos exigente medir el calor estándar de combustión ( $\Delta \widehat{H}_{\text{C}}^{\circ}$ ) que medir el calor estándar de formación ( $\Delta \widehat{H}_{\text{f}}^{\circ}$ ). Considere la formación de pentano:



El carbono, el hidrógeno y el pentano se pueden quemar, y sus calores estándar de combustión se pueden determinar experimentalmente. Por lo tanto,

$$\Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^0 = - \left[ \Delta \widehat{H}_{\text{c},\text{C}_5\text{H}_{12}(\text{l})}^0 - \left( 5\Delta \widehat{H}_{\text{c},\text{C}(\text{s})}^0 + 6\Delta \widehat{H}_{\text{c},\text{H}_2(\text{g})}^0 \right) \right]$$

El calor estándar de combustión en una reacción química, es la energía liberada cuando 1 mol de reactivo combustiona completamente en oxígeno a 25 °C y 1 atm. El carbono forma  $\text{CO}_{2(\text{g})}$ , el hidrógeno forma  $\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$ , el azufre forma  $\text{SO}_{2(\text{g})}$  y todo el nitrógeno forma  $\text{NO}_{2(\text{g})}$ . La misma estimación del calor estándar puede utilizarse para medir el calor estándar de formación del pentano:

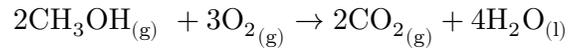
$$\Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^0 = \Delta \widehat{H}_{\text{f},\text{C}_5\text{H}_{12}(\text{l})}^0 - 5\Delta \widehat{H}_{\text{f},\text{C}(\text{s})}^0 - 6\Delta \widehat{H}_{\text{f},\text{H}_2(\text{g})}^0$$

Dado que el carbono y el hidrógeno son átomos, el valor de sus calores estándar de formación es cero.

$$\Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^0 = \Delta \widehat{H}_{\text{f},\text{C}_5\text{H}_{12}(\text{l})}^0 - 0 - 0$$

### Ejemplo 3.1 Calor de Reacción a Partir de Calores de Formación

La reacción para la combustión de metanol líquido se muestra en el siguiente esquema:



Utilizando el calor de formación y el calor de combustión, determinar el calor estándar de reacción.

#### Solución

Para calcular el calor estándar de reacción haciendo uso del calor estándar de formación se tendrá:

$$\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = 4\widehat{H}_{\text{f,H}_2\text{O}(l)}^{\circ} + 2\widehat{H}_{\text{f,CO}_2(g)}^{\circ} - 3\widehat{H}_{\text{f,O}_2(g)}^{\circ} - 2\widehat{H}_{\text{f,CH}_3\text{OH}(g)}^{\circ}$$

Del apéndice A, tabla A.1, se toman los valores de calor estándar de formación:

$$\widehat{H}_{\text{f,H}_2\text{O}(l)}^{\circ} = -285.84 \text{ kJ/mol}$$

$$\widehat{H}_{\text{f,CO}_2}^{\circ} = -393.5 \text{ kJ/mol}$$

$$\widehat{H}_{\text{f,CH}_3\text{OH}(l)}^{\circ} = -201.2 \text{ kJ/mol}$$

$$\widehat{H}_{\text{f,O}_2(g)}^{\circ} = 0 \text{ kJ/mol}$$

Reemplazar los valores del calor estándar de formación:

$$\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = (4(-285.84) + 2(-393.5) - 3(0) - 2(-201.2)) \text{ kJ/mol}$$

$$\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = -1527.96 \text{ kJ/mol}$$

Para calcular el calor estándar de reacción haciendo uso del calor estándar de combustión se tendrá:

$$\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = 2\widehat{H}_{\text{c, CH}_3\text{OH(l)}}^{\circ} + 3\widehat{H}_{\text{c, O}_2\text{(g)}}^{\circ} - 4\widehat{H}_{\text{c, H}_2\text{O(l)}}^{\circ} - 2\widehat{H}_{\text{c, CO}_2\text{(g)}}^{\circ}$$

Del apéndice A, tabla A.1, se toman los valores de calor estándar de formación:

$$\Delta\widehat{H}_{\text{f, H}_2\text{O(l)}}^{\circ} = 0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{f, CO}_2}^{\circ} = 0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{f, CH}_3\text{OH(l)}}^{\circ} = -764 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{f, O}_2\text{(g)}}^{\circ} = 0 \text{ kJ/mol}$$

Reemplazar los valores del calor estándar de combustión:

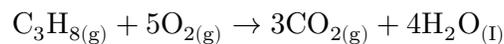
$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = -(4(0) + 2(0) - 3(0) - 2(-764)) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = -1528 \text{ kJ/mol}$$

Con los resultados se puede evidenciar que ambos valores de calor estándar de reacciones calculados con calores de reacción estándar de formación y combustión son idénticos.

### **Ejemplo 3.2 Flujo Estándar de Cambio en Entalpía**

En la combustión completa del propano se obtiene 200 mol/h de  $\text{CO}_2$ , el sistema opera a  $25^{\circ}\text{C}$  y 1 atm y en la corriente de alimentación no hay presencia de  $\text{CO}_2$ . Calcular el Flujo o la tasa estándar del cambio de entalpía.



### Solución

El calor estándar de reacción del calor de formación es el siguiente:

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ}(25^{\circ}\text{C}, 1 \text{ atm}) = \sum \gamma_i \Delta\widehat{H}_{\text{f},i}^{\circ}$$

El calor de reacción viene dado por

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = 4(\Delta\widehat{H}_{\text{f},\text{H}_2\text{O}(l)}^{\circ}) + 3(\Delta\widehat{H}_{\text{f},\text{CO}_2(\text{g})}^{\circ}) - 1(\Delta\widehat{H}_{\text{f},\text{C}_3\text{H}_8(\text{g})}^{\circ}) - 5(\Delta\widehat{H}_{\text{f},\text{O}_2(\text{g})}^{\circ})$$

Los calores de formación se toman del apéndice A, tabla A.1.

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = 4(-285.84) + 3(-393.5) - 1(-103.8) - 5(0)$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = -2220.06 \text{ kJ/mol}$$

El avance de la reacción se calcula usando el balance molar de  $\text{CO}_2$ ; tenga en cuenta que no hay dióxido de carbono presente en la corriente de alimentación antes de que tenga lugar la reacción:

$$n_{\text{CO}_2} = E - S$$

$$200 \text{ mol/s} = 0 + 3\xi$$

$$\xi = 200/3 = 66.667 \text{ mol/s}$$

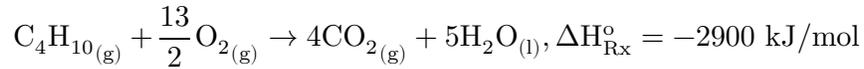
El cambio en el flujo de transferencia de entalpía se calculará como

$$\Delta\dot{H} = \xi \times \Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = (66.667 \text{ mol/s})(-2220.06 \text{ kJ/mol})$$

$$\Delta\dot{H} = -1.727 \times 10^5 \text{ kJ/s}$$

### Ejemplo 3.3 Combustión de Butano

La combustión completa del butano en fase vapor y el calor estándar de la reacción se muestra a continuación:



Se producen 50 mol/s de  $\text{CO}_2$ , el proceso opera a una temperatura de 25 °C. Luego se ingresa una nueva alimentación al reactor y contiene 25 mol/s de  $\text{CO}_2$ . Calcular la tasa o flujo de cambio de entalpía  $\Delta\dot{H}(\text{kJ/s})$ .

### Solución

Debido a que el proceso opera a 25 °C la temperatura en las corrientes de entrada y salida es igual por tanto el cambio en el calor sensible es irrelevante y la tasa de cambio en la entalpía solo se debe al calor de reacción y se calculará como:

$$\Delta\dot{H} = \dot{\xi}\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^\circ$$

Para calcular el avance de reacción  $\xi$  se deberá realizar un balance molar para el  $\text{CO}_2$ , debido a que se conocen los flujos molares para el  $\text{CO}_2$ .

$$\dot{n}_{\text{CO}_2} = \dot{n}_{\text{CO}_2\text{alimentado}} + 4\dot{\xi}$$

Reemplazar los valores de los caudales molares de entrada y salida para el dióxido de carbono:

$$50 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 25 \frac{\text{mol}}{\text{s}} + 4\dot{\xi}$$

El alcance de la reacción es

$$\dot{\xi} = \frac{50 - 25}{4} = \frac{20}{4} = 6.25 \text{ mol/s}$$

El flujo o tasa estándar de cambio de entalpía,  $\Delta\dot{H}$  es

$$\Delta\dot{H} = \xi\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = \left(6.25 \frac{\text{mol}}{\text{s}}\right) \left(-2900 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) = -18125 \text{ kJ/s}$$

### 3.2.1 Avance de la Reacción

El avance o alcance de una reacción es un número positivo y establece una relación entre el consumo y generación de todos los compuestos que participan en el proceso de reacción, el cambio de entalpía asociado al avance de reacción se representa de la siguiente manera:

$$\Delta\dot{H} = \dot{\xi}\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}(T, P)$$

El alcance de la reacción ( $\xi$ ) es una medida de cuánto ha avanzado una reacción:

$$(\dot{n}_i)_s = (\dot{n}_i)_e + \gamma_i \dot{\xi}$$

Reordenando, el grado de avance de una reacción se expresa como

$$\dot{\xi} = \frac{(\dot{n}_i)_s - (\dot{n}_i)_e}{\gamma_i}$$

### 3.2.2 Reacciones en Procesos Cerrados

El cambio en la energía interna de reacción ( $\Delta U_{\text{Rx}}$ ), es una propiedad asociada únicamente al estado que presenta la sustancia, sin considerar como alcanza dicho estado. Para sistemas cerrados a volumen constante esta queda definida como la diferencia entre la variación de la entalpía de reacción con  $(\Delta n)RT$  que representa un cambio de energía dentro de un sistema de reacción.

$$\Delta U_{\text{Rx}} = \Delta H_{\text{Rx}} - (\Delta n)RT$$

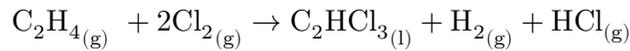
El cambio en el número de moles es equivalente al cambio en el número de coeficientes estequiométricos entre los productos y reactivos, tomar en cuenta que el coeficiente estequiométrico ( $\gamma$ ) es (+) para producto, (-) para reactivo.

Reemplazando  $\Delta n = \sum \gamma_i$ ,

$$\Delta U_{\text{Rx}} = \Delta H_{\text{Rx}} - RT \sum \gamma_i$$

### Ejemplo 3.4 Calor de Reacción de Energía Interna

El etileno reacciona con cloro para producir tricloroetileno que es usado como desengrasante de metales y para producir refrigerantes, como subproductos se obtienen el hidrogeno y ácido clorhídrico, como se presenta en la siguiente reacción.



Calcular el calor estándar de la reacción si la energía interna de reacción en condiciones estándar (25 °C, 1 atm) es -418 kJ/mol.

### Solución

Para hallar el calor de reacción con la energía interna se hará uso de la siguiente ecuación para un sistema cerrado:

$$\Delta U_{\text{Rx}}(T) = \Delta \hat{H}_{\text{Rx}}(T) - RT \sum \gamma_i$$

Sustituir cantidades desconocidas:

$$-418 \text{ kJ/mol} = \Delta \hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} - \frac{8.314 \text{ J}}{\text{mol K}} \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} (298.15 \text{ K})(1 + 1 + 0 - 2 - 1)$$

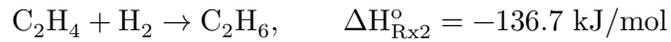
$$\Delta \hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = -420.5 \text{ kJ/mol}$$

En la ecuación utilizada  $\gamma_i$  es el coeficiente estequiométrico y se usa signo (+) para el producto y (-) para el reactivo, los valores se toman únicamente para compuestos gaseosos (no los componentes líquidos o sólidos). Si un conjunto de reacciones puede manipularse mediante una

serie de operaciones algebraicas para producir la reacción deseada, entonces el calor de reacción deseado puede obtenerse realizando las mismas operaciones algebraicas en los calores de reacción del conjunto de reacciones manipulado (ley de Hess).

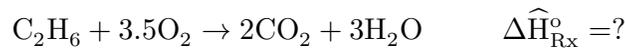
### Ejemplo 3.5 Calor de Reacción Estándar

Determinar el calor de combustión para el etano a partir de las siguientes reacciones:



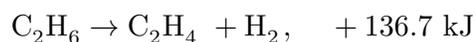
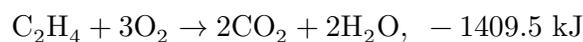
### Solución

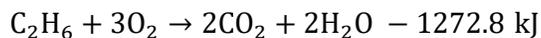
La reacción global para la combustión del etano es la siguiente:



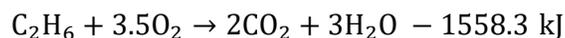
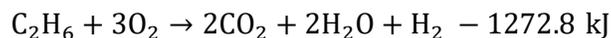
Haciendo uso de la ley de Hess se calculará el calor estándar de reacción.

Como la secuencia de reacciones es para la combustión del etano, la segunda reacción se deberá invertir, es decir multiplicar por (-1) para poder tener al etano como producto, luego se deberá proceder a sumar las reacciones 1 y 2.





La reacción resultante de sumar 1 y 2 se deberá sumar a la tercera reacción:



La reacción resultante es la reacción global de todas las secuencias para la combustión del etano, obteniendo como resultado el calor de combustión de  $\text{C}_2\text{H}_6$  es -1558,3 kJ

### Ejemplo 3.6 Producción de Etileno

#### Problema

El etileno es el primer miembro de los alquenos, este compuesto es ligeramente soluble en alcohol y agua además es un gas incoloro que tiene un olor dulce, el etileno es un agente alquilante activo y se puede polimerizar a diferente grados de polietileno. Calcule el calor estándar de reacción de la deshidrogenación del etano para producir etileno utilizando los calores estándar de combustión:



#### Solución

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ = \Delta\widehat{H}_{\text{c},\text{C}_2\text{H}_6}^\circ - \Delta\widehat{H}_{\text{c},\text{C}_2\text{H}_4}^\circ - \Delta\widehat{H}_{\text{c},\text{H}_2}^\circ$$

Reemplazando los valores del calor de combustión estándar (del apéndice) se obtiene

$$\Delta H_{\text{Rx}}^{\circ} = -1559.9 - (-1410.99) - (-285.84) = 136.93 \text{ kJ/mol}$$

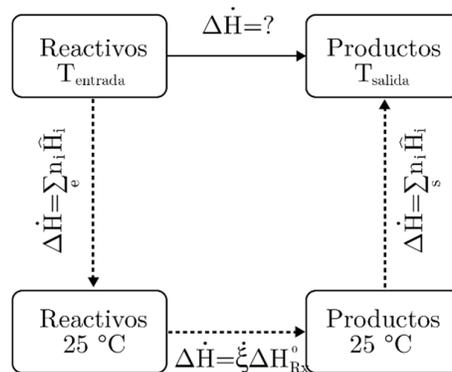
### 3.3 Balance de Energía para Procesos Reactivos

Para resolver los balances de energía con reacción, existen dos estrategias; el método de calor de reacción que se conoce también como grado o avance de reacción y el método de calor de formación. Estas dos estrategias varían dentro de la elección del estado de referencia.

#### 3.3.1 Método de Calor de Reacción

Este método o estrategia es adecuado cuando en el proceso está involucrado solo una reacción y el valor de  $\Delta \hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ}$  es conocido o se proporcionan los parámetros necesarios para calcularlo, este método requiere el cálculo del avance de la reacción ( $\xi$ ).

Primero se debe aplicar un balance de materia para uno de los componentes involucrados y así determinar el alcance de reacción, además se deberá conocer los caudales de alimentación y salida; luego se determinará el calor de reacción para el momento en el que los reactivos se transforman a productos, este valor se encuentra tabulado en un estado de referencia de 25°C y 1 atm, pero los productos y reactivos pueden estar en la entrada y salida a diferentes temperaturas, véase figura 3.1.



**FIGURA 3.1**

Cambio de entalpía para un proceso reactivo.

La variación del flujo entálpico que se necesita para que se efectúe la reacción se determinará con la siguiente ecuación:

$$\Delta\dot{H} = \dot{\xi}\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^0 + \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i\hat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i\hat{H}_i$$

donde  $\hat{H}_i$  es la entalpía molar específica de un componente definido.

Para reacciones múltiples, donde el estado de referencia es 25 °C y 1 atm y las corrientes de entrada y salida están a temperaturas distintas a los estados de referencia,

$$\Delta\dot{H} = \sum_{\text{Reacciones}} \dot{\xi}_j\Delta\hat{H}_{\text{Rx},j}^0 + \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i\hat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i\hat{H}_i$$

Si se considera una temperatura de referencia distinta a 25 °C, el calor de reacción debe calcularse en el nuevo estado de referencia:

El calor de reacción a cualquier temperatura se expresa como:

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx}} = \Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^0(25^\circ\text{C}) + \int_{25^\circ\text{C}}^T \Delta C_P dT$$

donde  $\Delta C_P = \sum \gamma_i C_{P,i}$

### 3.3.2 Método de Calor de Formación

Para este método no es necesario utilizar el valor del calor estándar de reacción ( $\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^0$ ), esto se debe a que el calor de reacción está involucrado al restar los calores de formación entre los reactivos y productos. Para el caso en donde se tenga una o varias reacciones la ecuación que determinará la variación entalpía es:

$$\Delta\dot{H} = \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i\hat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i\hat{H}_i$$

donde  $\widehat{H}_i$  se refiere a la cambio de la entalpía molar con T y fase +  $\Delta\widehat{H}_f^0$  (Figura 3.2).

Se deberá encontrar la variación en la entalpía para todas las especies involucradas en la reacción a 25 °C, luego se realizará un balance de energía en la que se usará las entalpias calculadas previamente, si no se considera la energía cinética y potencial, el balance de energía será:

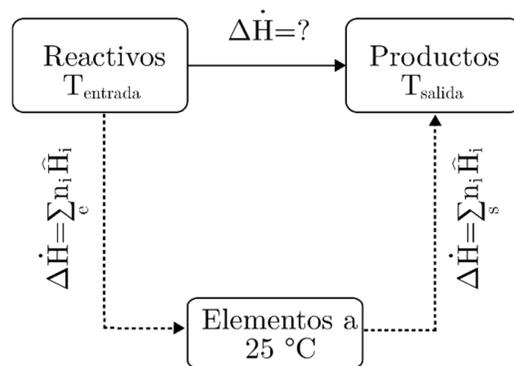
$$Q - W = \Delta\dot{H} = + \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i \widehat{H}_i$$

La entalpía molar específica del componente  $i$  ( $\widehat{H}_i$ ) en las corrientes de entrada se calculará como:

$$\widehat{H}_{i,\text{entrada}} = \int_{25\text{ °C}}^{T_e} C_{P,i} dT + \Delta\widehat{H}_{f,i}^0$$

La entalpía molar específica del componente  $i$  ( $\widehat{H}_i$ ) en las corrientes de salida es:

$$\widehat{H}_{i,\text{salida}} = \int_{25\text{ °C}}^{T_s} C_{P,i} dT + \Delta\widehat{H}_{f,i}^0$$



**FIGURA 3.2**

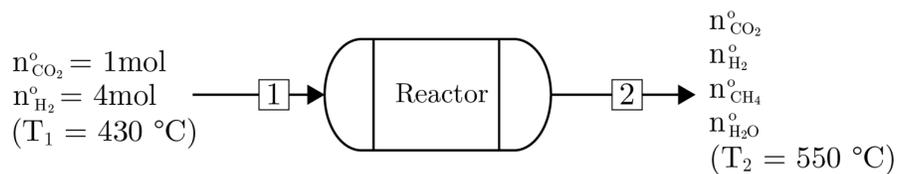
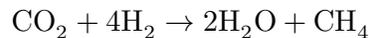
Calor de formación o método de balance de elementos

### 3.4 Balances Simultáneos de Materia y Energía

Los balances de materia se realizan sobre cualquier compuesto o elemento en el que se pueda determinar el avance de reacción, de igual manera se pueden escribir balances de energía para compuestos o elementos, se utiliza los resultados obtenidos del balance de materia para resolver las ecuaciones del balance de energía.

#### Ejemplo 3.7 Reacción en Fase Gaseosa

En un reactor CSTR en fase continua se alimenta en proporciones estequiométricas el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ , la reacción ocurre en fase gas a una temperatura de  $430\text{ }^\circ\text{C}$ . Dado 1 moles de dióxido de carbono, estime el calor que debe proporcionarse o eliminarse para una conversión del 85%, si se desea que los productos a la salida del gas se mantengan a  $550\text{ }^\circ\text{C}$ . Realizar un balance de energía utilizando el método del calor de reacción a dos temperaturas de referencia ( $550\text{ }^\circ\text{C}$  y  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) y el método del calor de formación.



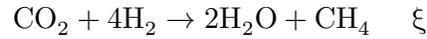
**FIGURA DEL EJEMPLO 3.7.1**

Diagrama de flujo del proceso de reacción en fase gaseosa

#### Solución

La alimentación es estequiométrica y el enunciado proporciona 1 mol de  $\text{CO}_2$  por tanto la cantidad de hidrógeno será 4 mol.

Para el balance de materia por el método de alcance o extensión de reacción se tendrá:



El balance de componentes se calculará utilizando el método de alcance de la reacción, en la que se sumara los moles alimentados al inicio y el alcance de reacción multiplicado por el coeficiente estequiométrico de la siguiente manera:

$$n_i = n_{i,0} - \gamma_i \xi$$

$$\text{CO}_2: n_{\text{CO}_2} = 1 \text{ mol} - \xi$$

$$\text{H}_2: n_{\text{H}_2} = 4 \text{ mol} - 4\xi$$

$$\text{CH}_4: n_{\text{CH}_4} = 0 \text{ mol} + \xi$$

$$\text{H}_2\text{O}: n_{\text{H}_2\text{O}} = 0 \text{ mol} + 2\xi$$

La conversión (f) se tomará para el reactivo limitante, en este ejemplo al alimentarse de forma estequiométrica se podrá tomar a cualquier reactivo, para el caso se tomara al  $\text{CO}_2$ .

$$f = \frac{n_{\text{CO}_2}^0 - n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{CO}_2}^0}$$

$$0.85 = \frac{1 \text{ mol} - n_{\text{CO}_2}}{1 \text{ mol}}$$

$$n_{\text{CO}_2} = 1 \text{ mol} - 0.85 \text{ mol} = 0.15 \text{ mol}$$

De esta manera se obtiene el número de moles de dióxido de carbono a la salida del reactor:  $n_{\text{CO}_2} = 0.15 \text{ mol}$ .

Para determinar el avance de la reacción,  $\xi$ , se debe sustituir  $n_{\text{CO}_2} = 0.2 \text{ mol}$  en la ecuación de balance de moles de  $\text{CO}_2$ :

$$\text{CO}_2: n_{\text{CO}_2} = 1 - \xi$$

$$0.15 \text{ mol} = 1 \text{ mol} - \xi$$

$$\xi = 0.85 \text{ mol}$$

Para determinar los moles finales a la salida del reactor, sustituya los valores del avance de la reacción  $\xi$  en las ecuaciones de balance de los componentes molares.

$$\text{H}_2: n_{\text{H}_2} = 4 \text{ mol} - 4\xi$$

$$n_{\text{H}_2} = 4 \text{ mol} - 4(0.85 \text{ mol}) = 0.6 \text{ mol}$$

$$\text{CH}_4: n_{\text{CH}_4} = 0 \text{ mol} + \xi$$

$$n_{\text{CH}_4} = 0 \text{ mol} + 0.85 \text{ mol} = 0.85 \text{ mol}$$

$$\text{H}_2\text{O}: n_{\text{H}_2\text{O}} = 0 \text{ mol} + 2\xi$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 0 \text{ mol} + 2(0.85 \text{ mol}) = 1.7 \text{ mol}$$

Balance de energía (método de calor de reacción)

El balance de energía se solicita realizar a dos temperaturas de referencia; salida de la corriente de temperatura ( $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y en el calor estándar de temperatura de reacción ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Primero, prepare la siguiente tabla de datos usando la forma polinomial de la capacidad calorífica específica:

$$C_p(\text{kJ/mol } ^\circ\text{C}) = a + bT + cT^2$$

Los valores estándar de formación a 25 °C se presentan en la siguiente tabla tomado del apéndice A, tabla A.1, la capacidad calorífica se calculará con la ecuación algebraica en función de la temperatura, las constantes a, b, y c para d se pueden despreciar ya que el valor será muy pequeño, los valores se toman del apéndice A, tabla A.2 y se presentan en la siguiente tabla.

Comp.	$\gamma_i$	a	b	c	$\Delta \widehat{H}_f^0$
CO <sub>2</sub>	-1	$36.11 \times 10^{-3}$	$4.233 \times 10^{-5}$	$-2.887 \times 10^{-8}$	-393.5
H <sub>2</sub>	-4	$28.48 \times 10^{-3}$	$0.00765 \times 10^{-5}$	$0.3288 \times 10^{-8}$	00.00
H <sub>2</sub> O	2	$33.46 \times 10^{-3}$	$0.688 \times 10^{-5}$	$0.7604 \times 10^{-8}$	-241.83
CH <sub>4</sub>	1	$34.31 \times 10^{-3}$	$5.469 \times 10^{-5}$	$0.3661 \times 10^{-8}$	-74.85
$\Delta$		$-50.24 \times 10^{-3}$	$2.581 \times 10^{-5}$	$3.4587 \times 10^{-8}$	-165.00

El  $\Delta$  en la última fila es la diferencia entre los productos y los reactivos según el coeficiente estequiométrico; por ejemplo, para a el  $\Delta a$  se calcula como

$$\Delta a = \sum \gamma_i a = (-1)(36.11 \times 10^{-3}) + (-4)(28.84 \times 10^{-3}) + (2)(33.46 \times 10^{-3}) + (1)(34.31 \times 10^{-3}) = -50.24 \times 10^{-3}$$

El mismo método se utiliza para calcular los valores de  $\Delta b$ ,  $\Delta c$ , y  $\Delta H_f^0$ .

*Temperatura de referencia = 550 °C*

Se realizará el balance de energía usando el método de calor de reacción a la temperatura de referencia de 550 °C. El balance de energía para este proceso incluye el calor sensible para cambiar la temperatura de la corriente de entrada de 550 °C a 430 °C, la corriente de salida que se encuentra a la misma temperatura de referencia y el calor de reacción a 550 °C multiplicado por el grado de reacción.

$$Q = \xi \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}(T_{\text{ref}}) + H_s - H_e$$

Para múltiples componentes de entrada y salida,

$$Q = \xi \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}} \Big|_{550^\circ\text{C}} + \int_{T_{\text{ref}}}^{T_s} \sum_{\text{salida}} n_i C_{\text{pi}} dT - \int_{T_{\text{ref}}}^{T_e} \sum_{\text{entrada}} n_i^\circ C_{\text{pi}} dT$$

Sustituyendo los límites de integración,

$$Q = \xi \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}} \Big|_{550^\circ\text{C}} + \int_{550}^{550} \sum_{\text{salida}} n_i C_{\text{pi}} dT - \int_{550^\circ\text{C}}^{430\text{C}} \sum_{\text{entrada}} n_i^\circ C_{\text{pi}} dT$$

El calor de reacción a 550 °C se calculará con la ecuación algebraica de la capacidad calorífica, los valores del apéndice ## están tomados a 25 °C y se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}} \Big|_{550^\circ\text{C}} &= \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ + \int_{25^\circ\text{C}}^{550^\circ\text{C}} \Delta C_p dT \\ &= \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^\circ + \int_{25}^{550} (\Delta a + \Delta bT + \Delta cT^2) dT \end{aligned}$$

Los valores para  $\Delta a + \Delta b + \Delta c$  se obtuvieron previamente, y se procederá a sustituir en la ecuación,

$$\begin{aligned} \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}} \Big|_{550^\circ\text{C}} &= -165 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + [(-50.24 \times 10^{-3})(550 - 25) \\ &\quad + \frac{1}{2}(2.581 \times 10^{-5})(550^2 - 25^2) + \frac{1}{3}(3.4587 \times 10^{-8})(550^3 - 25^3)] \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \end{aligned}$$

$$\Delta \widehat{H}_{\text{Rx}} \Big|_{550^\circ\text{C}} = -185.562 \text{ kJ/mol}$$

Ahora se determinará los valores para  $H_e$  y  $H_s$ , para la entrada se tiene una temperatura de 430 °C, para la salida una temperatura de 550 °C y la temperatura de referencia es 550 °C.

$$H_e = \int_{550\text{ °C}}^{430\text{ °C}} \sum_i \dot{n}_i C_{pi} dT = (1) \int_{550}^{430} C_{PCO_2} dT + (4) \int_{550}^{430} C_{PH_2} dT$$

$$H_e = [1(-5.986) + 4(-3.3268)]\text{kJ} = -19.293 \text{ kJ}$$

$$H_s = \int_{550\text{ °C}}^{550\text{ °C}} \sum_i \dot{n}_i C_{pi} dT = 0$$

Los valores calculados se reemplazarán en la fórmula para calcular el calor de reacción,

$$Q = \xi \Delta \widehat{H}_{R_x}(T_{ref}) + H_{out} - H_{in}$$

$$Q = (0.85 \text{ mol})(-185.562 \text{ kJ/mol}) + 0 - (-19.293 \text{ kJ}) = -138.4347 \text{ kJ}$$

*Temperatura de referencia = 25 °C*

Se realizará el balance de energía usando el método de calor de reacción a la temperatura de referencia de 25 °C. El balance de energía para este proceso incluye el calor sensible para cambiar la temperatura de la corriente de entrada de 25 °C a 430 °C, la corriente de salida para los productos de 25 °C a 550 °C y el calor de reacción a 25 °C multiplicado por el grado de reacción.

$$Q = \xi \Delta \widehat{H}_{R_x}(T_{ref}) + H_s - H_e$$

$$Q = \xi \Delta \widehat{H}_{R_x}^o + \int_{25}^{550} \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i C_{pi} dT - \int_{25}^{430} \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i C_{pi} dT$$

El calor de reacción a 25°C se encuentra a partir del término  $\Delta$  en la tabla para los calores de formación encontrada anteriormente. Por tanto, el término de reacción es,

$$\xi \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = (0.85 \text{ mol})(-165 \text{ kJ/mol}) = -140.25 \text{ kJ}$$

La entalpía de la corriente de entrada en relación con la temperatura de referencia a (25°C) se calculará como,

$$\begin{aligned} H_e &= \int_{25^{\circ}\text{C}}^{430^{\circ}\text{C}} \sum_1 n_i^{\circ} C_{pi} dT = (1 \text{ mol}) \int_{25^{\circ}\text{C}}^{430^{\circ}\text{C}} C_{\text{pco}_2} dT \\ &+ (4 \text{ mol}) \int_{25^{\circ}\text{C}}^{400^{\circ}\text{C}} C_{\text{pH}_2} dT = (17.759 + 45.817) \text{kJ} = 63.576 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Por último se calculará el calor del calor sensible para calentar todo en la corriente de salida de 25 °C a 550 °C. El cambio de entalpía de la corriente de salida con respecto a la temperatura de referencia (25 °C) es,

$$\begin{aligned} H_s &= \int_{25^{\circ}\text{C}}^{550^{\circ}\text{C}} \sum_i n_i C_{pi} dT = (0.15 \text{ mol}) \int_{25}^{550} C_{\text{pco}_2} dT + (0.6 \text{ mol}) \int_{25}^{550} C_{\text{pH}_2} dT \\ &+ (0.85 \text{ mol}) \int_{25}^{550} C_{\text{pCH}_4} dT + (1.7 \text{ mol}) \int_{25}^{550} C_{\text{pH}_2\text{O}} dT \end{aligned}$$

Integración de la ecuación anterior después de la sustitución de componentes por calor rendimientos de capacidad

$$H_s = \int_{25}^{550} \sum_i n_i C_{pi} dT = (3.562 + 9.087 + 22.499 + 32.345) \text{kJ} = 67.493 \text{ kJ}$$

Los resultados obtenidos se reemplazará en la ecuación para calcula el calor,

$$Q = \xi \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}(T_{\text{ref}}) + H_s - H_e$$

$$Q = \xi \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} + \sum_{\text{salida}} n_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} n_i^{\circ} \widehat{H}_i$$

$$Q = -140.25 \text{ kJ} + 67.493 \text{ kJ} - 63.576 \text{ kJ} = -136.333 \text{ kJ}$$

Desde el sistema se debe transferir 136.333 kJ.

### *Método del calor de formación*

Para este método no es necesario calcular el calor de reacción, el balance de reacción se escribirá de la siguiente forma:

$$Q = \sum_{\text{salida}} n_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} n_i \widehat{H}_i$$

A continuación, calculamos la entalpía de cada componente en cada flujo en relación con sus elementos. El compuesto se forma a partir de sus elementos a 25 °C (este es el calor de formación), y luego elevamos la temperatura del compuesto hasta la temperatura de la corriente.

La entalpía específica de los compuestos de salida

$$\begin{aligned} \text{CH}_4: \widehat{H}_{\text{CH}_4} &= \Delta \widehat{H}_f^{\circ}(25) + \int_{25}^{550} C_{p,\text{CH}_4} dT = -74.85 + 26.47 \\ &= -48.38 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}: \widehat{H}_{\text{H}_2\text{O}} &= \Delta \widehat{H}_f^{\circ}(25) + \int_{25}^{550} C_{p,\text{H}_2\text{O}} dT = -241.83 + 19.026 \\ &= -222.804 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2: \widehat{H}_{\text{CO}_2} &= \Delta \widehat{H}_f^\circ(25) + \int_{25}^{550} C_{p,\text{CO}_2} dT = -393.5 + 23.746 \\ &= -369.754 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

$$\text{H}_2: \widehat{H}_{\text{H}_2} = \Delta \widehat{H}_f^\circ(25) + \int_{25}^{550} C_{p,\text{H}_2} dT = 0 + 15.145 = 15.145 \text{ kJ/mol}$$

Con los valores calculados se podrá calcular la entalpía específica a la salida del reactor.

$$\begin{aligned} H_s = \sum_{\text{salida}} n_i \widehat{H}_i &= (0.15)(-369.754) + (0.6)(15.145) + (0.85)(-48.38) \\ &\quad + (1.7)(-222.804) = -466.266 \text{ kJ} \end{aligned}$$

La entalpía específica a la entrada de los reactores se calculará de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2: \widehat{H}_{\text{CO}_2} &= \Delta \widehat{H}_f^\circ + \int_{25^\circ\text{C}}^{430^\circ\text{C}} C_{p,\text{CO}_2} dT = -393.5 + 17.759 \\ &= -375.741 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

$$\text{H}_2: \widehat{H}_{\text{H}_2} = \Delta \widehat{H}_f^\circ + \int_{25^\circ\text{C}}^{430^\circ\text{C}} C_{p,\text{H}_2} dT = 0 + 11.628 \text{ kJ/mol} = 11.628 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

La entalpía de la corriente en la entrada del reactor para todos los compuestos que ingresa será:

$$H_e = \sum n_i \widehat{H}_i = (1)(-375.741) + (4)(11.628) = -329.229 \text{ kJ}$$

Finalmente, del balance energético obtenemos

$$Q = H_s - H_e = -466.266 \text{ kJ} - (-329.229 \text{ kJ}) = -137.037 \text{ kJ}$$

### Ejemplo 3.8 Oxidación del Amoniaco

En la petroquímica el amoniaco es un compuesto químico inorgánico muy importante. Es un gas incoloro de olor irritante y muy soluble en agua que puede llegar a formar un medio ligeramente básico. El amoniaco es un refrigerante de mucha importancia y que bajo presión se le puede licuar fácilmente.

La oxidación del amoniaco comercialmente con aire produce ácido nítrico, el proceso se lleva sobre una gasa de alambre de platino y rodio y consta de una secuencia de reacciones las cuales ocurren en presencia de un catalizador heterogéneo como se presenta a continuación:

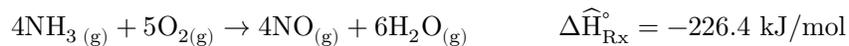


Las tres reacciones presentadas para el proceso de obtención de ácido nítrico son exotérmicas, y las constantes de equilibrio para las dos primeras reacciones caen rápidamente con el aumento de la temperatura. El aumento de la presión favorece la segunda reacción pero afecta negativamente a la primera reacción, debido a esto la operación del proceso se lleva a presiones cercanas a la atmosférica.

Para evitar que la reacción entre el amoniaco y oxígeno en las paredes del reactor la velocidad espacial debe ser alta, caso contrario se produce nitrógeno y agua lo que produce conversiones bajas, la concentración de amoniaco debe mantenerse por debajo del límite de inflamabilidad de la mezcla de gases de alimentación para evitar explosiones Se ha

determinado que para una producción óptima de ácido nítrico las condiciones apropiadas son 900 °C y presión atmosférica.

Si en el proceso de producción de ácido nítrico por oxidación de amoníaco solo se pide analizar la primera reacción para la cual se alimenta a un reactor CSTR de flujo continuo 100 moles/min de amoníaco (NH<sub>3</sub>) y 200 mol/min de oxígeno (O<sub>2</sub>) a 25 °C. Los gases de producto del reactor se encuentran a 900 °C. Determinar a qué velocidad se debe transferir calor hacia o desde el reactor para mantener la temperatura del reactor a 300 °C.



### Solución

Los datos en el enunciado proporcionan los caudales molares de entrada, temperatura de entrada, temperatura de salida. Y se debe hallar el flujo de calor transferido desde o hacia el reactor para lo cual se hará uso de la primera ley de la termodinámica para un sistema abierto. La base es de 100 mol/min de NH<sub>3</sub> y el estado de referencia es 25 °C y 1 atm.

La primera ley de la termodinámica para un sistema abierto se expresa como,

$$Q - W_s = \Delta\dot{H} + \Delta E_k + \Delta E_p$$

En el proceso no se enuncia que exista algún tipo de trabajo de eje en el proceso, no hay partes móviles, no hay cambios en la elevación entre el flujo de entrada y salida, y no hay cambios en la velocidad de los

flujos de entrada y salida, la ecuación de balance de energía general se reduce a

$$Q = \Delta \dot{H}$$

Usando el avance de reacción o el método de calor de reacción el balance se reescribe como:

$$Q = \Delta \dot{H} = \xi \Delta \hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} + \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i \hat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i \hat{H}_i$$

El balance de material para el avance de reacción para cada componente será

$$n_i = n_{i,0} - \gamma_i \xi$$

$$\dot{n}_{\text{NH}_3} = 100 \text{ mol/min} - 4\xi$$

$$\dot{n}_{\text{O}_2} = 200 \text{ mol/min} - 5\xi$$

$$\dot{n}_{\text{NO}} = 0.0 \text{ mol/min} + 4\xi$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.0 \text{ mol/min} + 6\xi$$

Assumiendo que las condiciones de operación son apropiadas la conversión completa del amoníaco será muy alta, se tomará como 1, por tanto no sale amoníaco en la corriente de salida del reactor;

$$(f = 1) \dot{n}_{\text{NH}_3} = 0$$

$$\dot{n}_{\text{NH}_3} = 100 \text{ mol/min} - 4\xi$$

$$0.0 = 100 \text{ mol/min} - 4\xi \Rightarrow \xi = 25 \text{ mol/min}$$

El valor del avance de reacción se sustituirá en la ecuación del balance de materia y dará el siguiente caudal molar de los componentes de la corriente de salida:

$$\dot{n}_{\text{NH}_3} = 100 \text{ mol/min} - 4\xi = 100 \text{ mol/min} - 4(25 \text{ mol/min})$$

$$\dot{n}_{\text{NH}_3} = 0 \text{ mol/min}$$

$$\dot{n}_{\text{O}_2} = 200 \text{ mol/min} - 5\xi = 200 \text{ mol/min} - 5(25 \text{ mol/min})$$

$$\dot{n}_{\text{O}_2} = 75 \text{ mol/min}$$

$$\dot{n}_{\text{NO}} = 0.0 \text{ mol/min} + 4\xi = 4(25 \text{ mol/min})$$

$$\dot{n}_{\text{NO}} = 100 \text{ mol/min}$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.0 \text{ mol/min} + 6\xi = 6(25 \text{ mol/min})$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} = 150 \text{ mol/min}$$

El balance de energía usando el método de calor de reacción con temperatura de referencia a 25°C.

$$Q = \Delta\dot{H} = \dot{\xi}\Delta H_{\text{Rx}}^{\circ} + \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i \hat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i \hat{H}_i$$

Las capacidades caloríficas de los componentes involucrados en el proceso se toma del apéndice A.2 en donde la capacidad calorífica está en  $C_{\text{Pi}}$ (kJ/mol °C).

$$C_{\text{PO}_2} = 29.1 \times 10^{-3} + 1.158 \times 10^{-5}T - 0.6076 \times 10^{-8} T^2$$

$$C_{\text{PNO}} = 29.5 \times 10^{-3} + 0.8188 \times 10^{-5}T - 0.2925 \times 10^{-8} T^2$$

$$C_{\text{PH}_2\text{O}} = 33.46 \times 10^{-3} + 0.688 \times 10^{-5} T + 0.7604 \times 10^{-8} T^2$$

Sustituir valores conocidos:

$$Q = \Delta \dot{H} = 100 \left( -225 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) +$$

$$\left[ 75 \int_{25}^{900} C_{P,O_2} dT + 100 \int_{25}^{900} C_{P,NO} dT + 150 \int_{25}^{900} C_{P,H_2O} dT \right]_{\text{salida}}$$

$$- \left[ 100 \int_{25}^{25} C_{P,NH_3} dT + 200 \int_{25}^{25} C_{P,O_2} dT \right]_{\text{entrada}}$$

El flujo de transferencia de calor se calculará como:

$$Q = \Delta \dot{H} = 100 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \left[ -226.4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$$

$$+ \{ [75(28.67) + 100(28.45) + 150(33.91)] - 0 \} \frac{\text{kJ}}{\text{min}}$$

$$Q = \Delta \dot{H} = -12558.25 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}$$

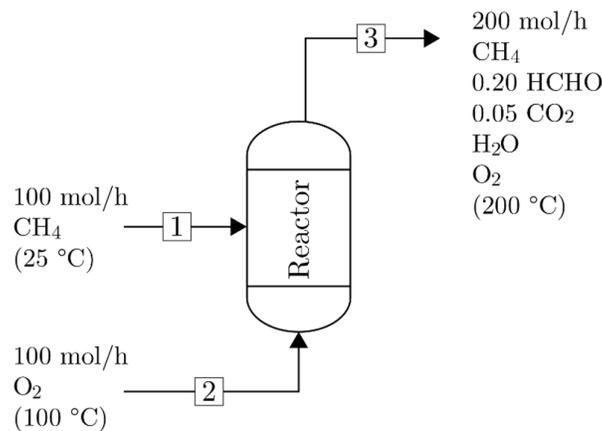
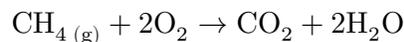
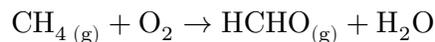
El proceso libera calor con un calor de 12 558.25 kJ/min.

### Ejemplo 3.9 Producción de Formaldehído

El formaldehído es un compuesto químico incoloro y de olor fuerte que es inflamable. En la petroquímica el formaldehído es considerado como el aldehído más simple y reactivo, su polimerización por condensación de formaldehído con fenol, urea o melanina puede generar resinas de urea formaldehído, fenol formaldehído y melanina formaldehído, estas resinas son pegamentos muy importantes que se usan en la producción de tableros de partícula y para madera contrachapada. La condensación de formaldehído con acetaldehído en presencia de un álcali fuerte produce pentaeritritol, un alcohol polihídrico para la producción de resina alquídica.

Debido a la importancia del formaldehído, este se produce en un reactor continuo en una reacción de oxidación del metano con oxígeno puro. Al reactor ingresa una alimentación de metano a un caudal de 100 mol/h y de oxígeno puro a 100 mol/h. la corriente a la salida del reactor continuo es de 200 mol/h y presenta composiciones molares de formaldehído y dióxido de carbono de 0.20 y 0.05 respectivamente. Determinar el flujo de calor que se debe agregar o retirar del reactor para mantener la temperatura del reactor en 200°C.

Las reacciones que se presentan en el reactor son:



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.9.1**

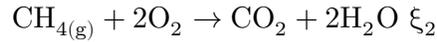
Diagrama de flujo del proceso de oxidación del metano

### Solución

Se hará uso del método de grado de reacción para el balance de materiales y energía teniendo como base 200 mol/h de la corriente de gas de salida.

Balance de materia:

Debido a que se presentan dos reacciones en el proceso, para cada reacción se tendrá un avance de reacción:



Para calcular el avance o grado de reacción de la primera reacción química, seleccione un componente que esté disponible solo en la primera reacción y no en la segunda, se tomará formaldehído en este caso:

$$n_i = n_{i,0} - \gamma \xi$$

$$n_{\text{HCHO}} = n_{\text{CH}_2\text{O}}^0 + \xi_1$$

$$0.2 \times 200 \text{ mol/h} = 0 + \xi_1 \Rightarrow \xi_1 = 40 \text{ mol/h}$$

El alcance de la segunda reacción se obtiene seleccionando un compuesto que solo está disponible solo en la segunda reacción, se tomará el dióxido de carbono:

$$n_i = n_{i,0} - \gamma \xi$$

$$n_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2}^0 + \xi_2$$

$$0.05 \times 200 \text{ mol/h} = 0 + \xi_2 \Rightarrow \xi_2 = 10 \text{ mol/h}$$

Después de determinar el alcance de las dos reacciones, el flujo molar de los demás componentes se puede encontrar fácilmente, si los componentes están presente en las dos reacciones se deberá expresar el balance en función de los dos avances de reacción.

$$n_{\text{CH}_4} = n_{\text{CH}_4}^0 - \xi_1 - \xi_2 = 100 - 40 - 10 = 50 \text{ mol/h}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = n_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} + \xi_1 + 2\xi_2 = 0 + 40 + 2(10) = 60 \text{ mol/h}$$

$$n_{\text{O}_2} = n_{\text{O}_2}^{\circ} - \xi_1 - 2\xi_2 = 100 - 40 - 2(10) = 40 \text{ mol/h}$$

Balace de energía:

El calor estándar de reacción para ambas reacciones se calcula con estado de referencia de 25°C a partir de los calores estándar de formación de la siguiente manera:

El calor estándar de la primera reacción viene dado por  $\Delta\hat{H}_{\text{Rx1}}^{\circ}$ , los estados de agregación para los componentes que no se expresen en la reacción se verificara en el apéndice A, tabla A.1 a la temperatura de 200 °C, por ejemplo, la temperatura de ebullición del agua es 100 °C por tanto a 200 °C se garantiza que estará en estado gas, la entalpía de formación estándar para el oxígeno es cero por tanto no se tomara en cuenta para obtener la entalpía estándar de reacción.

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx1}}^{\circ} = \sum \gamma_i \Delta\hat{H}_{f,i}^{\circ}$$

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx1}}^{\circ} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \Delta\hat{H}_{f,\text{H}_2\text{O}(g)}^{\circ} + \gamma_{\text{CH}_2\text{O}} \Delta\hat{H}_{f,\text{CH}_2\text{O}(g)}^{\circ} + \gamma_{\text{CH}_4} \Delta\hat{H}_{f,\text{CH}_4(g)}^{\circ}$$

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx1}}^{\circ} = (1)(-241.83) + (1)(-115.9) + (-1)(-74.85)$$

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx1}}^{\circ} = -282.88 \text{ kJ/mol}$$

El calor estándar de la segunda reacción, viene dado por:

$$\sum \gamma_i \Delta\hat{H}_{f,i}^{\circ}$$

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx2}}^{\circ} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \Delta\hat{H}_{f,\text{H}_2\text{O}(g)}^{\circ} + \gamma_{\text{CO}_2} \Delta\hat{H}_{f,\text{CO}_2(g)}^{\circ} + \gamma_{\text{CH}_4} \Delta\hat{H}_{f,\text{CH}_4(g)}^{\circ}$$

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx2}}^{\circ} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) = (2)(-241.83) + (1)(-393.5) + (-1)(-74.85)$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}2}^{\circ} = -802.31 \text{ kJ/mol}$$

El balance energético general del reactor teniendo en cuenta que no se enuncia trabajo, sin partes móviles, sin cambios en la elevación, por tanto el trabajo, la energía cinética y potencial, se desprecia:

$$Q - W_s = \Delta\dot{H} + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$Q = \Delta\dot{H}$$

El flujo de cambio de entalpía viene dada por  $\Delta\dot{H}$ ,

$$\Delta\dot{H} = \sum_{\text{reacción}} \dot{\xi}_j \Delta\widehat{H}_{\text{Rx},j}^{\circ} + \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i \widehat{H}_i$$

Las capacidades caloríficas  $C_p$ , (kJ/mol °C) de todos los componentes involucrados en el proceso se toman del apéndice A, tabla A.2.

$$C_{\text{PCH}_4} = 34.31 \times 10^{-3} + 5.469 \times 10^{-5} T + 0.3661 \times 10^{-8} T^2$$

$$C_{\text{PCH}_2\text{O}} = 34.28 \times 10^{-3} + 4.268 \times 10^{-5} T$$

$$C_{\text{PCO}_2} = 36.11 \times 10^{-3} + 4.233 \times 10^{-5} T - 2.887 \times 10^{-8} T^2$$

$$C_{\text{PH}_2\text{O}} = 33.46 \times 10^{-3} + 0.688 \times 10^{-5} T + 0.7604 \times 10^{-8} T^2$$

$$C_{\text{PO}_2} = 29.1 \times 10^{-3} + 1.158 T \times 10^{-5} - 0.6076 \times 10^{-8} T^2$$

Más detalladamente, la ecuación del balance energético es la siguiente:

$$Q = \dot{\xi}_1 \Delta\widehat{H}_{\text{Rx}1}^{\circ} + \dot{\xi}_2 \Delta\widehat{H}_{\text{Rx}2}^{\circ} + \left\{ \dot{n}_{\text{CH}_4} \widehat{H}_{\text{CH}_4} + \dot{n}_{\text{HCHO}} \widehat{H}_{\text{HCHO}} + \dot{n}_{\text{CO}_2} \widehat{H}_{\text{CO}_2} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} \widehat{H}_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{n}_{\text{O}_2} \widehat{H}_{\text{O}_2} \right\}_{\text{salida}} - \left\{ \dot{n}_{\text{CH}_4} \widehat{H}_{\text{CH}_4} + \dot{n}_{\text{O}_2} \widehat{H}_{\text{O}_2} \right\}_{\text{entrada}}$$

Sustituir cantidades conocidas:

$$\begin{aligned}
Q = \Delta \dot{H} = \dot{\xi}_1 H_{R_{x1}}^{\circ} + \dot{\xi}_2 H_{R_{x2}}^{\circ} + & \left\{ 50 \int_{25}^{200} C_{PCH_4} dT \right. \\
& + 40 \int_{25}^{200} C_{PCH_2O(g)} dT + 10 \int_{25}^{200} C_{PCO_2} dT + 60 \int_{25}^{200} C_{PH_2O} dT \\
& \left. + 40 \int_{25}^{200} C_{PO_2} dT \right\} - \left\{ 100 \int_{25}^{25} C_{PCH_4} dT + 100 \int_{25}^{100} C_{PO_2} dT \right\}
\end{aligned}$$

Sustituyendo las expresiones de las capacidades caloríficas e integrando,

$$\begin{aligned}
Q = \{40(-282.88) + 10(-802.31)\} + \{50(7.09) + 40(6.839) \\
+ 10(7.075) \\
+ 60(6.011) + 40(5.304)\} - \{100(0) + 100(2.235)\} = -18502.33 \text{ kJ/h}
\end{aligned}$$

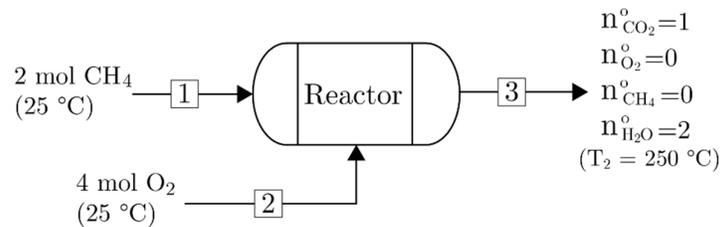
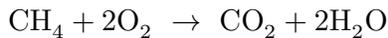
### Ejemplo 3.10 Combustión de Metano

El metano es el alcano más simple, es un gas más ligero que el aire además de ser incoloro e inodoro y se constituye como el principal componente de la mayoría de los gases naturales, el gas no asociado tiene una proporción mayor de metano que los gases asociados. En el procesamiento de petróleo crudo el metano es un subproducto que se puede encontrar en todas las corrientes gaseosas.

El metano es un compuesto no muy reactivo. En condiciones normales no reacciona con ácidos o bases, bajo condiciones específicas puede reaccionar con oxígeno y cloro. El metano es utilizado como un gas combustible limpio, además de ser una fuente importante para obtener el negro de carbono que es utilizado en la fabricación de varios

productos para hacerlos más fuertes, color más intenso y duraderos, por ejemplo en los cauchos en neumáticos.

En un reactor CSTR de flujo continuo se alimenta metano y oxígeno en proporciones estequiométricas a 25 °C y 1 atm, el efluente del reactor se encuentra a 250 °C. Para una conversión completa determinar el flujo de calor que se transfieren desde o hacia el reactor cuando se ingresa 2 moles por segundo de metano, establezca un balance de energía utilizando el enfoque de balance de elementos. La reacción de combustión del metano es la siguiente:



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.10.1**

Diagrama de flujo del proceso de reacción en fase gaseosa

### Solución

Primero se calculará la entalpía a las condiciones que a las que se encuentran las corrientes para cada compuesto individual en dependencia con los elementos a 25 °C.

Debido a que la conversión es completa y la alimentación al reactor es en proporciones estequiométricas, el flujo molar a la salida para el metano y oxígeno es cero. Por la estequiometría de la reacción para 2 mol/s de dióxido de carbono se reaccionara con 4 mol/s de oxígeno y se obtendrá 2 mol/s de dióxido de carbono y 4 mol/s de agua.

El Para un mejor entendimiento de los valores de flujos y entalpías para las corrientes del reactor se presenta la siguiente tabla:

Especies	$\dot{n}_{\text{entrada}}$	$\widehat{H}_{\text{entrada}}$	$\dot{n}_{\text{salida}}$	$\widehat{H}_{\text{salida}}$
CH <sub>4</sub>	2	$\widehat{H}_{\text{CH}_4}(T_1)$	0	–
O <sub>2</sub>	4	$\widehat{H}_{\text{O}_2}(T_2)$	0	–
CO <sub>2</sub>	0	–	2	$\widehat{H}_{\text{CO}_2}(T_3)$
H <sub>2</sub> O	0	–	4	$\widehat{H}_{\text{H}_2\text{O}}(T_3)$

Del apéndice A, tabla A.1, se obtienen los calores de formación siguientes:

$$\Delta\widehat{H}_{\text{f,CH}_4}^{\circ} = -74.85 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{f,CO}_2}^{\circ} = -393.5 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{f,H}_2\text{O}}^{\circ} = -241.83 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{f,O}_2}^{\circ} = 0 \text{ kJ/mol}$$

Debido a que en la salida la temperatura es diferente a la temperatura de referencia del apéndice A, tabla A.2 las capacidades caloríficas a presión constante son:

$$\begin{aligned} C_{\text{PCO}_2} & (\text{kJ/mol } ^{\circ}\text{C}) \\ & = 36.11 \times 10^{-3} + 4.233 \times 10^{-5} T - 2.887 \times 10^{-8} T^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{pH}_2\text{O}} & (\text{kJ/mol } ^{\circ}\text{C}) \\ & = 33.46 \times 10^{-3} + 0.688 \times 10^{-5} T + 0.7604 \times 10^{-8} T^2 \end{aligned}$$

Los  $C_p$  para el metano y el oxígeno no es necesario ya que la temperatura de la corriente es la misma que la de referencia por tanto al integrar será el resultado cero.

La ecuación de balance energético general es

$$Q = \sum_{\text{Salida, } 200^\circ\text{C}} \dot{n}_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{Entrada, } 25^\circ\text{C}} \dot{n}_i \widehat{H}_i$$

$$Q = [\dot{n}_{\text{CO}_2} \widehat{H}_{\text{CO}_2} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} \widehat{H}_{\text{H}_2\text{O}}]_s - [\dot{n}_{\text{CH}_4} \widehat{H}_{\text{CH}_4} + \dot{n}_{\text{O}_2} \widehat{H}_{\text{O}_2}]_e$$

La entalpía molar específica en la corriente de entrada para el metano a temperatura  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  es:

$$\widehat{H}_{\text{CH}_4} = \Delta \widehat{H}_{f,\text{CH}_4}^\circ + \int_{25^\circ\text{C}}^{25^\circ\text{C}} C_{p\text{CH}_4} dT$$

$$\widehat{H}_{\text{CH}_4} = -74.85 \text{ kJ/mol} + 0 = -74.85 \text{ kJ/mol}$$

La entalpía molar específica del oxígeno en la corriente de entrada a temperatura  $T_2 = 25^\circ\text{C}$  es:

$$\widehat{H}_{\text{O}_2} = \Delta \widehat{H}_{f,\text{O}_2}^\circ + \int_{25^\circ\text{C}}^{25^\circ\text{C}} C_{p\text{O}_2} dT = 0 + 0 = 0$$

Las entalpías molares específicas de las corrientes de salida a temperatura  $T_3 = 200^\circ\text{C}$

$$\widehat{H}_{\text{CO}_2} = \Delta \widehat{H}_{f,\text{CO}_2}^\circ + \int_{25^\circ\text{C}}^{250^\circ\text{C}} C_{p\text{CO}_2} dT$$

$$\widehat{H}_{\text{CO}_2} = -393.5 + 9.284 = -384.216 \text{ kJ/mol}$$

$$\widehat{H}_{\text{H}_2\text{O}} = \Delta\widehat{H}_{\text{f,H}_2\text{O}}^{\circ} + \int_{25^{\circ}\text{C}}^{250^{\circ}\text{C}} C_{\text{P}_{\text{H}_2\text{O}}} dT$$

$$\widehat{H}_{\text{H}_2\text{O}} = -241.83 + 7.781 = -234.049 \text{ kJ/mol}$$

Con los valores de entalpías calculados se reemplazarán en la ecuación del balance de energía.

$$Q = \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i \widehat{H}_i$$

$$Q = [\dot{n}_{\text{CO}_2} \widehat{H}_{\text{CO}_2} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} \widehat{H}_{\text{H}_2\text{O}}]_s - [\dot{n}_{\text{CH}_4} \widehat{H}_{\text{CH}_4} + \dot{n}_{\text{O}_2} \widehat{H}_{\text{O}_2}]_e$$

$$Q = \{[2(-384.216) + 4(-234.049)] - [2(-74.85) + 4(0)]\} \text{ kJ/s}$$

$$Q = -1554.928 \text{ kJ/s}$$

### 3.4.1 Temperatura Desconocida de Salida del Proceso

Otro problema que se presenta cuando se realizan balances de energía, es el cálculo de la temperatura de salida, cuando se indican las condiciones en las corrientes con el calor de la entrada o la salida del reactor. Para resolver estos problemas se necesita que las entalpías se determinen en términos de la temperatura desconocida a la salida. Los valores obtenidos de las entalpías se reemplazan en la ecuación de balance de energía general y se resuelven para la temperatura de salida.

#### Ejemplo 3.11 Producción de Acetaldehído

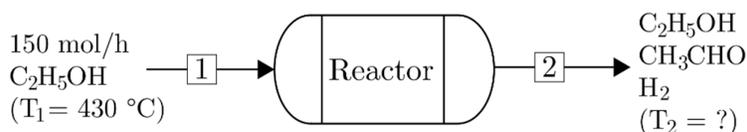
El acetaldehído es un líquido incoloro con un olor penetrante. No tiene un uso directo, excepto para sintetizar otros compuestos. Es usado para producir 2-etilhexanol para sintetizar plastificantes, también se usa en

la producción de pentaeritriol que es un compuesto polihídrico que se usa en resinas alquídicas.

Existen muchas formas para producir acetaldehído. Desde hace mucho tiempo se producía por oxidación de etileno catalizada con plata o cromo, también se produce por deshidrogenación de etanol con catalizador de cobre activado. En el presente, el acetaldehído es obtenido del etileno mediante el uso de un catalizador homogéneo, este catalizador permite que la reacción se dé a temperaturas más bajas en comparación con la oxidación deshidrogenación de etanol.

En un reactor adiabático de flujo continuo se introduce una corriente de alimentación con 150 moles por hora a 430 °C para llevar a cabo la deshidrogenación del etanol para formar acetaldehído. La conversión del reactor es del 25%. Las capacidades caloríficas promedio del gas de C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, CH<sub>3</sub>CHO y H<sub>2</sub>, son 0.078, 0.096 y 0.029 (kJ/mol °C), respectivamente. Determinar la temperatura de la corriente a la salida del reactor.

La reacción de deshidrogenación del etanol en fase gaseosa es:



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.11.1**

Proceso de deshidratación de etanol, sistema de reactor

### Solución

Al no conocer la temperatura de salida se deberá establecer un balance simultáneo de material y energía.

Primero se realizará el balance de materia usando el avance del método de reacción,

$$n_i = n_{i,0} - \gamma\xi$$

$$n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 150 \text{ mol/h} - \xi$$

$$n_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 0 \text{ mol/h} + \xi$$

$$n_{\text{H}_2} = 0 \text{ mol/h} + \xi$$

La conversión del metano lograda es del 45%, aplicando la fórmula para determinar la conversión y con el flujo molar inicial se puede determinar el flujo de metanol a la salida.

$$f = \frac{n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}^0 - n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}}{n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}^0}$$

$$0.25 = \frac{150 \text{ mol/h} - n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}}{150 \text{ mol/h}} \implies n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 112.5 \text{ mol/h}$$

Ahora q se conoce el flujo de etanol a la salida se puede calcular el valor para el avance de reacción.

$$n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 150 \text{ mol/h} - \xi$$

$$82.5 \text{ mol/h} = 150 \text{ mol/h} - \xi \implies \xi = 67.5 \text{ mol/h}$$

Sustituya el grado de reacción en las ecuaciones de balance de materiales para obtener los siguientes resultados:

$$n_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 0 + \xi = 67.5 \text{ mol/h}$$

$$n_{\text{H}_2} = 0 + \xi = 67.5 \text{ mol/h}$$

Ahora se deberá realizar el balance de energía tomando como referencia la temperatura de 25 °C utilizando el enfoque del calor de reacción, la ecuación general del balance de energía es 25 °C.

$$\Delta\dot{H} = \xi\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} + \sum_{\text{salida}} n_i\hat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} n_i\hat{H}_i$$

El calor estándar de reacción se calcula a partir de los calores de formación de la siguiente manera:

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = \sum \gamma_i\Delta\hat{H}_{f,i}^{\circ}$$

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = \gamma_{\text{H}_2}\Delta\hat{H}_{f,\text{H}_2}^{\circ} + \gamma_{\text{CH}_3\text{CHO}}\Delta\hat{H}_{f,\text{CH}_3\text{CHO}}^{\circ} + \gamma_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}\Delta\hat{H}_{f,\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}^{\circ}$$

Los valores para el calor de formación de cada compuesto se obtiene del apéndice A, tabla A.1.

$$\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = (1)(0) + (1)(-166.2) + (-1)(-235.31) = 69.11 \text{ kJ/mol}$$

Debido a que el sistema es abierto, y el proceso adiabático, sin cambios en la energía potencial y cinética, el balance energético se expresa de la siguiente forma:

$$Q = \Delta\dot{H} = 0$$

El cambio de entalpía es función del calor de reacción y del calor sensible y se expresa como:

$$\Delta\dot{H} = \xi\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} + \sum_{\text{salida}} n_i\hat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} n_i\hat{H}_i$$

$$0 = \xi\Delta\hat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} + \left\{ n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}\hat{H}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} + n_{\text{CH}_3\text{CHO}}\hat{H}_{\text{CH}_3\text{CHO}} + n_{\text{H}_2}\hat{H}_{\text{H}_2} \right\}_{s, T_2=?} - \left\{ n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}h_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} \right\}_{e, 430^{\circ}\text{C}}$$

Sustituyendo entalpías molares específicas en términos de capacidades caloríficas,

$$0 = \xi \Delta H_{\text{Rx}}^{\circ} + \left\{ n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} \int_{25}^{T_2} C_{\text{PC}_2\text{H}_5\text{OH}} dT + n_{\text{CH}_3\text{CHO}} \int_{25}^{T_2} C_{\text{PCH}_3\text{CHO}} dT + n_{\text{H}_2} \int_{25}^{T_2} C_{\text{PH}_2} dT \right\} - \left\{ n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} \int_{25^{\circ}\text{C}}^{400^{\circ}\text{C}} C_{\text{PC}_2\text{H}_5\text{OH}} dT \right\}$$

Sustituya los valores de los caudales molares de los componentes de entrada y salida y las capacidades caloríficas de cada componente:

$$\begin{aligned} 0 = & \left( 37.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \left( 69.11 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) + \left\{ \left( 112.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \left( 0.078 \frac{\text{kJ}}{\text{mol } ^{\circ}\text{C}} \right) (T_2 - 25) \right. \\ & + \left( 37.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \left( 0.096 \frac{\text{kJ}}{\text{mol } ^{\circ}\text{C}} \right) (T_2 - 25 \text{ } ^{\circ}\text{C}) \\ & + \left. \left( 37.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \left( 0.029 \frac{\text{kJ}}{\text{mol } ^{\circ}\text{C}} \right) (T_2 - 25 \text{ } ^{\circ}\text{C}) \right\} \\ & - \left\{ \left( 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) \left( 0.078 \frac{\text{kJ}}{\text{mol } ^{\circ}\text{C}} \right) (400 - 25) \text{ } ^{\circ}\text{C} \right\} \end{aligned}$$

Reordenando y tomando como factor común,  $(T_2 - 25)$

$$0 = 2591.625 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + (T_2 - 25^{\circ}\text{C}) \{ 8.775 + 3.6 + 1.0875 \} \frac{\text{kJ}}{\text{h } ^{\circ}\text{C}} - 4387.5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

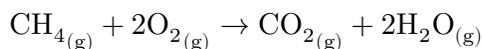
Despejando la temperatura a la salida  $T_2$  se obtendrá:

$$T_2 = \frac{1795.875 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{13.4625 \frac{\text{kJ}}{\text{h } ^{\circ}\text{C}}} + 25 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 158.398 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

### 3.5 Procesos de Combustión

La combustión o quema, es una reacción química exotérmica entre un combustible y un oxidante, acompañado de la producción de calor y la conversión de especies

químicas. Por ejemplo, la combustión completa del metano viene dada por la siguiente reacción:



Como producto se obtiene dióxido de carbono y vapor de agua, con una entalpía estándar de reacción a 25 °C y 1 atm de -242 kJ/mol, en esta reacción es casi imposible lograr una combustión completa. Al transcurrir una reacción de combustión real y llegue al equilibrio, se presentará una amplia variedad de especies principales y secundarias, como el monóxido de carbono. El oxígeno total de entrada para la reacción es la suma del oxígeno teórico y el oxígeno en exceso. La ecuación para el porcentaje de aire en exceso es la siguiente:

$$\% \text{ exceso de aire} = \frac{(\text{moles de aire})_{\text{alimentado}} - (\text{moles de aire})_{\text{teórico}}}{(\text{moles de aire})_{\text{teórico}}}$$

El oxígeno teórico es la cantidad calculada de oxígeno que se necesita para oxidar un compuesto a sus productos finales. En la reacción de oxidación del metano, se requieren 2 moles de oxígeno para oxidar 1 mol de metano. Para 50 mol del oxígeno teórico se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Demanda teórica de oxígeno} = 50 \text{ mol CH}_4 \times \frac{2 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CH}_4} = 100 \text{ mol O}_2$$

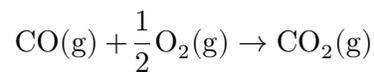
Si el oxígeno alimentado al reactor es una cantidad mayor que el oxígeno teórico, entonces se dice que el oxígeno está en exceso el porcentaje de oxígeno en exceso se determina como:

$$\% \text{ O}_{2,\text{exceso}} = \frac{(\text{moles de O}_2)_{\text{alimentado}} - (\text{moles de O}_2)_{\text{teórico}}}{(\text{moles de O}_2)_{\text{teórico}}}$$

### Ejemplo 3.12 Combustión de Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono (CO) a 10 °C se quema completamente a 1 atm de presión con un 50% de aire en exceso que se alimenta a un quemador a una temperatura de 540 °C. Los productos de la combustión salen de la cámara del quemador a una temperatura de 425 °C. Dados 100 mol/h de monóxido de carbono, calcule el calor desprendido del quemador.

En el quemador tiene lugar la siguiente reacción:



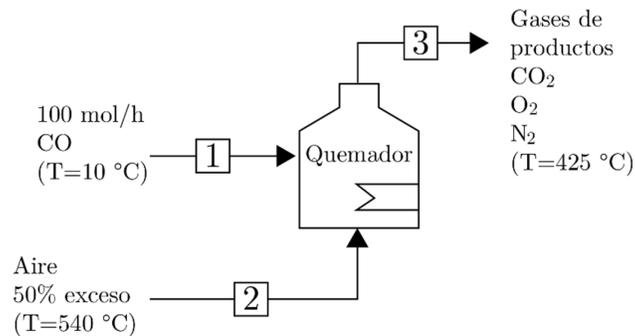
#### Solución

Primero se deberá realizar el balance de materia y el balance de energía.

Balance de materia

Calcular el oxígeno teórico que se necesitará para quemar 100 mol/h de CO

$$\text{O}_{2,\text{teórico}} = 100 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \text{CO} \left( \frac{0.5 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CO}} \right) = 50 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \text{O}_2$$



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.12.1**

Esquema de la combustión de monóxido de carbono

El oxígeno total de entrada es la suma del oxígeno teórico y el oxígeno en exceso. Para el exceso de aire, el oxígeno total de entrada es el oxígeno teórico más el exceso de oxígeno: 50%

$$\dot{n}_{\text{O}_2}^{\circ} = \left(50 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \text{O}_2\right) + 0.5 \left(50 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \text{O}_2\right) = 75 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \text{O}_2$$

El nitrógeno es inerte y el nitrógeno total de entrada es el número de moles de nitrógeno en el aire asociado con los 75 mol/h de oxígeno.

$$\dot{n}_{\text{N}_2}^{\circ} = \frac{79}{21} \times \text{oxígeno total de entrada} = \frac{79}{21} \left(75 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) = 282 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \text{N}_2$$

Dado que la reacción es completa, no sale monóxido de carbono del reactor debido a que todo se quema. El balance molar de monóxido de carbono (CO) se calcula utilizando el método del grado de reacción:

$$n_{\text{CO}} = n_{\text{CO}}^0 - \xi$$

$$0 = 100 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \xi \implies \xi = 100 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balance molar de componentes

$$n_{\text{CO}_2} = 0 + \xi = 100 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$n_{\text{O}_2} = n_{\text{O}_2}^{\circ} - 0.5\xi = 75 - 0.5 \times 100 = 25 \text{ mol/h}$$

El nitrógeno es un gas inerte y no participa en la reacción. En consecuencia, el número de moles de entrada es igual al número de moles de salida:

$$\dot{n}_{\text{N}_2} = 282 \text{ mol/h}$$

Balance de energía a temperatura de referencia 25°C, el calor estándar de reacción se calcula como

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = \Delta\widehat{H}_{\text{f,CO}_2}^{\circ} - \Delta\widehat{H}_{\text{f,CO}}^{\circ} - \frac{1}{2}\Delta\widehat{H}_{\text{f,O}_2}^{\circ}$$

$$\Delta\widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} = -393.5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - \left(-110.52 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) - 0 = -282.98 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Las capacidades caloríficas en función de la temperatura de los componentes involucrados en el proceso son

$$C_{\text{PO}_2} = 29.1 \times 10^{-3} + 1.158 \times 10^{-5} T - 0.6076 \times 10^{-8} T^2$$

$$C_{\text{PN}_2} = 29 \times 10^{-3} + 0.2199 \times 10^{-5} T - 0.5723 \times 10^{-8} T^2$$

$$C_{\text{PCO}} = 28.95 \times 10^{-3} + 0.411 \times 10^{-5} T - 0.3548 \times 10^{-8} T^2$$

$$C_{\text{PCO}_2} = 36.11 \times 10^{-3} + 4.233 \times 10^{-5} T - 2.887 \times 10^{-8} T^2$$

Entalpías de los componentes de entrada:

Las entalpías de los componentes de entrada se definen a partir de las siguientes expresiones. La integración es de la temperatura de referencia a la temperatura de entrada.

La entalpía molar específica de oxígeno se obtiene de la siguiente manera:

$$\widehat{H}_e(\text{O}_2) = \int_{25^{\circ}\text{C}}^{540^{\circ}\text{C}} C_{\text{PO}_2} dT = 15.49 \text{ kJ/mol}$$

La entalpía de entrada específica de nitrógeno se calcula como sigue:

$$\widehat{H}_e(\text{N}_2) = \int_{25^\circ\text{C}}^{540^\circ\text{C}} C_{p\text{N}_2} dT = 15.49 \text{ kJ/mol}$$

La entalpía de entrada específica de monóxido de carbono se obtiene de la siguiente manera:

$$\widehat{H}_e(\text{CO}) = \int_{25^\circ\text{C}}^{10^\circ\text{C}} C_{p\text{CO}} dT = -0.4353 \text{ kJ/mol}$$

Las entalpías de los componentes de salida se definen a partir de las siguientes expresiones. La integración es de la temperatura de referencia a la temperatura de salida:

$$\widehat{H}_s(\text{O}_2) = \int_{25^\circ\text{C}}^{425^\circ\text{C}} C_{p\text{O}_2} dT = 12.54 \text{ kJ/mol}$$

$$\widehat{H}_s(\text{N}_2) = \int_{25^\circ\text{C}}^{425^\circ\text{C}} C_{p\text{N}_2} dT = 11.92 \text{ kJ/mol}$$

$$\widehat{H}_s(\text{CO}_2) = \int_{25^\circ\text{C}}^{425^\circ\text{C}} C_{p\text{CO}_2} dT = 17.58 \text{ kJ/mol}$$

El resumen de las entalpías calculadas se muestra en la siguiente tabla:

Compuesto i	$\dot{n}_{i,e}$ mol/h	$\widehat{H}_{i,e}$ kJ/mol	$\dot{n}_{i,s}$ mol/h	$\widehat{H}_{i,s}$ kJ/mol
O <sub>2</sub>	75	16.38	25	12.54
N <sub>2</sub>	282	15.46	282	11.92
CO	100	-0.44	0	—
CO <sub>2</sub>	0	—	100	17.58

El calor extraído del quemador, viene dado por Q,

$$Q = \Delta H = \xi \Delta \widehat{H}_r + \sum_{\text{salida}} n_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} n_i \widehat{H}_i$$

Sustituyendo los moles de la entrada y salida multiplicado por las entalpías específicas de las corrientes de entrada y salida, respectivamente, de la tabla en la ecuación anterior, se obtiene el calor liberado por el quemador:

$$Q = \xi \times \Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ} + \left\{ \dot{n}_{\text{O}_2} \widehat{H}_{\text{O}_2} + \dot{n}_{\text{N}_2} \widehat{H}_{\text{N}_2} + \dot{n}_{\text{CO}_2} \widehat{H}_{\text{CO}_2} \right\}_{\text{salida}} - \left\{ \dot{n}_{\text{O}_2} \widehat{H}_{\text{O}_2} + \dot{n}_{\text{N}_2} \widehat{H}_{\text{N}_2} + \dot{n}_{\text{CO}} \widehat{H}_{\text{CO}} \right\}_{\text{entrada}}$$

Entalpías específicas de componentes sustitutos:

$$Q = 100 \times (-282.98 \text{ kJ/mol}) + \{25(12.54) + 282(11.92) + 100(17.58)\} - \{75(16.38) + 282(15.49) + 100(-0.44)\}$$

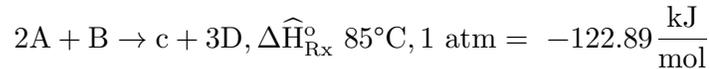
El calor perdido del reactor es

$$Q = -28417.74 \text{ kJ/h} = -7.9 \text{ kW}$$

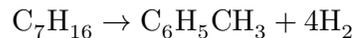
El signo negativo indica que se libera calor del proceso.

### Ejercicios propuestos

- 3.1 Utilice  $\Delta \widehat{H}_f^{\circ}$  para calcular  $\Delta \widehat{H}_{\text{Rx}}^{\circ}$  para la reacción:  
 $\text{C}_4\text{H}_{10}(\text{g}) + 6.5\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{CO}_2(\text{g}) + 5\text{H}_2\text{O}(\text{l})$
- 3.2 Para la siguiente reacción si se obtiene 122 mol/h de producto D cual es el valor del flujo entálpico:

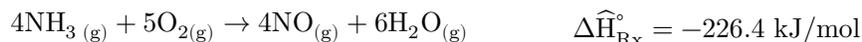


- 3.3 En un reacción continua en fase vapor a 400 °C el n-heptano se deshidrocicliza a tolueno como se muestra en la reacción. Haciendo uso del apéndice A, tabla A.1 determinar el calor estándar de reacción usando calores de combustión y de formación.

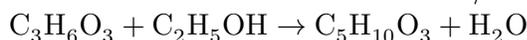


- 3.4 En la combustión completa del butano se obtiene 298 mol/h de  $\text{CO}_2$ , el sistema opera a 25°C y 1 atm y en la corriente de alimentación no hay presencia de  $\text{CO}_2$ . Calcular el Flujo o la tasa estándar del cambio de entalpía.  $2\text{C}_4\text{H}_{10}(\text{g}) + 13\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 8\text{CO}_2(\text{g}) + 10\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

- 3.5 En la siguiente secuencia de reacciones, determinar la reacción global y haciendo uso de la ley de Hess calcular el calor estándar de reacción global.



- 3.6 Para la reacción de descomposición térmica del éter dimetílico determinar el calor estándar de reacción utilizando calores estándar de formación
- 3.7 En la reacción en fase líquida del ácido láctico con etanol para producir lactato de etilo y agua a 25 °C, determinar el calor estándar de formación del lactato de etilo si el calor de reacción es -32.7 kJ/mol.

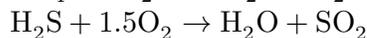
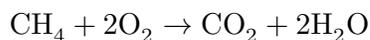


El calor de formación de ácido láctico es -687 kJ/mol.

- 3.8 Se produce vapor sobrecalentado a 35 bar y 360 °C a partir de agua líquida a 35 bar y 55 °C en una caldera de metano. Para asegurar la combustión completa del metano, se proporciona un 10% de aire en exceso. Tanto el metano como el aire de combustión entran en la caldera a 25 °C. Determine la temperatura de salida del gas de combustión de la caldera, si se producen 20.15 kg/min de vapor sobrecalentado a partir de la combustión de 1.4 kg/min de metano. Suponga que la caldera está perfectamente aislada.
- 3.9 Se quema monóxido de carbono con aire en exceso a 1.5 atm en un reactor adiabático. Los reactivos se alimentan a 25°C y la temperatura final es de 1560°C.
- Calcular el porcentaje de aire en exceso alimentado al reactor.
  - Si se incrementa el porcentaje de aire en exceso ¿Cómo se modifica la temperatura de flama adiabática?
- 3.10 Al metano se quema con 45% de aire en exceso en un reactor adiabático de flujo continuo. El metano ingresa al reactor a 300 K y 1.6 atmósferas a una velocidad de 6.3 L/s y a la entrada el aire se encuentra a 346 K y 1.3 atm. Si la combustión es completa y el gas de producto sale a 1.09 atm. Determinar la temperatura y los grados de sobrecalentamiento del en la corriente de salida del reactor.
- 3.11 La corriente de gas natural contiene 85% en moles de metano y el resto H<sub>2</sub>S. La corriente de entrada tiene un flujo molar de 120 mol/min y 25 °C. Se suministra agua por un lado de la carcasa de la cámara de combustión para mantener la temperatura de la corriente de salida de la cámara de combustión a 25 °C. Si se usa un 50% de aire en exceso para la combustión,

¿cuál es la tasa de flujo molar de los gases que salen del proceso de combustión y cuál es el calor liberado por la cámara de combustión?

La corriente se quema completamente donde tienen lugar las siguientes dos reacciones:



- 3.12 El propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) ingresa a una cámara de combustión a  $190\text{ }^\circ\text{C}$  con un flujo molar de  $100\text{ mol/h}$ . El gas se mezcla y quema con un 50% de exceso de aire que ingresa a la cámara de combustión a  $190\text{ }^\circ\text{C}$ . Un análisis de los gases de combustión revela que el 85% del carbón propano se quema a  $\text{CO}_2$ , y el 15% restante forma  $\text{CO}$ , si la temperatura de salida de los gases de combustión es de  $190\text{ }^\circ\text{C}$ . Los calores específicos promedio de propano, oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua son  $73,5$ ,  $29,4$ ,  $37,4$ ,  $28,6$  y  $34,7\text{ J/mol K}$ , respectivamente. Los calores estándar de formación de propano, dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua son  $-103,85$ ,  $-393,51$ ,  $-110,52$  y  $-241,86\text{ kJ/mol}$ , respectivamente. Determine la tasa de transferencia de calor de la cámara de combustión.
- 3.13 EN un análisis de gas natural se determina que está compuesto por 89.35 v/v de metano, 6% etano, 2.3% propano y 2,35% de nitrógeno. Determinar los valores superiores e inferiores del calentamiento del combustible en  $\text{kJ/mol}$  utilizando los calores de combustión de la tabla A.1 del apéndice A.

## Referencias

- Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Mass and Energy Balances: Basic Principles for Calculation, Design, and Optimization of Macro/Nano Systems*. <http://www.springer.com/series/1161>
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos* (G. Noriega (ed.)). Limusa S.A. de C.V.
- Ghasem, N., & Henda, R. (2012). Principles of chemical engineering processes. In *Principles of Chemical Engineering Processes*. <https://doi.org/10.1201/b17696>
- Himmelblau David. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (Sexta). University of Texas.
- Matar, S., & Hatch, Lewis F. (1995). Chemistry of petrochemical processes. In *World Pumps* (Vol. 1995, Issue 345). <https://doi.org/10.1016/s0262->

1762(99)81158-4

Murphy, R. M. (2007). *Introducción a los procesos químicos: principios, análisis y síntesis*. (2da ed.). McGraw-Hill.

# 4

## Balances Simultáneos de Material y Energía

En la industria química y petroquímica los balances de materia y energía son de gran importancia, porque permiten controlar los procesos y mejorar el rendimiento de los productos. En el capítulo anterior se resolvió primero el balance de materia y esos resultados se utilizaron para desarrollar el balance de energía, sin embargo existen procesos en donde los balances de materia y energía dependen el uno del otro y no se pueden resolver por separado. En el presente capítulo se enfoca como resolver este tipo de problemas.

### Objetivos de aprendizaje

1. Comprender las definiciones básicas necesarias para resolver problemas de balance de materia y energía como son, la conversión, rendimiento, grado de reacción y calor estándar de reacción.
2. Entender los balances de energía para sistemas con reacción química.
3. Aplicar los balances de materia y energía para resolver problemas de ingeniería química y petroquímica.

### 4.1 Balances de Materia

Al resolver problemas de balance de materiales y energía que involucran reacciones químicas, es necesario comprender algunas definiciones de uso común. Dado que estas definiciones incluyen conversión, rendimiento, selectividad y grado de reacción, se explican brevemente en la siguiente sección.

La ecuación general de balance de materiales tiene la forma:

$$\text{Acumulación} = (\text{Entrada} - \text{Salida}) + (\text{Generación} - \text{Consumo})$$

#### 4.1.1 Conversión

Generalmente, la síntesis de sustancias químicas no implica una sola reacción, sino que involucra múltiples reacciones. Como consecuencia, se busca maximizar la obtención del producto deseado y minimizar los subproductos no deseados. La tasa de conversión es la relación molar añadida al reactor. Para la sustancia (i), la tasa de conversión fraccional se puede calcular utilizando la siguiente ecuación: conversión fraccional del componente i.

$$f_i = \frac{(\text{moles del componente } i)_{\text{entrada}} - (\text{moles del componente } i)_{\text{salida}}}{(\text{moles del componente } i)_{\text{entrada}}} \quad (4.1)$$

$$f_i = \frac{n_{i,0} - n_i}{n_{i,0}} \quad (4.2)$$

donde  $(n_{i,0})$  representa los moles iniciales a la entrada y  $(n_i)$  representa los moles finales a la salida.

#### 4.1.2 Rendimiento

El rendimiento de la reacción es la relación entre el producto deseado formado (en moles) y la cantidad total que se puede producir si el reactivo limitante se convierte completamente y no se producen reacciones secundarias.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\dot{n}_D}{\dot{n}_C} \quad (4.3)$$

donde

$\dot{n}_D$  son moles del producto deseado que se forman

$\dot{n}_C$  son los moles convertidos totalmente ( $f=1$ ) para el reactivo limitante, sin presencia de reacciones secundarias.

### 4.1.3 Selectividad

La selectividad de una reacción es la relación entre el producto deseado formado (en moles) y el producto no deseado formado (en moles):

$$\text{Selectividad} = \frac{\text{moles producidos del producto deseado}}{\text{moles producidos de productos no deseado}} \quad (4.4)$$

### 4.1.4 Alcance de la Reacción( $\xi$ )

El concepto de alcance o avance de la reacción también se puede aplicar a múltiples reacciones, en la que para cada reacción se tiene su propio alcance de reacción. El alcance de reacción es la cantidad de moles (o velocidad de flujo molar) convertidos en una reacción dada. Si un conjunto de reacciones tiene lugar en un reactor discontinuo o continuo en estado estacionario, podemos escribir  $\xi$ .

$$n_i = n_{i0} + \sum_j \gamma_{ij} \xi_j \quad (4.5)$$

donde

$\gamma_{ij}$  es el coeficiente estequiométrico de la sustancia en reacción  $ij$

$\xi_j$  es el grado de reacción por reacción  $j$

$n_{i0}$  es el caudal molar de entrada del componente  $i$

Para una sola reacción, la ecuación anterior se reduce a la siguiente ecuación:

$$\dot{n}_i = \dot{n}_{i0} + \gamma_i \dot{\xi} \quad (4.6)$$

## 4.2 Balances de Energía

La ecuación de balance de energía general para un sistema abierto en estado estacionario es la siguiente:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta \dot{H} + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (4.7)$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \dot{m} (v_2^2 - v_1^2) \quad (4.8)$$

$$\Delta E_p = \dot{m} g (z_2 - z_1) \quad (4.9)$$

#### 4.2.1 Método de Calor de Reacción

En este método, el estado de referencia para los reactivos y productos están a 25 °C y 1 atm (condiciones estándar).

$$\Delta \dot{H} = \sum_{\text{reacciones}} \dot{\xi}_j \Delta \widehat{H}_{\text{Rx},j}^0 + \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i \widehat{H}_i \quad (4.10)$$

$$\widehat{H}_i = \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p_i} dT \quad (4.11)$$

$$\Delta \widehat{H}_{\text{Rx},j}^0 = \sum_i^n \gamma_i \Delta \widehat{H}_{f,i}^0 \quad (4.12)$$

#### 4.2.2 Método de Calor de Formación

En este método, el estado de referencia es la especie elemental que constituye los reactivos y productos en los estados en que se encuentran en la naturaleza a 25 °C y 1 atm:

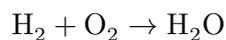
$$\Delta \dot{H} = \sum_{\text{salida}} \dot{n}_i \widehat{H}_i - \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_i \widehat{H}_i \quad (4.13)$$

La entalpía en este caso entrada incluye el calor sensible y la entalpía de formación:

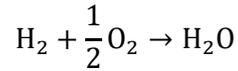
$$\Delta \dot{H}_i|_T = \Delta \widehat{H}_i^0 + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p_i} dT \quad (4.14)$$

#### 4.2.3 Concepto de Equilibrio Atómico

Considere la reacción del hidrógeno con el oxígeno para formar agua:



Podemos intentar hacer nuestros cálculos con esta reacción, sin embargo, esta ecuación no está balanceada, lo que implica que en los productos falte un átomo de oxígeno en la reacción, esto en general es imposible. Por tanto, se compensa de la siguiente forma:



El número de átomos de cualquier elemento dado no cambia en ninguna reacción (asumiendo que no es una reacción nuclear).

#### 4.2.4 Formulación Matemática del Equilibrio Atómico

La ecuación del balance de balance general es:

$$(\text{entrada} - \text{Salida}) + (\text{Generación} - \text{Consumo}) = \text{Acumulación} \quad (4.15)$$

Los moles de átomos de cualquier elemento se conservan, por lo tanto, la generación y consumo será cero. Así que tenemos el siguiente balance sobre un elemento A dado:

$$\sum \dot{n}_{A,\text{entrada}} - \sum \dot{n}_{A,\text{salida}} = 0 \quad (4.16)$$

Al analizar un sistema reactivo, se debe optar por el balance atómico o el balance de especies moleculares, pero no puede elegir ambos al mismo tiempo. El equilibrio atómico generalmente produce una resolución matemática más simple, pero no proporcionará el alcance de la reacción, tampoco se puede llegar a conocer si es realmente imposible alcanzar las especificaciones del sistema para un conjunto dado de reacciones de equilibrio.

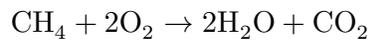
#### 4.2.5 Análisis de Grados de Libertad para el Equilibrio Atómico

Los grados de libertad, se determinan por la diferencia entre el número de incógnitas y el número de ecuaciones. Sin embargo, en estos balances se debe considerar que, al realizar los balances atómicos, el grado de reacción no cuenta

como desconocido, mientras que con un balance de especies moleculares sí es una incógnita, ésta es la principal ventaja de este método. El alcance de la reacción no importa, porque no importa cuánto avance la reacción, los átomos del elemento se conservan. En el balance atómico, solo se incluyen sustancias reactivas y no inertes.

#### **Ejemplo 4.1 Quemador de Gas Natural**

Suponga que tiene una mezcla de gases que contiene óxido nitroso, oxígeno y metano. El gas natural se quema. En él se produce la siguiente reacción química. ¿Cuántas ecuaciones de equilibrio atómico se podrá formular?



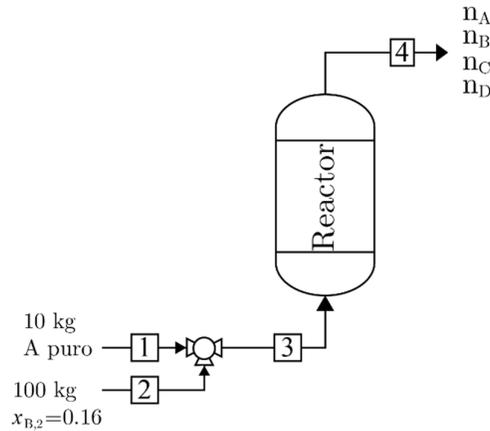
#### **Solución**

Se puede formular cuatro ecuaciones: tres balances atómicos (C, H y O) y un balance molecular para el óxido nitroso (inerte y no involucrado en la reacción). Los moles de óxido nitroso no se incluyen en el balance atómico del oxígeno.

#### **Ejemplo 4.2 Reacciones de Equilibrio**

Se agrega una cantidad de 15 kg de un compuesto A a 150 kg de solución acuosa de B que se encuentra al 15% en peso, con una densidad del 0.91 kg/L. A tiene un peso molecular de 27 kg/kmol y B tiene un peso molecular de 45 kg/kmol. Si la constante de equilibrio, K, para esta reacción es 200 a 300 K. Si se adiciona 15 kg de A a la solución, el volumen aumenta a 9 L. ¿cuánto se podrá obtener del compuesto C?

La reacción que se da es la siguiente:  $A + B \rightleftharpoons C + D$



**FIGURA DEL EJEMPLO 4.1.1**

Esquema de un reactor de equilibrio

### Solución

Dado que todas las especies están disueltas en agua, debemos escribir la constante de equilibrio en términos de molaridades (mol/L):

$$K = 200 = \frac{C_C C_D}{C_A C_B}$$

El número de moles de A que tenemos inicialmente es

$$n_{A0} = 10 \text{ kg A} \times \frac{1 \text{ kmol}}{25 \text{ kg}} = 0.4 \text{ kmol}$$

El número de moles que tenemos inicialmente para B es

$$n_{B0} = 100 \text{ kg solución} \times \frac{0.16 \text{ kg B}}{\text{kg solución}} \frac{1 \text{ kmol}}{47 \text{ kg}} = 0.34 \text{ kmol}$$

Ahora, el volumen contribuido por la solución B de 100 Kg al 16% es

$$V_B = \frac{m}{\rho} = \frac{100 \text{ kg}}{0.90 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 111 \text{ L}$$

Después de agregar al volumen, el nuevo volumen se 9 LA

$$V_{\text{alimentado}} = 111 + 9 \text{ L} = 120 \text{ L}$$

No hay C o D en la solución inicialmente:

$$C_{C,0} = C_{D,0} = 0$$

Reemplazando todos los valores conocidos en la ecuación de equilibrio para líquidos, se obtiene la siguiente ecuación:

$$200 = \frac{\left(\frac{\xi}{120}\right) \left(\frac{\xi}{120}\right)}{\left(\frac{0.40 - \xi}{120}\right) \left(\frac{0.34 - \xi}{120}\right)}$$

Simplificando,

$$200 = \frac{\xi^2}{(0.40 - \xi)(0.34 - \xi)}$$

Reorganizando,

$$200(0.40 - \xi)(0.34 - \xi) = \xi^2$$

$$27.2 - 148\xi + 200\xi^2 = \xi^2$$

$$27.2 - 148\xi + 199\xi^2 = 0$$

$$\xi = 0.411\text{kmol}$$

$$n_C = \xi = 0.411\text{kmol}$$

Se puede producir un total de componentes mediante esta reacción. 411 molC

#### 4.2.6 Implementación del Reciclaje en el Proceso de Separación

El reciclaje puede aumentar completamente la tasa de conversión de la reacción y se puede lograr una conversión económica sin la necesidad de un segundo reactor. El reciclaje reduce la cantidad de residuos que genera la empresa. Esta no solo es la forma más respetuosa con el medio ambiente, sino que también ahorra los costes de eliminación de la empresa. Mediante el reciclaje, se pueden recuperar catalizadores y reactivos costosos. Los catalizadores no son baratos y si no intentamos recuperarlos en el reactor, pueden perderse en la corriente de

producto. Esto no solo nos trae productos contaminados, sino que también desperdicia muchos catalizadores.

### Ejemplo 10.3 Separación de Mezcla Líquida Binaria

La corriente de alimentación fresca (100 kg / h) contiene fracciones de masa iguales de A y B que se unen a una corriente de reciclaje y se alimentan a un separador. La corriente de producto superior del separador contiene 60% de A y 50% de B que se alimenta al separador y no la corriente de alimentación fresca. El sistema de reciclaje se configura en el que la mitad de la corriente de producto del fondo del separador se recicla y se recombina con la alimentación fresca. Calcule las composiciones de A en todas las corrientes.

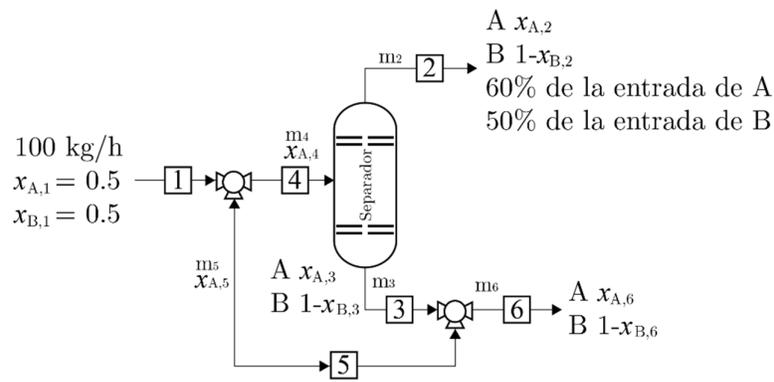


FIGURA DEL EJEMPLO 4.3.1

Esquema de un reactor de equilibrio

### Solución

El número de grados de libertad (NDF) de cada proceso:

	Mezclador	Separador	Divisor	General
Número de incógnitas	4	6	6	4
Número de ecuaciones independientes	2	2	1	2
Número de relaciones auxiliares	0	2	1	0
GDL	2	2	4	2

Dado que ninguna de las unidades obtuvo cero grados de libertad, por el contrario, todo el proceso se puede resolver porque el número de ecuaciones independientes más relaciones auxiliares es igual al número total de incógnitas (10 incógnitas) en el proceso:  $(7 + 3)$

Sistema: general

Balance de masa global:

$$100 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \dot{m}_2 + \dot{m}_6$$

Balance de masa global en A:

$$50 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \dot{m}_2 \times x_{A,2} + \dot{m}_6 \times x_{A,6}$$

Tenemos cuatro incógnitas y dos ecuaciones en este punto. Primero, combine esta información con la relación de división y la composición constante en el divisor.

Relación de división:  $\dot{m}_6 = \frac{\dot{m}_3}{2}$

Composición constante:  $x_{A,6} = x_{A,3}$

Conectando estos en los saldos generales, tenemos

$$100 = \dot{m}_2 + \frac{\dot{m}_3}{2}$$

Balance de componentes (A):

$$50 = x_{A,2} \dot{m}_2 + x_{A,3} \frac{\dot{m}_3}{2}$$

Si el 60% de A que ingresa al separador va a la corriente 2, entonces el 40% de A que entra al separador va a la corriente 3 y luego

$$x_{A,2}\dot{m}_2 = 0.6x_{A,4}\dot{m}_4$$

$$x_{A,3}\dot{m}_3 = 0.4x_{A,m}\dot{m}_4$$

Si de B que entra en el separador va a la corriente 2, entonces de B que entra en el separador va a la corriente 3, y luego 50% 50%

$$(1 - x_{A,2})\dot{m}_2 = 0.5(1 - x_{A,4})\dot{m}_4$$

$$(1 - x_{A,3})\dot{m}_3 = 0.5(1 - x_{A,4})\dot{m}_4$$

Conectando todos estos a los saldos existentes, finalmente obtenemos dos ecuaciones en dos incógnitas:

Sistema: general

Saldos de componentes:

$$50 = 0.6x_{A,A}\dot{m}_4 + \frac{0.4}{2}x_{A,4}\dot{m}_4 \Rightarrow x_{A,4}\dot{m}_4 = 62.5$$

$$50 = 0.5(1 - x_{A,4})\dot{m}_4 + \frac{0.5}{2}(1 - x_{A,4})\dot{m}_4 \Rightarrow 50 = 0.75\dot{m}_4 - 0.75x_{A,4}\dot{m}_4$$

Sustituya en la ecuación de balance de componentes B:  $x_{A,4}\dot{m}_4 = 62.5$

$$50 = 0.75\dot{m}_4 - 0.75(62.5)$$

Resolver estas ecuaciones da

$$\dot{m}_4 = 129.17 \frac{\text{kg}}{\text{h}}, \quad x_{A,4} = 0.484$$

Sistema: mezclador

Balance total

$$100 + \dot{m}_5 = \dot{m}_4 = 129.17 \Rightarrow \dot{m}_5 = 29.17 \text{ kg/h}$$

Sistema: divisor

La corriente de reciclaje es la mitad de la corriente de producto del fondo del separador. ( $\dot{m}_5$ )

$$(\dot{m}_3): \dot{m}_3 = 2\dot{m}_5 = 2 \times 29.17 = 58.34 \text{ kg/h}$$

Sistema: general

$$100 = \dot{m}_2 + 29.165 \Rightarrow \dot{m}_2 = 70.835 \text{ kg/h}$$

Relaciones:

$$x_{A,2}\dot{m}_2 = 0.6x_{A,A}\dot{m}_4$$

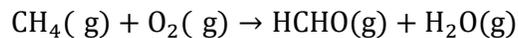
$$x_{A,2} \times 70.835 = 0.6 \times 0.484 \times 129.17 \Rightarrow x_{A,2} = 0.530$$

$$x_{A,3}\dot{m}_3 = 0.4x_{A,4}\dot{m}_4$$

$$x_{A,3} \times 58.34 = 0.4 \times 0.484 \times 129.17 \Rightarrow x_{A,3} = 0.429$$

#### Ejemplo 4.4 Oxidación de Metano

El metano y el oxígeno se alimentan a 25 °C un reactor continuo en cantidades estequiométricas de acuerdo con la siguiente reacción para producir formaldehído: 25°C



En una reacción secundaria, el metano se oxida a dióxido de carbono y agua:



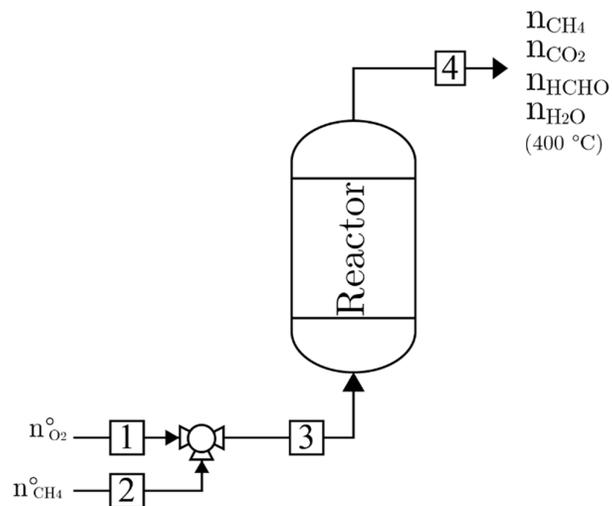
Los gases producto emergen a 400 °C, y el número de moles de CO<sub>2</sub> en los gases efluentes es 0.15, y no queda ningún resto en la corriente de gases efluentes. Determine la composición del gas efluente por mol de

$\text{CH}_4$  alimentado al reactor. Determine la cantidad de calor extraído del reactor por mol de  $\text{CH}_4$  alimentado al reactor.

### Solución

**Cantidades conocidas:** Composición y caudal molar del componente de entrada.

**Encontrar:** La cantidad de calor extraído del reactor por mol de  $\text{CH}_4$  alimentado al reactor.



#### EJEMPLO DE LA FIGURA 4.4.1

Diagrama esquemático del proceso de oxidación del metano

Balance de materiales

El balance de materiales utilizando el método de extensión de la reacción viene dado por

$$n_{\text{CH}_4} = 1 - \xi_1 - \xi_2$$

No queda nada de  $\text{O}_2$ :

$$\begin{aligned}n_{\text{O}_2} = 0 &= 1 - \xi_1 - 2\xi_2 \\n_{\text{HCHO}} &= \xi_1\end{aligned}$$

El número de moles de  $\text{CO}_2$  en la corriente efluente es 0.15 mol

$$n_{\text{CO}_2} = \xi_2 = 0.15$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \xi_1 + 2\xi_2$$

Por lo tanto, y sustituyendo en la ecuación anterior y resolviendo, obtenemos valores de sustitución de  $\xi_1$  y  $\xi_2$  en las ecuaciones de balance de moles:

$$1 - \xi_1 - 2\xi_2 = 0 \quad n_{\text{CO}_2} = \xi_2 = 0.15 \quad \xi_2 = 0.15 \xi_1 \quad \xi_1 = 0.7 \quad \xi_2 = 0.15 \xi_1 = 0.105$$

$$\dot{n}_{\text{CH}_4} = 0.15 \text{ mol/s}, \dot{n}_{\text{HCHO}} = 0.7 \text{ mol/s}, \dot{n}_{\text{CO}_2} = 0.15 \text{ mol/s}$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ mol/s}$$

La cantidad de calor extraído del reactor por mol de alimentación al reactor. Las capacidades caloríficas se toman de valores tabulados en función de la temperatura.  $\text{CH}_4$

Balance de energía

Temperatura de referencia =  $25^\circ\text{C}$

Los calores estándar de reacción para ambas reacciones se calculan a partir de los calores estándar de formación.

Los calores de formación son:

$$\Delta H_{f,\text{CH}_4}^0 = -74.85 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,\text{O}_2}^0 = 0$$

$$\Delta H_{f,\text{HCHO}} = -115.9 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}}^0 = -241.83 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,\text{CO}_2}^0 = -393.5 \text{ kJ/mol}$$

Los valores estándar de reacción son

$$\Delta H_{\text{Rx},1}^0 = \Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}}^0(\text{g}) + \Delta H_{f,\text{HCHO}}^0(\text{g}) - \Delta H_{f,\text{CH}_4}^0(\text{g}) - \Delta H_{t,\text{O}_2}^0(\text{g})$$

$$\Delta H_{\text{Rx},1}^0 = -115.9 - 241.83 - (-74.85) - (0) = -282.88 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_{\text{Rx},2}^0 = 2\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}}^0(\text{g}) + \Delta H_{f,\text{CO}_2}^0(\text{g}) - \Delta H_{t,\text{CH}_4}^0(\text{g}) - 2\Delta H_{f,\text{O}_2}^0(\text{g})$$

$$\Delta H_{\text{Rx},2}^0 = 2(-241.83) + (-393.5) - (-74.85) - 2(0) = -802.31 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

El calor sensible se calcula utilizando calor específico:

$$C_P \left( \frac{\text{J}}{\text{mol}^\circ\text{C}} \right) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

El calor específico se puede encontrar en la Tabla A.3:

$$\text{HCHO: } a = 34.28, b = 4.268 \times 10^{-2}, c = 0.0, d = -8694 \times 10^{-9}$$

$$\text{CH}_4: a = 34.31, b = 5.469 \times 10^{-2}, c = 0.3661 \times 10^{-5}, d = -11 \times 10^{-9}$$

$$\text{CO}_2: a = 36.11, b = 4.233 \times 10^{-2}, c = -2.887 \times 10^{-5}, d = 7.464 \times 10^{-9}$$

$$\text{H}_2\text{O: } a = 33.46, b = 0.688 \times 10^{-2}, c = 0.7604 \times 10^{-5}, d = -3.593 \times 10^{-9}$$

A continuación, se muestra el cálculo de las entalpías de las corrientes de entrada y salida en relación con la temperatura de referencia (es decir, 25 °C).

Entalpía de los componentes de la corriente de salida:

$$\begin{aligned}\widehat{H}_{\text{HCHO}} &= \int_{25}^{400} C_p dT = \int (34.28 + 4.268 \times 10^{-2} T + 0 T^2 - 8694 \times 10^{-9} T^3) dT \\ \widehat{H}_{\text{HCHO}} &= \int_{25}^{400} C_p dT = \left[ 34.28T + 4.268 \times 10^{-2} \frac{T^2}{2} - 3(8694 \times 10^{-9}) \frac{T^4}{4} \right]_{25}^{400} \\ \widehat{H}_{\text{HCHO}} &= \frac{\text{kJ}}{1000 \text{ J}} \left[ 34.28(400 - 25) + 4.268 \times 10^{-2} \frac{(400^2 - 25^2)}{2} \right. \\ &\quad \left. - 8694 \times 10^{-9} \times \frac{(400^4 - 25^4)}{4} \right]\end{aligned}$$

Tenga en cuenta que los resultados son  $(400^2 - 25^2) \neq (400 - 25)^2$

$$\widehat{H}_{\text{HCHO}} = 16.2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}, \widehat{H}_{\text{CH}_4} = 17.23 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}, \widehat{H}_{\text{CO}_2} = 16.35 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}},$$

$$\widehat{H}_{\text{HCHO}} = 13.23 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

La ecuación de balance energético general es:

$$\dot{Q} = \sum_s \dot{n}_i \widehat{H}_i - \sum_e \dot{n}_i \widehat{H}_i + \xi_1 \Delta H_{\text{rx},1}^0 + \xi_2 \Delta H_{\text{rx},2}^0$$

Sustituyendo cantidades conocidas,

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \left\{ \dot{n}_{\text{CH}_4} (\widehat{H}_{\text{CH}_4}) + \dot{n}_{\text{CO}_2} (\widehat{H}_{\text{CO}_2}) + \dot{n}_{\text{HCHO}} (\widehat{H}_{\text{HCHO}}) + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} (\widehat{H}_{\text{H}_2\text{O}}) \right\}_{400^\circ\text{C}} \\ &\quad - \left\{ \dot{n}_{\text{CH}_4} (\widehat{H}_{\text{CH}_4}) + \dot{n}_{\text{O}_2} (\widehat{H}_{\text{O}_2}) \right\}_{25^\circ\text{C}} + \xi_1 \Delta H_{\text{Rx},1}^0 + \xi_2 \Delta H_{\text{Rx},2}^0\end{aligned}$$

La entalpía de los componentes de la corriente de entrada es cero porque la temperatura de entrada está a la temperatura de referencia; por lo tanto, la entalpía de los componentes de entrada en relación con la temperatura de referencia de es cero:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \{0.15(17.23) + 0.15(16.35) + 0.7(16.2) + 1(13.23)\}_s - \{0 + 0\}_e \\ &\quad + 0.7(-282.88) + 0.15(-802.31)\end{aligned}$$

$$\dot{Q} = -288.76 \text{ kJ/s}$$

Balance atómico de H:

$$2 \times 66 \text{ molH}_2 = \left( n_4 \text{ molCH}_3\text{OH} \frac{4 \text{ molH}}{\text{molCH}_3\text{OH}} \right) + \left( (1 - 0.13 - y_{\text{CO},7}) \frac{2 \text{ molH}}{\text{molH}_2\text{O}} \times 23 \right)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene

$$n_4 = 31 - 23 \times y_{\text{CO},7}$$

$$132 = (31 - 23y_{\text{CO},7}) \times 4 + 40.02 - 46y_{\text{CO},7}$$

$$-32.02 = -138 \times y_{\text{CO},7}$$

$$y_{\text{CO},7} = 0.23$$

$$y_{\text{H}_2,7} = 0.87 - 0.23 = 0.64 \frac{\text{molH}_2}{\text{mol}}$$

$$n_4 = 25.71 \text{ molCH}_3\text{OH}$$

$$\text{Conversión general} = \frac{31 \text{ mol} - 0.23 \times 23}{31} = 0.83$$

En general, se logra la conversión de 83% CO

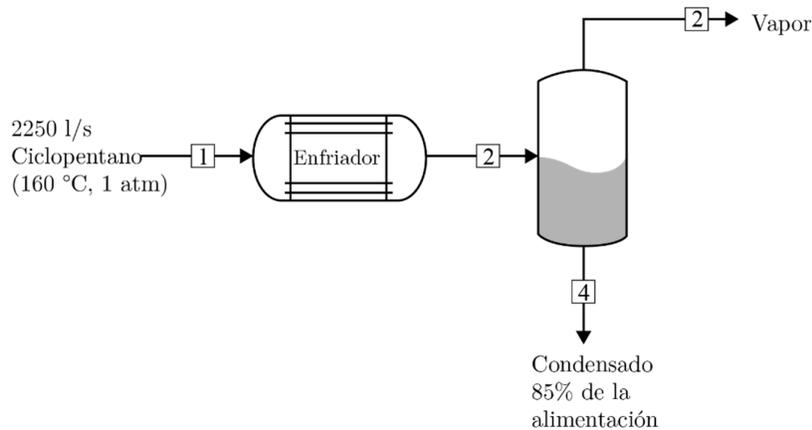
#### **Ejemplo 4.5 Condensación Parcial**

El ciclopentano es un hidrocarburo altamente inflamable, usado en la producción de resinas y adhesivos de caucho. En su estado gaseoso, el vapor de ciclopentano tiene la capacidad de expandirse debido a la alta presión que posee, lo cual es aprovechado para la fabricación de espumas aislantes de poliuretano. Un proceso de enfriamiento condensa el 85% de un flujo de 2250 L/s de vapor de ciclopentano que se encuentra a 160 °C y 1 atmósfera de presión. Determine la

temperatura a cual las corrientes salen del enfriador y el balance total de energía del proceso.

### Solución

Es conveniente considerar que el flujo de vapor de ciclopentano que ingresa al proceso de condensación debe ser llevado a su estado líquido. El ciclopentano tiene una temperatura de ebullición de  $49.3^{\circ}\text{C}$  a 1 atm, es decir, a estas condiciones la fase líquida y gas del  $\text{C}_5\text{H}_{10}$  coexisten, por lo tanto, este valor puede ser tomado como la temperatura de referencia para la fase líquida del compuesto.



**FIGURA DEL EJEMPLO 4.5.1**

Condensación parcial del ciclopentano

A partir del flujo que ingresa al enfriador es posible determinar el número de moles en la fase vapor inicial, asumiendo un comportamiento ideal.

$$\dot{n} = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

$$\dot{n}_e = \frac{1 \text{ atm} \times 2250 \frac{\text{L}}{\text{s}}}{0.08206 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}} \times (160 + 273.15) \text{ K}} = 63.32 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Para determinar la entalpía molar específica del ciclopentano se consideran las temperaturas de entrada del flujo de vapor a 160 °C y la temperatura de referencia de 49.3 °C para la fase líquida, como se presenta en la siguiente expresión:

$$\widehat{H}_e = \Delta\widehat{H}_{\text{vap}} + \int_{49.3\text{ °C}}^{160\text{ °C}} C_{p,v} dT$$

Para encontrar la capacidad calorífica ( $C_{p,v}$ ) del  $C_5H_{10}$  en fase vapor. La  $C_{p,v}$  también debe ser expresada en función de la temperatura, como se muestra a continuación:

$$C_{p,v} \left( \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right) = 73.39 + 0.3928 T - 2.554 \times 10^{-4} T^2$$

Entonces, la entalpía específica del flujo molar del ciclopentano en fase es:

$$\Delta\widehat{H}_v = \int_{49.3\text{ °C}}^{160\text{ °C}} 73.39 + 0.3928 T - 2.554 \times 10^{-4} T^2 dT$$

$$\Delta\widehat{H}_v = \left[ 73.39 T + \frac{0.3928}{2} T^2 - \frac{2.554 \times 10^{-4}}{3} T^3 \right]_{49.3}^{160}$$

$$\Delta\widehat{H}_v = 12336.26 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta\widehat{H}_v = 12336.26 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \times \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} = 12.34 \text{ kJ}$$

Con ayuda del Apéndice A, Tabla A.1 se puede determinar la entalpía de vaporización del ciclopentano a la temperatura de ebullición de 49.3 °C y 1 atm de presión.

$$\widehat{H}_s = \Delta\widehat{H}_{\text{vap}} = 27.3 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Al sustituir el valor tabulado en la expresión de entalpía de vaporización de entrada, se obtiene:

$$\widehat{H}_e = \Delta\widehat{H}_{\text{vap}} + \int_{49.3\text{ }^{\circ}\text{C}}^{160\text{ }^{\circ}\text{C}} C_{p,v} dT$$

$$\widehat{H}_e = 27.3 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 12.34 \text{ kJ} = 39.64 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Para calcular la energía total del proceso, es necesario determinar el flujo molar de salida del proceso considerando el porcentaje de condensación. A la salida del proceso se obtienen dos corrientes de fase líquido y vapor.

$$\dot{n}_s = \dot{n}_{s_v} + \dot{n}_{s_l}$$

$$\dot{n}_{s_v} = \dot{n}_e - (\dot{n}_e \times x_{\text{cond}})$$

$$\dot{n}_{s_v} = 63.32 \frac{\text{mol}}{\text{s}} - \left( 63.32 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \times 0.85 \right) = 9.5 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$\dot{n}_{s_l} = \dot{n}_e - \dot{n}_{s_v}$$

$$\dot{n}_{s_l} = 63.32 \frac{\text{mol}}{\text{s}} - 9.5 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 53.82 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Resumen de los valores determinados de entalpías y flujos molares del ciclopentano en fase líquido y vapor a la entrada y salida del enfriador.

Compuesto	$\dot{n}_e$ (mol/s)	$\widehat{H}_e$ (kJ/mol)	$\dot{n}_s$ (mol/s)	$\widehat{H}_s$ (kJ/mol)
$\text{C}_5\text{H}_{10}$ (v)	63.32	39.64	9.5	27.3
$\text{C}_5\text{H}_{10}$ (l)	-	-	53.82	-

Balance de energía total

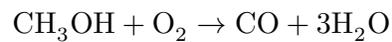
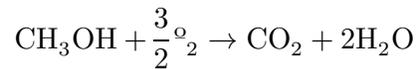
$$Q = \sum_s \dot{n}_s \times \widehat{H}_s - \sum_e \dot{n}_e \times \widehat{H}_e$$

$$Q = \left( 9.5 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right) \left( 27.3 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) - \left( 63.32 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right) \left( 39.64 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right)$$

$$Q = -2250.65 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

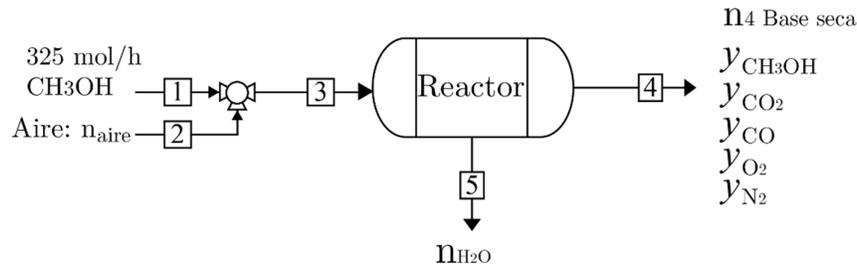
### Ejemplo 4.6 Combustión del Metanol

El metanol es un potencial sustituto de la gasolina comercial. El proceso de combustión del metanol se desarrolla por dos reacciones y suele producirse en motores debido a su aplicación como combustible.



Un estudio analizó los porcentajes molares de los gases producidos a la salida del motor, obteniendo valores en base seca de:  $\text{CH}_3\text{OH} = 0.95\%$ ,  $\text{CO}_2 = 8.03\%$  y  $\text{CO} = 2.81\%$ . La velocidad de flujo de alimentación de metanol al motor de combustión es de 325 mol/h con aire en exceso. Determine la cantidad de agua que llega a producirse, la conversión fraccional de metanol y que porcentaje de aire en exceso es alimentado al proceso para que se produzca la combustión.

Solución



**FIGURA DEL EJEMPLO 4.6**

Combustión de metanol

*Balance atómico*

Balance para el C

$$\dot{n}_1 = (0.0095 + 0.0803 + 0.0281) \dot{n}_{\text{base seca}}$$

$$\dot{n}_4 = \dot{n}_{\text{base seca}} = \frac{325 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{0.1169} = 2780.15 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balance para el H

$$325 \frac{\text{mol CH}_3\text{OH}}{\text{h}} \times \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} = 2\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} + 0.0095 \text{ mol CH}_3\text{OH} \times \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}}$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} = 649.98 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\text{Moles de salida total} = \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{n}_{\text{base seca}}$$

$$\text{Moles de salida total} = 649.98 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 2780.15 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 3430.13 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Una vez calculado el flujo molar total a la salida, es posible determinar la fracción de agua en el producto y la conversión del metanol.

$$\text{Fracción de agua en el producto} = \frac{649.98 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{3430.13 \frac{\text{mol}}{\text{h}}} = 0.189$$

$$\text{Conversión del CH}_3\text{OH} = \frac{\dot{n}_1 - y_{\text{CH}_3\text{OH}} \times \dot{n}_4}{\dot{n}_1}$$

$$\text{Conversión del CH}_3\text{OH} = \frac{325 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 0.0095 \times 2780.15 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{325 \frac{\text{mol}}{\text{h}}} = 0.919$$

Para calcular la cantidad de aire en exceso que ingresa al motor, se realiza el balance atómico considerando que está compuesto por 21 % de oxígeno y la diferencia de nitrógeno.

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_{\text{aire}}$$

Balance para el O

$$2(0.21 \times \dot{n}_{\text{aire}}) + 325 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.0095 + 2(0.0803) + 0.0281 + 2 y_{\text{O}_2})$$

$$\times 2780.15 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 649.98 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \quad (\text{i})$$

Balance para el N

$$2(0.79 \times \dot{n}_{\text{aire}}) = 2(1 - 0.0095 - 0.0803 - 0.0281 - y_{\text{O}_2}) \\ \times 2780.15 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \quad (\text{ii})$$

Al resolver las ecuaciones (i) y (ii), se obtienen los siguientes valores:

$$\dot{n}_{\text{aire}} = 2935.67 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \\ y_{\text{O}_2} = 0.048$$

Además es posible determinar también la fracción de nitrógeno en exceso

$$y_{\text{N}_2} = 1 - 0.0095 - 0.0803 - 0.0281 - y_{\text{O}_2} \\ y_{\text{N}_2} = 1 - 0.0095 - 0.0803 - 0.0281 - 0.048 = 0.834$$

Determinar el porcentaje teórico del oxígeno

$$\text{Oxígeno Teórico} = 325 \frac{\text{mol CH}_3\text{OH}}{\text{h}} \times \frac{\frac{3}{2} \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} = 487.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \\ = \dot{n}_{\text{O}_2}$$

$$\text{Aire teórico} = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2}}{0.21} = \frac{487.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{0.21} = 2321.43 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\text{Aire en exceso (\%)} = \frac{\dot{n}_{\text{aire}} - \text{aire teórico}}{\text{aire teórico}}$$

$$\text{Aire en exceso (\%)} = \frac{2935.67 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 2321.43 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{2321.43 \frac{\text{mol}}{\text{h}}} \times 100 = 26.45$$

### Ejercicios Propuestos

- 4.1 Se utiliza una olla adiabática para enfriar y condensar 10 kg de etanol caliente (150 °C, 1,2 atm) mezclándolo con etanol frío (5 °C, 1,2 atm). Si el producto final de etanol debe estar a 25 ° C y 1,2 atm, la capacidad

- calorífica del etanol líquido y vapor es 112 y 65,6 J/mol °C. El punto de ebullición del etanol es 78,3 °C. El calor latente de vaporización del etanol es 36.600 J/mol. ¿Cuánto etanol frío (kg) se debe agregar?
- 4.2 La deshidrogenación del propano se realiza en un reactor continuo. Se alimenta propano puro al reactor a 1300 ° C y a una velocidad de 100 mol / s. El calor se suministra a una tasa de 1,34 kW. Si la temperatura del producto es de 1000 ° C, calcule el grado de reacción.
- 4.3 Un gas contiene los siguientes compuestos: CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O y H<sub>2</sub>. ¿Cuál es el número máximo de reacciones químicas independientes que se pueden escribir con estos compuestos?
- 4.4 Una corriente de alimentación fresca contiene un 5% de inerte (propano) y un 95% de propileno. La nueva alimentación de propileno e inerte (propano) se mezcla con 210 mol / h de dióxido de carbono y la misma cantidad de hidrógeno. En las condiciones de su reactor, el propano (I) es inerte y es demasiado caro separar el propano del propileno, por lo que decide instalar una corriente de purga. La conversión de propileno en un solo paso en el reactor es 0,3. La tasa de producción de butanol es de 180 kmol / h. Se puede lograr una conversión general de 0,90. La corriente de purga es necesaria para evitar la acumulación inerte en el proceso. Calcule la velocidad de flujo de la corriente de propileno contaminada al proceso.
- 4.5 El vapor que fluye a un caudal másico de 1500 kg / h, una presión de 20 bar y 350 ° C se alimenta a una turbina que funciona adiabáticamente y en estado estacionario. El vapor sale de la turbina a 1.0 bar y 150 ° C y se enfría en un intercambiador de calor a un líquido saturado. Dibuja y rotula el diagrama de flujo del proceso. ¿Cuánto trabajo (kJ / h) se extrae en la turbina? (541,650 kW) ¿Cuánto calor (kJ / h) se elimina en el intercambiador de calor?

## Referencias

- Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Mass and Energy Balances: Basic Principles for Calculation, Design, and Optimization of Macro/Nano Systems*. <http://www.springer.com/series/1161>
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos* (G. Noriega (ed.)). Limusa S.A. de C.V.
- Ghasem, N., & Henda, R. (2012). Principles of chemical engineering processes. In *Principles of Chemical Engineering Processes*. <https://doi.org/10.1201/b17696>
- Himmelblau David. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (Sexta). University of Texas.

Matar, S., & Hatch, Lewis F. (1995). Chemistry of petrochemical processes. In *World Pumps* (Vol. 1995, Issue 345). [https://doi.org/10.1016/s0262-1762\(99\)81158-4](https://doi.org/10.1016/s0262-1762(99)81158-4)

Murphy, R. M. (2007). *Introducción a los procesos químicos: principios, análisis y síntesis*. (2da ed.). McGraw-Hill.

## Apéndice

Las propiedades físicas (Apéndice A.1), las capacidades caloríficas (Apéndice A.2), presión de vapor de agua (Apéndice A.3), vapor saturado (Apéndice A.4), y sobrecalentado (Apéndice A.5) se tomaron de las siguientes referencias:

- Ghasem, N., & Henda, R. (2012). Principles of chemical engineering processes. In *Principles of Chemical Engineering Processes*. <https://doi.org/10.1201/b17696>
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos* (G. Noriega (ed.)). Limusa S.A. de C.V.
- Himmelblau David. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (Sexta). University of Texas.

**Tabla A.1**

Propiedades físicas de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	GE	T <sub>m</sub> (°C)	$\Delta\hat{H}_m$ (T <sub>m</sub> ) kJ/mol	T <sub>b</sub> (°C)	$\Delta\hat{H}_v$ (T <sub>b</sub> ) kJ/mol	T <sub>c</sub> (°C)	P <sub>c</sub> (atm)	$\Delta\hat{H}_f^0$ kJ/mol	$\Delta\hat{H}_e^0$ kJ/mol
Acetaldehído	CH <sub>3</sub> CHO	44.05	0.783	-123.7		20.2	25.1	461		-166.2(g)	-1192.4(g)
Acetato de etilo	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88.1	0.901	-83.8		77.0		523.1	37.8	-463.2(l)	-2246.4(l)
Acetato de metilo	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	74.08	0.933	-98.9		57.1		506.7	46.30	-426.8(g)	-1595(l)
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.04				-81.5	17.6	309.5	61.6	226.75(g)	-1299.6(g)
Acetona	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58.08	0.791	-95.0	5.69	56.0	30.2	508.0	47.0	-248.2(l)	-1785.7(l)
Ácido acético	CH <sub>3</sub> COOH	60.05	1.049	16.6	12.09	118.2	24.39	594.8	57.1	-216.7(l)	-1821.4(l)
Ácido benzoico	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	122.12	1.266	122.2		249.8				-486.18(l)	-871.69(l)
Ácido fórmico	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	46.03	1.220	8.30	12.68	100.5	22.25			-438.15(g)	-919.73(g)
Ácido fosfórico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	98.00	1.834	42.3	10.54					-409.2(l)	-3226.7(g)
Ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	63.02	1.502	-41.6	10.47	86	30.3			-1281.1(c)	-262.8(l)
Ácido oxálico	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	90.04	1.90							-1278.6(ac)	
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	98.08		10.35	9.87					-173.23(l)	
Agua		18.016	1.00	0.00	6.0095	0	40.656	647.40	218.3	-206.57(ac)	-251.9(s)
Alcohol bencílico	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	108.13	1.045	-15.4		205.2				-826.8(c)	
Alcohol etílico (etanol)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.07	0.789	-114.6	5.021	78.5	38.58	516.3	63.0	-811.32(l)	-1366.9(l)
Alcohol isopropílico	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	60.09	0.785	-89.7		82.24		508.8	53.0	-235.31(g)	-1409.25(g)
										-310.9(l)	-1986.6(l)

**Tabla A.1 (continúa)**

Propiedades físicas de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	GE	T <sub>m</sub> (°C)	$\Delta\hat{H}_m$ (T <sub>m</sub> ) kJ/mol	T <sub>b</sub> (°C)	$\Delta\hat{H}_v$ (T <sub>b</sub> ) kJ/mol	T <sub>c</sub> (°C)	P <sub>c</sub> (atm)	$\Delta\hat{H}_f^0$ kJ/mol	$\Delta\hat{H}_c^0$ kJ/mol
Alcohol metílico (metanol)	CH <sub>3</sub> OH	32.04	0.792	-97.9	3.167	64.7	35.27	513.20	78.5	-238.6(1)	726.6(1)
Alcohol n-propílico	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	60.09	0.804	-127		97.04		536.7	50.0	-201.2(g)	-764.0(g)
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	17.03		-77.8	5.653	-33.43	23.351	405.5	111.3	-300.70(1)	-2010.4(1)
Anilina	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	93.12	1.022	-6.3		184.2		699	52.4	-255.2(g)	-2068.5(g)
Azufre (monoclínico)	S <sub>8</sub>	256.53	1.96	119	14.17	444.6	83.7			-67.20(1)	-382.58(g)
Azufre (rómico)	S <sub>8</sub>	256.53	2.07	113	10.04	444.6	83.7			0.3(c)	
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.11	0.879	5.53	9.837	80.1	30.765	562.6	48.6	0(c)	-3267.6(1)
Benzaldehído	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO	106.12	1.046	-26.0		179.0	38.40			48.66(1)	-3301.5(g)
Bicarbonato de sodio	NaHCO <sub>3</sub>	84.01	2.20							-88.83(1)	-3520.0(1)
Bisulfato de sodio	NaHSO <sub>3</sub>	120.07	2.742							-40.04(g)	
Bromo	Br <sub>2</sub>	159.83	3.119	-7.4	10.8	58.6	31.0	584	102	-1126.3(c)	
Bromuro de etilo	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br	108.98	1.460	-119.1		38.2		504	61.5	0(1)	
Bromuro de hidrógeno	HBr	80.92		-86		-67				-54.4(g)	
1.2-butadieno	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.09		-136.5		10.1		446		-36.23(g)	
1.3-butadieno	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.09		-109.1		-4.6		425	42.7		

**Tabla A.1 (continúa)**

Propiedades físicas de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	GE	$T_m$ (°C)	$\Delta\hat{H}_m$ (kJ/mol)	$T_b$ (°C)	$\Delta\hat{H}_v$ (kJ/mol)	$T_c$ (°C)	$P_c$ (atm)	$\Delta\hat{H}_f^0$ (kJ/mol)	$\Delta\hat{H}_c^0$ (kJ/mol)
<i>n</i> -butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12		-138.3	4.661	-0.6	22.305	425.17	37.47	-147.0(1)	-2855.6(1)
1-Buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.10		-185.3	3.848	-6.25	21.916	419.6	39.7	-127.7(g)	-2878.5(g)
Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>	100.09	2.93							1.17(g)	-2718.6(g)
										-1206.9(c)	
Carbonato de sodio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	105.99	2.533							-1130.9(c)	
Carbono (grafito)	C	12.010	2.26	3600	46.0	4200				0(c)	-393.51(c)
Carburo de calcio	CaC <sub>2</sub>	64.10		2300						-62.7(c)	
Cianuro de hidrógeno	HCN	27.03		-14		26				130.54(g)	
Cianuro de sodio	NaCN	49.01		562	16.7	1497	155			-89.79(c)	
Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.16	0.779	6.7	2.677	80.7	30.1	553.7	40.4	-156.2(1)	-3919.9(1)
Ciclopentano	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.13	0.745	-93.4	0.609	49.3	27.30	511.8	44.55	123.1(1)	-3953.0(g)
										-105.9(1)	-3290.9(1)
										-77.2(g)	-3319.5(g)
										0(c)	
Cinc	Zn	65.38	7.140	419.5	6.674	907	114.77			0(c)	
Cloro	Cl <sub>2</sub>	70.91		-101.00	6.406	-34.06	20.4	417.0	76.1	0(c)	
Clorobenceno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	112.56	1.107	-45		132.10	36.5	632.4	44.6		
Cloroetano	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	Ver cloruro de etilo									
Cloroformo	CHCl <sub>3</sub>	119.39	1.489	-63.7		61.0		536.0	54.0	-131.8(1)	-373(1)
Cloruro de calcio	CaCl <sub>2</sub>	110.99	2.15	782	28.37	>1600				-794.96(c)	
Etilénglicol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	62.07	1.113	-13	11.23	197.2	56.9			-451.5(1)	-1179.5(1)
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.05		-169.2	3.350	-103.7	13.54	283.1	50.5	52.28(1)	-1410.9(1)
Fenol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	94.11	1.071	42.5	11.43	181.4		692.1	60.5	-158.1(s)	-3063.5(1)

**Tabla A.1 (continúa)**

Propiedades físicas de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	GE	T <sub>m</sub> (°C)	$\Delta\hat{H}_m$ (T <sub>m</sub> ) kJ/mol	T <sub>b</sub> (°C)	$\Delta\hat{H}_v$ (T <sub>b</sub> ) kJ/mol	T <sub>c</sub> (°C)	P <sub>c</sub> (atm)	$\Delta\hat{H}_f^0$ kJ/mol	$\Delta\hat{H}_c^0$ kJ/mol
Fluoruro de hidrógeno	HF	20.0		-83		20		503.2		-268.6(1)	
Formaldehído	H <sub>2</sub> CO	30.03		-92		-19.3	24.48			-316.9(ac)	
Fosfato de calcio	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	310.19	3.14	1670						-115.90(g)	-563.46(g)
Fósforo (blanco)	P <sub>4</sub>	123.9	1.82	44.2	2.51	280	49.71			-4138(c)	
Fósforo (rojo)	P <sub>4</sub>	123.9	2.20	590	81.17						-17.6(c)
Glicerol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	92.09	1.26	18.20	18.3	290.0				-665.9(1)	-1661.1(1)
Helio	He	4.00		-269.7	0.02	-268.9	0.084	5.26	2.26	0(g)	
<i>n</i> -Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.20	0.684	-90.59	14.03	98.43	31.69	540.2	27.0	-224.4(1)	-4816.9(1)
<i>n</i> -Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.17	0.659	-95.32	13.03	68.74	28.85	507.9	29.9	-187.8(g)	-4853.5(g)
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	2.016		-259.19	0.12	-252.76	0.904	33.3	12.8	0(g)	-4163.1(1)
Hierro	Fe	55.85	7.7	1535	15.1	2800	354.0			0(c)	-4194.8(g)
Hidróxido de amonio	NH <sub>4</sub> OH	35.03								-366.48(ac)	-285.84(g)
Hidróxido de calcio	Ca(OH) <sub>2</sub>	74.10	2.24							-986.59(c)	
Hidróxido de magnesio	Mg(OH) <sub>2</sub>	58.43	2.4								
Hidróxido de sodio	NaOH	40.00	2.130	319	8.34	1390				-426.6(c)	
Isobutano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12		-159.6	4.540	-11.73	21.292	408.1	36.0	-158.4(1)	-2849.0(1)
										-134.5(g)	-2868.8(g)

**Tabla A.1 (continúa)**

Propiedades físicas de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	GE	T <sub>m</sub> (°C)	$\Delta\hat{H}_m$ (T <sub>m</sub> ) kJ/mol	T <sub>b</sub> (°C)	$\Delta\hat{H}_v$ (T <sub>b</sub> ) kJ/mol	T <sub>c</sub> (°C)	P <sub>c</sub> (atm)	$\Delta\hat{H}_f^0$ kJ/mol	$\Delta\hat{H}_c^0$ kJ/mol
Isopentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.15	0.62	-160.1		27.7		461.00	32.9	-179.3(1)	-3507.5(1)
Magnesio	Mg	24.32	1.74	650	9.2	1120	131.8			-152.0(g)	-3529.2(g)
	Hg		13.54							0(c)	
Mercurio		200.61	6	-38.87		-356.9				0(c)	
Metano	CH <sub>4</sub>	16.04		-182.5	0.94	-161.5	8.179	190.70	45.8	-74.85(g)	-890.36(g)
Metil amina	CH <sub>5</sub> N	31.06		-92.7		-6.9		429.9	73.60	-28.0(1)	-1071.5(1)
Metil etil cetona	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72.1	0.805	-87.1		78.2	32.0				-2436(1)
Monóxido de carbono	CO	28.01		-205.1	0.837	-191.5	6.042	133.0	34.5	-110.52(g)	-282.99(g)
Naftaleno	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128.16	1.145	80.0		217.8					-5157(g)
Níquel	Ni	58.69	8.90	1452		2900				0(c)	
Nitrato de amonio	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	80.05	1.725	169.6	5.4					-365.14(c)	
										-399.36(ac)	
Nitrato de sodio	NaNO <sub>3</sub>	85.00	2.257	310	15.9					-466.7(c)	
Nitrito de sodio	NaNO <sub>2</sub>	69.00	2.168	271						-359.4(c)	
Nitrobenceno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N	123.11	1.203	5.5		210.7					-3092.8(1)
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.02		-210.0	0.720	-195.8	5.577	126.20	33.5	0(g)	
n-Nonano	C <sub>9</sub> H <sub>2</sub> O	128.25	0.718	-53.8		150.6		595	23.0	-229.0(1)	-6124.5(1)
											-6171.0(g)
n-Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.22	0.703	-57.0		125.5		568.8	24.5	-249.9(1)	-5470.7(1)
Óxido de calcio	CaO	56.08	3.32	2570	50	2850				-208.4(g)	-5512.2(g)
Óxido de magnesio	MgO	40.32	3.65	2900	77.4	3600				-635.6(c)	
										-601.8(c)	

**Tabla A.1 (continúa)**

Propiedades físicas de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	GE	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (T <sub>m</sub> ) kJ/mol	T <sub>b</sub> (°C)	ΔH <sub>v</sub> (T <sub>b</sub> ) kJ/mol	T <sub>c</sub> (°C)	P <sub>c</sub> (atm)	ΔH <sub>f</sub> <sup>0</sup> kJ/mol	ΔH <sub>c</sub> <sup>0</sup> kJ/mol
Óxido de plomo	PbO	223.21	9.5	886	11.7	1472	213			-219.2(c)	
Óxido férrico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159.70	5.12							-822.2(c)	
Óxido ferroso	FeO	71.85	5.7							-266.5(c)	
	NO										
Óxido nítrico		30.01		-163.6	2.301	151.8	13.78	179.20	65.0	90.37(g)	
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	44.02	1.226	-91.1		-88.8		309.5	71.70	81.5(g)	
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32.00		-218.75	0.444	-182.97	6.82	154.4	49.7	0(g)	
	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.15	0.63	-129.6	8.393	36.07	25.77	469.80	33.3	-173.0(1)	-3509.5(1)
<i>n</i> -Pentano										-146.4(g)	-3536.1(g)
1-Penteno	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.13	0.641	-165.2	4.94	29.97		474	39.9	-20.9(g)	-3375.8(g)
Pentóxido de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	141.95	2.387							-1506.2(c)	
Pentóxido de nitrógeno	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	108.20	1.63	30	47						
Plomo	Pb	207.21	11.337	327.4	5.10	1750	179.9			0(c)	
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.09		-187.69	3.52	-42.07	18.77	369.9	42.0	-119.8(1)	-2204.0(1)
	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.19	0.862	-99.50	8.54	159.2	38.24	638.7	31.3	-103.8(g)	2220.0(g)
<i>n</i> -Propil-benceno										-38.40(1)	-5218.2(1)
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.08		-185.2	3.00	-47.70	18.42	365.1	45.4	7.82(g)	-5264.48(g)
Silicato de calcio	CaSiO <sub>3</sub>	116.17	2.915	1530	48.62					20.41(g)	-2058.4(g)
Sulfato cúprico	CuSO <sub>4</sub>	159.61	3.606							1584(c)	
										-769.9(c)	
										-843.1(ac)	

**Tabla A.1 (continúa)**

Propiedades físicas de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	GE	$T_m$ (°C)	$\Delta\hat{H}_m(T_m)$ kJ/mol	$T_b$ (°C)	$\Delta\hat{H}_v(T_b)$ kJ/mol	$T_c$ (°C)	$P_c$ (atm)	$\Delta\hat{H}_f^0$ kJ/mol	$\Delta\hat{H}_c^0$ kJ/mol
Sulfato de amonio	$(NH_4)_2SO_4$	132.14	1.769	513						-1179.3(c)	
Sulfato de calcio	$CaSO_4$	136.15	2.69							-1173.1(ac)	
Sulfato de calcio (yeso)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	172.18	2.32							-1432.7(c)	
Sulfato de sodio	$Na_2SO_4$	142.05	2.698	890	24.3					-1384.5(c)	
Sulfito de sodio	$Na_2SO_3$	126.05	2.633							-1090.3(c)	
Sulfuro de hidrógeno	$H_2S$	34.08		-85.5	2.38	-60.3	18.67	373.6	88.9	-19.96(g)	-562.59(g)
Sulfuro de sodio	$Na_2S$	78.05	1.856	950	6.7					-373.2(c)	
Sulfuro ferroso	$FeS$	87.92	4.84	1193						-95.1(c)	
Tetracloruro de carbono	$CCl_4$	153.84	1.595	-22.9	2.51	76.7	30.0	556.4	45.0	-139.5(l)	-352.2(l)
Tetróxido de nitrógeno	$N_2O_4$	92.0	1.448	-9.5		21.1		431.0	99.0	-106.7(g)	-385.0(g)
Tiosulfato de sodio	$Na_2S_2O_3$	158.11	1.667							-1117.1(c)	
Tolueno	$C_7H_8$	92.13	0.866	-94.99	6.619	110.62	33.47	593.9	40.3	12.00(l)	-3909.9(l)
Trióxido de azufre	$SO_3$	80.07		16.84	25.48	43.3	41.80	491.4	83.8	50.00(g)	-3947.9(g)
<i>m</i> -Xileno	$C_8H_{10}$	106.16	0.864	-47.87	11.569	139.10	36.40	619	34.6	-395.18(g)	-4551.9(l)
<i>o</i> -Xileno	$C_8H_{10}$	106.16	0.880	-25.18	13.598	144.42	36.82	631.5	35.7	17.24(g)	-4594.5(g)
										-24.44(l)	-4552.9(l)
										18.99(g)	-4596.3(g)

**Tabla A.1** (continúa)

Propiedades físicas de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	GE	$T_m$ (°C)	$\Delta\widehat{H}_m$ (kJ/mol)	$T_b$ (°C)	$\Delta\widehat{H}_v$ (kJ/mol)	$T_c$ (°C)	$P_c$ (atm)	$\Delta\widehat{H}_f^0$ (kJ/mol)	$\Delta\widehat{H}_c^0$ (kJ/mol)
<i>p</i> -Xileno	$C_8H_{10}$	106.16	0.861	13.26	17.11	138.35	36.07	618	33.9	-24.43(1)	-4552.91(1)
Yodo	$I_2$	253.8	4.93	113.3		184.2		826.0		17.95(g) 0(c)	-4595.2(g)

**Tabla A.2**

Ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos (a bajas presiones)

Forma 1:  $C_p [kJ/(mol \cdot ^\circ C)]$  o  $[kJ/(mol \cdot K)] = a + bT + cT^2 + dT^3$

Forma 2:  $C_p [kJ/(mol \cdot ^\circ C)]$  o  $[kJ/(mol \cdot K)] = a + bT + cT^2 + dT^3$

Ejemplo:  $(C_p)_{acetona(g)} = 0,07196 + (20,10 \times 10^{-5})T - (12,78 \times 10^{-8})T^2 + (34,76 \times 10^{-12})T^3$ , donde T está en  $^\circ C$ .

Nota: Las fórmulas para gases se aplican en forma estricta a presiones lo bastante bajas para que la ecuación de estado de los gases ideales sea válida.

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	Estado	Forma	Unidad de temp.	a × 10 <sup>3</sup>	b × 10 <sup>5</sup>	c × 10 <sup>8</sup>	d × 10 <sup>12</sup>	Rango
										(unidades de T)
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.04	g	1	°C	42.43	6.053	-5.033	18.2	0-1200
Acetona	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	58.08	l	1	°C	123.0	18.6			-90
Ácido nítrico	NHO <sub>3</sub>	63.02	l	1	°C	71.96	20.10	-12.78	34.76	0-1200
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.08	l	1	°C	110.0				25
Agua	H <sub>2</sub> O	18.016	l	1	°C	139.1	15.59			Oct-45
			l	1	°C	75.4				0-100
			g	1	°C	33.46	0.6880	0.7604	-3.593	0-1500
Aire		29.0	g	1	°C	28.94	0.4147	0.3191	-1.965	0-1500
			g	1	°C	28.09	0.1965	0.4799	-1.965	273-1800
Alcohol etílico (etanol)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.07	l	1	°C	103.1				0
			l	1	°C	158.8				100
			g	1	°C	61.34	15.72	-8.749	19.83	0-1200
Alcohol metílico (metanol)	CH <sub>3</sub> OH	32.04	l	1	°C	75.86	16.83			0-65
			g	1	°C	42.93	8.301	-1.87	-8.03	0-700
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	17.03	g	1	°C	35.15	2.954	0.4421	-6.686	0-1200
Azufre	S	32.07	c	1	K	15.2	2.68			273-368
			(Rómbico)							
			c	1	K	18.3	1.84			368-392
			(Monoclínico)							
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.11	l	1	°C	126.5	23.4			6-67
			g	1	°C	74.06	32.95	-25.2	77.57	0-1200
Bromuro de hidrógeno	HBr	80.92	g	1	°C	29.1	-0.0227	0.9887	-4.858	0-1200

**Tabla A.2 (continúa)**

Ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos (a bajas presiones)

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	Estado	Forma	Unidad de temp.	$a \times 10^3$	$b \times 10^5$	$c \times 10^8$	$d \times 10^{12}$	Rango (unidades de T)
<i>n</i> -Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	g	1	°C	92.30	27.88	-15.47	34.94	0-1200
Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>	100.09	c	2	K	82.34	4.975	-12.87x10 <sup>10</sup>	-	273-1033
Carbonato de sodio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	105.99	c	1	K	121				288-371
Carbonato de sodio decahidratado	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 10H <sub>2</sub> O	286.15	c	1	K	535.6				298
Carbono	C	12.01	c	2	K	11.18	1.095	-4.891x10 <sup>10</sup>		273-1373
Carburo de calcio	CaC <sub>2</sub>	64.10	c	2	K	68.62	1.19		-	298-720
Cianuro de hidrógeno	HCN	27.03	g	1	°C	35.3	2.908	1.092	-8.66x10 <sup>10</sup>	0-1200
Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.16	g	1	°C	94.140	49.62	-31.90	80.63	0-1200
Ciclopentano	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.13	g	1	°C	73.39	39.28	-25.54	68.66	0-1200
Cloro	Cl <sub>2</sub>	70.91	g	1	°C	33.60	1.367	-1.607	6.473	0-1200
Cloruro de hidrógeno	HCl	36.47	g	1	°C	29.13	-0.1341	0.9715	-4.335	0-1200
Cloruro de magnesio	MgCl <sub>2</sub>	95.23	c	1	K	72.4	1.58			273-991
Cobre	Cu	63.54	c	1	K	22.76	0.6117			273-1357
Cumeno (isopropilbenceno)	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.19	g	1	°C	139.2	53.76	-39.79	120.5	0-1200
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	64.07	g	1	°C	38.91	3.904	-3.104	8.606	0-1500
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44.01	g	1	°C	36.11	4.233	-2.887	7.464	0-1500
Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	46.01	g	1	°C	36.07	3.97	-2.88	7.87	0-1200
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.07	g	1	°C	49.37	13.92	-5.816	7.280	0-1200
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.05	g	1	°C	40.75	11.47	-6.891	17.66	0-1200
Formaldehído	CH <sub>2</sub> O	30.03	g	1	°C	34.28	4.268	0.0000	-8.694	0-1200
Helio	He	4.00	g	1	°C	20.8				0-1200
<i>n</i> -Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.17	l	1	°C	216.3				20-100
			g	1	°C	137.44	40.85	-23.92	57.66	0-1200
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	2.016	g	1	°C	28.84	0.00765	0.3288	-0.8698	0-1500

**Tabla A.2 (continúa)**

Ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos (a bajas presiones)

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	Estado	Forma	Unidad de temp.	$a \times 10^3$	$b \times 10^5$	$c \times 10^8$	$d \times 10^{12}$	Rango (unidades de T)
Hidróxido de calcio	Ca(OH) <sub>2</sub>	74.10	c	1	K	89.5				276-373
Isobutano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	g	1	°C	89.46	30.13	-18.91	49.87	0-1200
Isobuteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.10	g	1	°C	82.88	25.64	-17.27	50.50	0-1200
Metano	CH <sub>4</sub>	16.04	g	1	°C	34.31	5.469	0.3661	-11.00	0-1200
Metilciclohexano	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	98.18	g	1	K	19.87	5.021	1.268	-11.00	273-1500
Metilciclopentano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.16	g	1	°C	121.3	56.53	-37.72	100.8	0-1200
Monóxido de carbono	CO	28.01	g	1	°C	98.83	45.857	-30.44	83.81	0-1200
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.02	g	1	°C	28.95	0.4110	0.3548	-2.220	0-1500
Óxido de calcio	CaO	56.08	c	2	K	29.00	0.2199	0.5723	-2.871	0-1500
Óxido de magnesio	MgO	40.32	c	2	K	41.84	2.03	-4.52x10 <sup>10</sup>		273-1173
Óxido férrico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159.70	c	2	K	45.44	0.5008	-8.732x10 <sup>10</sup>		273-2073
Óxido nítrico	NO	30.01	g	1	°C	103.4	6.711	-17.72x10 <sup>10</sup>		273-1097
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	44.02	g	1	°C	29.50	0.8188	-0.2925	0.3652	0-3500
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32.00	g	1	°C	37.66	4.151	-2.694	10.57	0-1200
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.15	l	1	°C	29.10	1.158	-0.6076	1.311	0-1500
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.09	g	1	°C	155.40	43.68			0-36
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.08	g	1	°C	114.8	34.09	-18.99	42.26	0-1200
Tetracloruro de carbono	CCl <sub>4</sub>	153.84	l	1	K	68.032	22.59	-13.11	31.71	0-1200
Tetróxido de nitrógeno	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	92.02	g	1	°C	59.580	17.71	-10.17	24.6	0-1200
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.13	l	1	°C	93.39	12.98	-11.3		273-343
Trióxido de azufre	SO <sub>3</sub>	80.07	g	1	°C	75.7	12.5			0-300
Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	132.15	c	1	K	148.8	32.4			0-110
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	34.08	g	1	°C	94.18	38.00	-27.86	80.33	0-1200
			g	1	°C	48.50	9.188	-8.540	32.40	0-1000
			c	1	K	215.9	1.547			275-328
			g	1	°C	33.51		0.3012	-3.292	0-1500

**Tabla A.3**

Presión de vapor del agua

		$p_v$ (mm Hg) contra $T(^{\circ}C)$									
		<i>Ejemplo:</i> La presión de vapor del agua líquida a 4.3°C es 6.230 mm Hg									
$T(^{\circ}C)$		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
↓ Helio	-14	1,361	1,348	1,336	1,324	1,312	1,300	1,288	1,276	1,264	1,253
	-13	1,490	1,477	1,464	1,450	1,437	1,424	1,411	1,399	1,386	1,373
	-12	1,632	1,617	1,602	1,588	1,574	1,559	1,546	1,532	1,518	1,504
	-11	1,785	1,769	1,753	1,737	1,722	1,707	1,691	1,676	1,661	1,646
	-10	1,950	1,934	1,916	1,899	1,883	1,866	1,849	1,833	1,817	1,800
	-9	2,131	2,122	2,093	2,075	2,057	2,039	2,021	2,003	1,985	1,968
	-8	2,326	2,306	2,285	2,266	2,246	2,226	2,207	2,187	2,168	2,149
	-7	2,537	2,515	2,493	2,472	2,450	2,429	2,408	2,387	2,367	2,346
	-6	2,765	2,742	2,718	2,695	2,672	2,649	2,626	2,603	2,581	2,559
	-5	3,013	2,987	2,962	2,937	2,912	2,887	2,862	2,838	2,813	2,790
	-4	3,280	3,252	3,225	3,198	3,171	3,144	3,117	3,091	3,065	3,039
	-3	3,568	3,539	3,509	3,480	3,451	3,422	3,393	3,364	3,336	3,308
-2	3,880	3,848	3,816	3,785	3,753	3,722	3,691	3,660	3,630	3,599	
-1	4,217	4,182	4,147	4,113	4,079	4,045	4,012	3,979	3,946	3,913	
0	4,579	4,542	4,504	4,467	4,431	4,395	4,359	4,323	4,287	4,252	
↓ Agua Líquida	0	4,579	4,613	4,647	4,681	4,715	4,750	4,785	4,820	4,855	4,890
	1	4,926	4,962	4,998	5,034	5,070	5,107	5,144	5,181	5,219	5,256
	2	5,294	5,332	5,370	5,408	5,447	5,486	5,525	5,565	5,605	5,645
	3	5,685	5,725	5,766	5,807	5,848	5,889	5,931	5,973	6,015	6,058
	4	6,101	6,144	6,187	6,230	6,274	6,318	6,363	6,408	6,453	6,498
	5	6,543	6,589	6,635	6,681	6,728	6,775	6,822	6,869	6,917	6,965
	6	7,013	7,062	7,111	7,160	7,209	7,259	7,309	7,360	7,411	7,462
	7	7,513	7,565	7,617	7,669	7,722	7,775	7,828	7,882	7,936	7,990
	8	8,045	8,100	8,155	8,211	8,267	8,323	8,380	8,437	8,494	8,551
	9	8,609	8,668	8,727	8,786	8,845	8,905	8,965	9,025	9,086	9,147
	10	9,209	9,271	9,333	9,395	9,458	9,521	9,585	9,649	9,714	9,779
	11	9,844	9,910	9,976	10,042	10,109	10,176	10,244	10,312	10,380	10,449
	12	10,518	10,588	10,658	10,728	10,799	10,870	10,941	11,013	11,085	11,158
	13	11,231	11,305	11,379	11,453	11,528	11,604	11,680	11,756	11,833	11,910
	14	11,987	12,065	12,144	12,223	12,302	12,382	12,462	12,543	12,624	12,706
	15	12,788	12,870	12,953	13,037	13,121	13,205	13,290	13,375	13,461	13,547
	16	13,634	13,721	13,809	13,898	13,987	14,076	14,166	14,256	14,347	14,438
	17	14,530	14,622	14,715	14,809	14,903	14,997	15,092	15,188	15,284	15,380
	18	15,477	15,575	15,673	15,772	15,871	15,971	16,071	16,171	16,272	16,374
	19	16,477	16,581	16,685	16,789	16,894	16,999	17,105	17,212	17,319	17,427
	20	17,535	17,644	17,753	17,863	17,974	18,085	18,197	18,309	18,422	18,536
	21	18,650	18,765	18,880	18,996	19,113	19,231	19,349	19,468	19,587	19,707
	22	19,827	19,948	20,070	20,193	20,316	20,440	20,565	20,690	20,815	20,941
	23	21,068	21,196	21,324	21,453	21,583	21,714	21,845	21,977	22,110	22,243
	24	22,377	22,512	22,648	22,785	22,922	23,060	23,198	23,337	23,476	23,616
25	23,756	23,897	24,039	24,182	24,326	24,471	24,617	24,764	24,912	25,060	

**Tabla A.3**

Presión de vapor del agua (continúa)

$T(^{\circ}C)$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
26	25,209	25,359	25,509	25,660	25,812	25,964	26,117	26,271	26,426	26,582
27	26,739	26,897	27,055	27,214	27,374	27,535	27,696	27,858	28,021	28,185
28	28,349	28,514	28,680	28,847	29,015	29,184	29,254	29,525	29,697	29,870
29	30,043	30,217	30,392	30,568	30,745	30,923	31,102	31,281	31,461	31,642
30	31,824	32,007	32,191	32,376	32,561	32,747	32,934	33,122	33,312	33,503
31	33,695	33,888	34,082	34,276	34,471	34,667	34,864	35,062	35,261	35,462
32	35,663	35,865	36,068	36,272	36,477	36,683	36,891	37,099	37,308	37,518
33	37,729	37,942	38,155	38,369	33,584	38,801	38,018	39,237	39,457	39,677
34	39,898	40,121	40,344	40,569	40,796	41,023	41,251	41,480	41,710	41,942
35	42,175	42,409	42,644	42,880	43,117	43,355	43,595	43,836	44,078	44,320
36	44,563	44,808	45,054	45,301	45,549	45,799	46,050	46,302	46,556	46,811
37	47,067	47,324	47,582	47,841	48,102	48,364	48,627	48,891	49,157	49,424
38	49,692	49,961	50,231	50,502	50,774	51,048	51,323	51,600	51,879	52,160
39	52,442	52,725	53,009	53,294	53,580	53,867	54,156	54,446	54,737	55,030
40	55,324	55.61	55.91	56.21	56.51	56.81	57.11	57.41	57.72	58.03
41	58.34	58.65	58.96	59.27	59.58	59.90	60.22	60.54	60.86	61.18
42	61.50	61.82	62.14	62.47	62.80	63.13	63.46	63.79	64.12	64.46
43	64.80	65.14	65.48	65.82	66.16	66.51	66.86	67.21	67.56	67.91
44	68.26	68.61	68.97	69.33	69.69	70.05	70.41	70.77	71.14	71.51
45	71.88	72.25	72.62	72.99	73.36	73.74	74.12	74.50	74.88	75.26
46	75.65	76.04	76.43	76.82	77.21	77.60	78.00	78.40	78.80	79.20
47	79.60	80.00	80.41	80.82	81.23	81.64	82.05	82.46	82.87	83.29
48	83.71	84.13	84.56	84.99	85.42	85.85	86.28	86.71	87.14	87.58
49	88.02	88.46	88.90	89.34	89.79	90.24	90.69	91.14	91.59	92.05
$T(^{\circ}C)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	92.51	97.20	102.09	107.20	112.51	118.04	123.80	129.82	136.08	142.60
60	149.38	156.43	163.77	171.38	179.31	187.54	196.09	204.96	214.17	223.73
70	233.7	243.9	254.6	265.7	277.2	289.1	301.4	314.1	327.3	341.0
80	355.1	369.7	384.9	400.6	416.8	433.6	450.9	468.7	487.1	506.1
$T(^{\circ}C)$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
90	525.76	527.76	529.77	531.78	533.80	535.82	537.86	539.90	541.95	544.00
91	546.05	548.11	550.18	552.26	554.35	556.44	558.53	560.64	562.75	564.87
92	566.99	569.12	571.26	573.40	575.55	577.71	579.87	582.04	584.22	586.41
93	588.60	590.80	593.00	595.21	597.43	599.66	601.89	604.13	606.38	608.64
94	610.90	613.17	615.44	617.72	620.01	622.31	624.61	626.92	629.24	631.57
95	633.90	636.24	638.59	640.94	643.30	645.67	648.05	650.43	652.82	655.22
96	657.62	660.03	662.45	664.88	667.31	669.75	672.20	674.66	677.12	679.69
97	682.07	684.55	687.04	689.54	692.05	694.57	697.10	699.63	702.17	704.71
98	707.27	709.83	712.40	714.98	717.56	720.15	722.75	725.36	727.98	730.61
99	733.24	735.88	738.53	741.18	743.85	746.52	749.20	751.89	754.58	757.29
100	760.00	762.72	765.45	768.19	770.93	773.68	776.44	779.22	782.00	784.78
101	787.57	790.37	793.18	796.00	798.82	801.66	804.50	807.35	810.21	813.08

**Tabla A.4**

Propiedades del vapor saturado: tabla de presiones

P (bar)	T (°C)	$\hat{V}$ (m <sup>3</sup> /kg)		$\hat{U}$ (kJ/kg)		$\hat{H}$ (kJ/kg)	
		Agua	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Vapor
0.00611	0.01	0.001000	206.2	cero	2375.6	0.0	2501.6
0.008	3.8	0.001000	159.7	15.8	2380.7	15.8	2492.6
0.010	7.0	0.001000	129.2	29.3	2385.2	29.3	2485.0
0.012	9.7	0.001000	108.7	40.6	2388.9	40.6	2478.7
0.014	12.0	0.001000	93.9	50.3	2392.0	50.3	2473.2
0.016	14.0	0.001001	82.8	58.9	2394.8	58.9	2468.4
0.018	15.9	0.001001	74.0	66.5	2397.4	66.5	2464.1
0.020	17.5	0.001001	67.0	73.5	2399.6	73.5	2460.2
0.022	19.0	0.001002	61.2	79.8	2401.7	79.8	2456.6
0.024	20.4	0.001002	56.4	85.7	2403.6	85.7	2453.3
0.026	21.7	0.001002	52.3	91.1	2405.4	91.1	2450.2
0.028	23.0	0.001002	48.7	96.2	2407.1	96.2	2447.3
0.030	24.1	0.001003	45.7	110.0	2408.6	101.0	2444.6
0.035	26.7	0.001003	39.5	111.8	2412.2	111.8	2438.5
0.040	29.0	0.001004	34.8	121.4	2415.3	121.4	2433.1
0.045	31.0	0.001005	31.1	130.0	2418.1	130.0	2428.3
0.050	32.9	0.001005	28.2	137.8	2420.6	137.8	2423.8
0.060	36.2	0.001006	23.74	151.5	2425.1	151.5	2426.0
0.070	39.0	0.001007	20.53	163.4	2428.9	163.4	2409.2
0.080	41.5	0.001008	18.1	173.9	2432.3	173.9	2403.2
0.090	43.8	0.001009	16.2	183.3	2435.3	183.3	2397.9
0.10	45.8	0.001010	14.67	191.8	2438.0	191.8	2392.2
0.11	47.7	0.001011	13.42	199.7	2440.5	199.7	2388.4
0.12	49.4	0.001012	12.36	206.9	2442.8	206.9	2384.3

**Tabla A.4**

Propiedades del vapor saturado: tabla de presiones (continúa)

P (bar)	T (°C)	$\hat{V}$ (m <sup>3</sup> /kg)		$\hat{U}$ (kJ/kg)		$\hat{H}$ (kJ/kg)		
		Agua	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Evaporación	Vapor
0.13	51.1	0.001013	11.47	213.7	2445.0	213.7	2380.4	2594.0
0.14	52.6	0.001013	10.69	220.0	2447.0	220.0	2376.7	2596.7
0.15	54.0	0.001014	10.02	226.0	2448.9	226.0	2373.2	2599.2
0.16	55.3	0.001015	9.43	231.6	2450.6	231.6	2370.0	2601.6
0.17	56.6	0.001015	8.91	236.9	2452.3	236.9	2366.9	2603.8
0.18	57.8	0.001016	8.45	242.0	2453.9	242.0	2363.9	2605.9
0.19	59.0	0.001017	8.03	246.8	2455.4	246.8	2361.1	2607.9
0.20	60.1	0.001017	7.65	251.5	2456.9	251.5	2358.4	2609.9
0.22	62.2	0.001018	7.00	260.1	2459.6	260.1	2353.3	2613.5
0.24	64.1	0.001019	6.45	268.2	2462.1	268.2	2348.6	2616.8
0.26	65.9	0.001020	5.98	275.6	2464.4	275.7	2344.2	2619.9
0.28	67.5	0.001021	5.58	282.7	2466.5	282.7	2340.0	2622.7
0.30	69.1	0.001022	5.23	289.3	2468.6	289.3	2336.1	2625.4
0.35	72.7	0.001025	4.53	304.3	2473.1	304.3	2327.2	2631.5
0.40	75.9	0.001027	3.99	317.6	2477.1	317.7	2319.2	2636.9
0.45	78.7	0.001028	3.58	329.6	2480.0	329.6	2312.0	2641.7
0.50	81.3	0.001030	3.24	340.5	2484.0	340.6	2305.4	2646.0
0.55	83.7	0.001032	2.96	350.6	2486.9	350.6	2299.3	2649.9
0.60	86.0	0.001033	2.73	359.9	248.7	359.9	2293.6	2653.6
0.65	88.0	0.001035	2.53	368.5	2492.2	368.6	2288.3	2656.9
0.70	90.0	0.001036	2.36	376.7	2494.5	376.8	2283.3	2660.1
0.75	91.8	0.001037	2.22	384.4	2496.7	384.5	2278.6	2663.0
0.80	93.5	0.001039	2.087	391.6	2498.8	391.7	2274.1	2665.8
0.85	95.2	0.001040	1.972	398.5	2500.8	398.6	2269.8	2668.4

**Tabla A.4**

Propiedades del vapor saturado: tabla de presiones (continúa)

P (bar)	T (°C)	$\hat{V}$ (m <sup>3</sup> /kg)		$\hat{U}$ (kJ/kg)		$\hat{H}$ (kJ/kg)		
		Agua	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Evaporación	Vapor
0.90	96.7	0.001041	1.869	405.1	2502.6	405.2	2265.6	2670.9
0.95	98.2	0.001042	1.777	411.4	2504.4	411.5	2261.7	2673.2
1.00	99.6	0.001043	1.694	417.4	2506.1	417.5	2257.9	2675.4
1.01325	100.0	0.001044	1.673	419.0	2506.5	419.1	2256.9	2676.0
1.1	102.3	0.001046	1.549	428.7	2509.2	428.8	2250.8	2679.6
1.2	104.8	0.001048	1.428	439.2	2512.1	439.4	2244.1	2683.4
1.3	107.1	0.001049	1.325	449.1	2514.7	449.2	2237.8	2687.0
1.4	109.3	0.001051	1.236	458.3	2517.2	458.4	2231.9	2690.3
1.5	111.4	0.001053	1.159	467.0	2519.5	467.1	2226.2	2693.4
1.6	113.3	0.001055	1.091	475.2	2521.7	475.4	2220.9	2696.2
1.7	115.2	0.001056	1.031	483.0	2523.7	483.2	2215.7	2699.0
1.8	116.9	0.001058	0.977	490.5	2525.6	490.7	2210.8	2701.5
1.9	118.6	0.001059	0.929	497.6	2527.5	497.8	2206.1	2704.0
2.0	120.2	0.001061	0.885	504.5	2529.2	504.7	2201.6	2706.3
2.2	123.3	0.001064	0.810	517.4	2532.4	517.6	2193.0	2710.6
2.4	126.1	0.001066	0.746	529.4	2535.4	529.6	2184.9	2714.5
2.6	128.7	0.001069	0.693	540.6	2538.1	540.9	2177.3	2718.2
2.8	131.2	0.001071	0.646	551.1	2540.6	551.4	2170.1	2721.5
3.0	133.5	0.001074	0.606	561.1	2543.0	561.4	2163.2	2724.7
3.3	135.8	0.001076	0.570	570.6	2545.2	570.9	2156.7	2727.6
3.4	137.9	0.001078	0.538	579.6	2547.2	579.9	2150.4	2730.3
3.6	139.9	0.001080	0.510	588.1	2549.2	588.5	2144.4	2732.9
3.8	141.8	0.001082	0.485	596.4	2551.0	596.8	2138.6	2735.3
4.0	143.6	0.001084	0.462	604.2	2552.7	604.7	2133.0	2737.6

**Tabla A.4**

Propiedades del vapor saturado: tabla de presiones (continúa)

P (bar)	T (°C)	$\hat{V}$ (m <sup>3</sup> /kg)		$\hat{U}$ (kJ/kg)		$\hat{H}$ (kJ/kg)		
		Agua	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Evaporación	Vapor
4.2	145.4	0.001086	0.442	611.8	2554.4	612.3	2127.5	2739.8
4.4	147.1	0.001088	0.423	619.1	2555.9	619.6	2122.3	2741.9
4.6	148.7	0.001089	0.405	626.2	2557.4	626.7	2117.2	2743.9
4.8	150.3	0.001091	0.389	633.0	2558.8	633.5	2112.2	2745.7
5.0	151.8	0.001093	0.375	639.6	2560.2	640.1	2107.4	2747.5
5.5	155.5	0.001097	0.342	655.2	2563.3	655.8	2095.9	2751.7
6.0	158.8	0.001101	0.315	669.8	2566.2	670.4	2085.0	2755.5
6.5	162.0	0.001105	0.292	683.4	2568.7	684.1	2074.7	2758.9
7.0	165.0	0.001108	0.273	696.3	2571.1	697.1	2064.9	2762.0
7.5	167.8	0.001112	0.2554	708.5	2573.3	709.3	2055.5	2764.8
8.0	170.4	0.001115	0.2403	720.0	2575.5	720.9	2046.5	2767.5
8.5	172.9	0.001118	0.2268	731.1	2577.1	732.0	2037.9	2769.9
9.0	175.4	0.001121	0.2148	741.6	2578.8	742.6	2029.5	2772.1
9.5	177.7	0.001124	0.2040	751.8	2580.4	752.8	2021.4	2774.2
10.0	179.9	0.001127	0.1943	761.5	2581.9	762.6	2013.6	2776.2
10.5	182.0	0.001130	0.1855	770.0	2583.3	772.0	2005.9	2778.0
11.0	184.1	0.001133	0.1774	779.9	2584.5	781.1	1998.5	2779.7
11.5	186.0	0.001136	0.1700	788.6	2585.8	789.9	1991.3	2781.3
12.0	188.0	0.001139	0.1632	797.1	2586.9	798.4	1984.3	2782.7
12.5	189.8	0.001141	0.1569	805.3	2588.0	806.7	1977.4	2784.1
13.0	191.6	0.001144	0.1511	813.2	2589.0	814.7	1970.7	2785.4
14	195.0	0.001149	0.1407	828.5	2590.8	830.1	1957.7	2787.8
15	198.3	0.001154	0.1317	842.9	2592.4	844.7	1945.2	2789.9
16	201.4	0.001159	0.1237	856.7	2593.8	858.6	1933.2	2791.7

**Tabla A.4**

Propiedades del vapor saturado: tabla de presiones (continúa)

P (bar)	T (°C)	$\hat{V}$ (m <sup>3</sup> /kg)		$\hat{U}$ (kJ/kg)		$\hat{H}$ (kJ/kg)	
		Agua	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Vapor
17	204.3	0.001163	0.1166	869.9	2595.1	871.8	1921.5
18	207.1	0.001168	0.1103	882.5	2596.3	884.6	1910.3
19	209.8	0.001172	0.1047	894.6	2597.3	896.8	1899.3
20	212.4	0.001177	0.0995	906.2	2598.2	908.6	1888.6
21	214.9	0.001181	0.0949	917.5	2598.9	920.0	1878.2
22	217.2	0.001185	0.0907	928.3	2599.6	931.0	1868.1
23	219.6	0.001189	0.0868	938.9	2600.2	941.6	1858.2
24	221.8	0.001193	0.0832	949.1	2600.7	951.9	1848.5
25	223.9	0.001197	0.0799	959.0	2601.2	962.0	1839.0
26	226.0	0.001201	0.0769	968.6	2601.5	971.7	1829.6
27	228.1	0.001205	0.0740	978.0	2601.8	981.2	1820.5
28	230.0	0.001209	0.0714	987.1	2602.1	990.5	1811.5
29	232.0	0.001213	0.0689	996.0	2602.3	999.5	1802.6
30	233.8	0.001216	0.0666	1004.7	2602.4	1008.4	1793.9
32	237.4	0.001224	0.0624	1021.5	2602.5	1025.4	1776.9
34	240.9	0.001231	0.0587	1037.6	2602.5	1041.8	1760.3
36	244.2	0.001238	0.0554	1053.1	2602.2	1057.6	1744.2
38	247.3	0.001245	0.0524	1068.0	2601.9	1072.7	1728.4
40	250.3	0.001252	0.0497	1082.4	2601.3	1087.4	1712.9
42	253.2	0.001259	0.0473	1096.3	2600.7	1101.6	1697.8
44	256.0	0.001266	0.0451	1109.8	2599.9	1115.4	1682.9
46	258.8	0.001272	0.0430	1122.9	2599.1	1128.8	1668.3
48	261.4	0.001279	0.0412	1135.6	2598.1	1141.8	1653.9
50	263.9	0.001286	0.0394	1148.0	2597.0	1154.5	1639.7

**Tabla A.4**

Propiedades del vapor saturado: tabla de presiones (continúa)

P (bar)	T (°C)	$\widehat{V}$ (m <sup>3</sup> /kg)		$\widehat{U}$ (kJ/kg)		$\widehat{H}$ (kJ/kg)		
		Agua	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Evaporación	Vapor
52	266.4	0.001292	0.0378	1160.1	2595.9	1166.8	1625.7	2792.6
54	268.8	0.001299	0.0363	1171.9	2594.6	1178.9	1611.9	2790.8
56	271.1	0.001306	0.0349	1183.5	2593.3	1190.8	1598.2	2789.0
58	273.3	0.001312	0.0337	1194.7	2591.9	1202.3	1584.7	2787.0
60	275.6	0.001319	0.0324	1205.8	2590.4	1213.7	1571.3	2785.0
62	277.7	0.001325	0.0313	1216.6	2588.8	1224.8	1558.0	2782.9
64	279.8	0.001332	0.0302	1227.2	2587.2	1235.7	1544.9	2780.6
66	281.8	0.001338	0.0292	1237.6	2585.5	1246.5	1531.9	2778.3
68	283.8	0.001345	0.0283	1247.9	2583.7	1257.0	1518.9	2775.9
70	285.8	0.001351	0.0274	1258.0	2581.8	1267.5	1506.0	2773.5
72	287.7	0.001358	0.0265	1267.9	2579.9	1277.6	1493.3	2770.9
74	289.6	0.001364	0.0257	1277.6	2578.0	1287.7	1480.5	2768.3
76	291.4	0.001371	0.0249	1287.2	2575.9	1297.6	1467.9	2765.5
78	293.2	0.001378	0.0242	1296.7	2573.8	1307.4	1455.3	2762.8
80	295.0	0.001384	0.0235	1306.0	2571.7	1317.1	1442.8	2759.9
82	296.7	0.001391	0.0229	1315.2	2569.5	1326.6	1430.3	2757.0
84	298.4	0.001398	0.0222	1324.3	2567.2	1336.1	1417.9	2754.0
86	300.1	0.001404	0.0216	1333.3	2564.9	1345.4	1405.5	2705.9
88	301.7	0.001411	0.0210	1342.2	2562.6	1354.6	1393.2	2747.8
90	303.3	0.001418	0.02050	1351.0	2560.1	1363.7	1380.9	2744.6
92	304.9	0.001425	0.01996	1359.7	2557.7	1372.8	1368.6	2741.4
94	306.4	0.001432	0.01945	1368.2	2555.2	1381.7	1356.3	2738.0
96	308.0	0.001439	0.01897	1376.7	2552.6	1390.6	1344.1	2734.7
98	309.5	0.001446	0.01849	1385.2	2550.0	1399.3	1331.9	2731.2

**Tabla A.4**

Propiedades del vapor saturado: tabla de presiones (continúa)

P (bar)	T (°C)	$\widehat{V}$ (m <sup>3</sup> /kg)		$\widehat{U}$ (kJ/kg)		$\widehat{H}$ (kJ/kg)		
		Agua	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Evaporación	Vapor
100	311.0	0.001453	0.01804	1393.5	2547.3	1408.0	1319.7	2727.7
105	314.6	0.001470	0.01698	1414.1	2540.4	1429.5	1289.2	2718.7
110	318.0	0.001489	0.01601	1434.2	2533.2	1450.6	1258.7	2709.3
115	321.4	0.001507	0.01511	1454.0	2525.7	1471.3	1228.2	2699.5
120	324.6	0.001527	0.01428	1473.4	2517.8	1491.8	1197.4	2689.2
125	327.8	0.001547	0.01351	1492.7	2509.4	1512.0	1166.4	2678.4
130	330.8	0.001567	0.01280	1511.6	2500.6	1532.0	1135.0	2667.0
135	333.8	0.001588	0.01213	1530.4	2491.3	1551.9	1103.1	2655.0
140	336.6	0.001611	0.01150	1549.1	2481.4	1571.6	1070.7	2646.4
145	339.4	0.001634	0.01090	1567.5	2471.0	1591.3	1037.7	2629.1
150	342.1	0.001658	0.01034	1586.1	2459.9	1611.0	1004.0	2615.0
155	344.8	0.001683	0.00981	1604.6	2448.2	1630.7	969.6	2600.3
160	347.3	0.001710	0.00931	1623.2	2436.0	1650.5	934.3	2584.9
165	349.8	0.001739	0.00883	1641.8	2423.1	1670.5	898.3	2568.8
170	352.3	0.001770	0.00837	1661.6	2409.3	1691.7	859.9	2551.6
175	354.6	0.001803	0.00793	1681.8	2394.6	1713.3	820.0	2533.3
180	357.0	0.001840	0.00750	1701.7	2378.9	1734.8	779.1	2513.9
185	359.2	0.001881	0.00708	1721.7	2362.1	1756.5	736.6	2493.1
190	361.4	0.001926	0.00668	1742.1	2343.8	1778.7	692.0	2470.6
195	363.6	0.001977	0.00628	1763.2	2323.6	1801.8	644.2	2446.0
200	365.7	0.00204	0.00588	1785.7	2300.8	1826.5	591.9	2418.4
205	367.8	0.00211	0.00546	1810.7	2274.4	1853.9	532.5	2386.4
210	369.8	0.00220	0.00502	1840.0	2242.1	1886.3	461.3	2347.6
215	371.8	0.00234	0.00451	1878.6	2198.1	1929.9	366.2	2295.2
220	373.7	0.00267	0.00373	1952	2114	2011	185	2196

**Tabla A.5**

Propiedades del vapor sobrecalentado

$P(\text{bar})$		Agua		Vapor		Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )					
$T_{\text{sat.}} \text{ } ^{\circ}\text{C}$		sat.	sat.	50	75	100	150	200	250	300	350
0	$\hat{P}$	-	-	2595	2642	2689	2784	2880	2978	3077	3177
(-)	$\hat{C}$	-	-	2446	2481	2517	2589	2662	2736	2812	2890
	$\hat{V}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.1	$\hat{P}$	191.8	2584.8	2593	2640	2688	2783	2880	2977	3077	3177
(45.8)	$\hat{C}$	191.8	2438.0	2444	2480	2516	2588	2661	2736	2812	2890
	$\hat{V}$	0.00101	14.7	14.8	16.0	17.2	19.5	21.8	24.2	26.5	28.7
0.5	$\hat{P}$	340.6	2646.0	209.3	313.9	2683	2780	2878	2979	3076	3177
(81.3)	$\hat{C}$	340.6	2484.0	209.2	313.9	2512	2586	2660	2735	2811	2889
	$\hat{V}$	0.00103	3.24	0.00101	0.00103	3.41	3.89	4.35	4.83	5.29	5.75
1.0	$\hat{P}$	417.5	2675.4	209.3	314.0	2676	2776	2875	2975	3074	3176
(99.6)	$\hat{C}$	417.5	2506.1	209.2	313.9	2507	2583	2658	2734	2811	2889
	$\hat{V}$	0.00104	1.69	0.00101	0.00103	1.69	1.94	2.17	2.40	2.64	2.87
5.0	$\hat{P}$	640.1	2747.5	209.7	314.3	419.4	632.2	2855	2961	3065	3168
(151.8)	$\hat{C}$	639.6	2560.2	209.2	313.8	418.8	631.6	2643	2724	2803	2883
	$\hat{V}$	0.00109	0.375	0.00101	0.00103	0.00104	0.00109	0.425	0.474	0.522	0.571
10	$\hat{P}$	762.6	2776.2	210.1	314.7	419.7	632.5	2827	2943	3052	3159
(179.9)	$\hat{C}$	761.5	2582	209.1	313.7	418.7	631.4	2621	2710	2794	2876
	$\hat{V}$	0.00113	0.194	0.00101	0.00103	0.00104	0.00109	0.206	0.233	0.258	0.282
20	$\hat{P}$	908.6	2797.2	211.0	315.5	420.5	633.1	852.6	2902	3025	3139
(212.4)	$\hat{C}$	906.2	2598.2	209.0	313.5	418.4	603.9	850.2	2679	2774	2862
	$\hat{V}$	0.00118	0.09950	0.00101	0.00102	0.00104	0.00109	0.00116	0.111	0.125	0.139
40	$\hat{P}$	1087.4	2800.3	212.7	317.1	422.0	634.3	853.4	1085.8	2962	3095
(250.3)	$\hat{C}$	1082.4	2601.3	208.6	313.0	417.8	630.0	848.8	1080.8	2727	2829
	$\hat{V}$	0.00125	0.04975	0.00101	0.00102	0.00104	0.00109	0.00115	0.00125	0.0588	0.0665
60	$\hat{P}$	1213.7	2785.0	214.4	318.7	423.5	635.6	854.2	1085.8	2885	3046
(275.6)	$\hat{C}$	1205.8	2590.4	208.3	312.6	417.3	629.1	847.3	1078.3	2668	2792
	$\hat{V}$	0.00132	0.0325	0.00101	0.00103	0.00104	0.00109	0.00115	0.00125	0.0361	0.0422
80	$\hat{P}$	1317.1	2759.9	216.1	320.3	425.0	636.8	855.1	1085.8	2787	2990
(295.0)	$\hat{C}$	1306.0	2571.7	208.1	312.3	416.7	628.2	845.9	1075.8	2593	2750
	$\hat{V}$	0.00139	0.0235	0.00101	0.00102	0.00104	0.00109	0.00115	0.00124	0.0243	0.0299
100	$\hat{P}$	1408.0	2727.7	217.8	322.9	426.5	638.1	855.9	1085.8	1343.4	2926
(311.0)	$\hat{C}$	1393.5	2547.3	201.8	311.7	416.1	627.3	844.4	1073.4	1329.4	2702
	$\hat{V}$	0.00145	0.0181	0.00101	0.00102	0.00104	0.00109	0.00115	0.00124	0.00140	0.0224
150	$\hat{P}$	1611.0	2615.0	222.1	326.0	430.3	641.3	858.1	1086.2	1338.2	2695
(342.1)	$\hat{C}$	1586.1	2459.9	207.0	310.7	414.7	625.0	841.0	1067.7	1317.6	2523
	$\hat{V}$	0.00166	0.0103	0.00101	0.00102	0.00104	0.00108	0.00114	0.00123	0.00138	0.0115
200	$\hat{P}$	1826.5	2418.4	226.4	330.0	434.0	644.5	860.4	1086.7	1334.3	1647.1
(365.7)	$\hat{C}$	1785.7	2300.8	206.3	309.7	413.2	622.9	837.7	1062.2	1307.1	1613.7
	$\hat{V}$	0.00204	0.005875	0.00100	0.00102	0.00103	0.00108	0.00114	0.00122	0.00136	0.00167
221.2 (Pr)	$\hat{P}$	2108	2108	228.2	331.7	435.7	645.8	861.4	1087.0	1332.8	1635.5
374.15 (Tr)	$\hat{C}$	2037.8	2037.8	206.0	309.2	412.8	622.0	836.3	1060.0	1302.9	1600.3
	$\hat{V}$	0.00317	0.00317	0.00100	0.00102	0.00103	0.00108	0.00114	0.00122	0.00135	0.00163
250	$\hat{P}$	-	-	230.7	334.0	437.8	647.7	862.8	1087.5	1331.1	1625.0
(-)	$\hat{C}$	-	-	205.7	308.7	412.1	620.8	834.4	1057.0	1297.5	1585.0
	$\hat{V}$	-	-	0.00100	0.00101	0.00103	0.00108	0.00113	0.00122	0.00135	0.00160
300	$\hat{P}$	-	-	235.0	338.1	441.6	650.9	865.2	1088.4	1328.7	1609.9
(-)	$\hat{C}$	-	-	205.0	307.7	410.8	618.7	831.3	1052.1	1288.7	1563.3
	$\hat{V}$	-	-	0.0009990	0.00101	0.00103	0.00107	0.00113	0.00121	0.00133	0.00155
500	$\hat{P}$	-	-	251.9	354.2	456.8	664.1	875.4	1093.6	1323.7	1576.3
(-)	$\hat{C}$	-	-	202.4	304.0	405.8	611.0	819.7	1034.3	1259.3	1504.1
	$\hat{V}$	-	-	0.0009911	0.00100	0.00102	0.00106	0.00111	0.00119	0.00129	0.00144
1000	$\hat{P}$	-	-	293.9	394.3	495.1	698.0	903.5	1113.0	1328.7	1550.5
(-)	$\hat{C}$	-	-	196.5	295.7	395.1	594.4	795.3	999.0	1207.1	1419.0
	$\hat{V}$	-	-	0.0009737	0.0009852	0.001000	0.00104	0.00108	0.00114	0.00122	0.00131

**Tabla A.5**

Propiedades del vapor sobrecalentado (continúa)

$P(\text{bar})$		Agua	Vapor	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )						
$T_{\text{sat.}} (^{\circ}\text{C})$		400	450	500	550	600	650	700	750	
0	$\hat{P}$	3280	3384	3497	3597	3706	3826	3929	4043	
(-)	$\hat{C}$	2969	3050	3132	3217	3303	3390	3480	3591	
	$\hat{V}$	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.1	$\hat{P}$	3280	3384	3489	3596	3706	3816	3929	4043	
(45.8)	$\hat{C}$	2969	3050	3132	3217	3303	3390	3480	3571	
	$\hat{V}$	21.1	33.3	35.7	38.0	40.3	42.6	44.8	47.2	
0.5	$\hat{P}$	3279	3383	3489	3596	3705	3816	3929	4043	
(81.3)	$\hat{C}$	2969	3049	3132	3216	3302	3390	3480	3571	
	$\hat{V}$	6.21	6.67	7.14	7.58	8.06	8.55	9.01	9.43	
1.0	$\hat{P}$	3278	3382	3488	3596	3705	3816	3928	4042	
(99.6)	$\hat{C}$	2968	3049	3132	3216	3302	3390	3479	3570	
	$\hat{V}$	3.11	3.33	3.57	3.80	4.03	4.26	4.48	4.72	
5.0	$\hat{P}$	3272	3379	3484	3592	3702	3813	3926	4040	
(151.8)	$\hat{C}$	2964	3045	3128	3213	3300	3388	3477	3569	
	$\hat{V}$	0.617	0.664	0.711	0.758	0.850	0.850	0.897	0.943	
10	$\hat{P}$	3264	3371	3478	3587	3697	3809	3926	4038	
(179.9)	$\hat{C}$	2958	3041	3124	3210	3296	3385	3475	3567	
	$\hat{V}$	0.307	0.330	0.353	0.377	0.402	0.424	0.448	0.472	
20	$\hat{P}$	3249	3358	3467	3578	3689	3802	3916	4032	
(212.4)	$\hat{C}$	2946	3031	3115	3202	3290	3379	3470	3562	
	$\hat{V}$	0.151	0.163	0.175	0.188	0.200	0.211	0.223	0.235	
40	$\hat{P}$	3216	3331	3445	3559	3673	3788	3904	4021	
(250.3)	$\hat{C}$	2922	3011	3100	3188	3278	3368	3460	3554	
	$\hat{V}$	0.0734	0.0799	0.0864	0.0926	0.0987	0.105	0.111	0.117	
60	$\hat{P}$	3180	3303	3422	3539	3657	3774	3892	4011	
(275.6)	$\hat{C}$	2896	2991	3083	3174	3265	3357	3451	3545	
	$\hat{V}$	0.0474	0.0521	0.0566	0.0609	0.0652	0.0693	0.0735	0.0776	
80	$\hat{P}$	3142	3274	3399	3520	3640	3759	3879	4000	
(295.0)	$\hat{C}$	2867	2969	3065	3159	3252	3346	3441	3537	
	$\hat{V}$	0.0344	0.0382	0.0417	0.0450	0.0483	0.0515	0.0547	0.0578	
100	$\hat{P}$	3100	3244	3375	3500	3623	3745	3867	3989	
(311.0)	$\hat{C}$	2836	2946	3047	3144	3240	3335	3431	3528	
	$\hat{V}$	0.0264	0.0298	0.0328	0.0356	0.0383	0.0410	0.0435	0.0461	
150	$\hat{P}$	2975	3160	3311	3448	3580	3708	3835	3962	
(342.1)	$\hat{C}$	2744	2883	2999	3105	3207	3307	3407	3507	
	$\hat{V}$	0.0157	0.0185	0.0208	0.0229	0.0249	0.0267	0.0286	0.0304	
200	$\hat{P}$	2820	3064	3241	3394	3536	3671	3804	3935	
(365.7)	$\hat{C}$	2622	2810	2946	3063	3172	3278	3382	3485	
	$\hat{V}$	0.009950	0.0127	0.0148	0.0166	0.0182	0.197	0.211	0.0225	
221.2 (Pr)	$\hat{P}$	2733	3020	3210	3370	3516	3655	3790	3923	
374.15 (Tr)	$\hat{C}$	2553	2776	2922	3045	3157	3265	3371	3476	
	$\hat{V}$	0.008157	0.0110	0.0130	0.0147	0.0162	0.0176	0.0190	0.0202	
250	$\hat{P}$	2582	2954	3166	3337	3490	3633	3772	3908	
(-)	$\hat{C}$	2432	2725	2888	3019	3137	3248	3356	3463	
	$\hat{V}$	0.006013	0.009174	0.0111	0.0127	0.0141	0.0143	0.0166	0.0178	
300	$\hat{P}$	2162	2826	3085	3277	3443	3595	3740	3880	
(-)	$\hat{C}$	2077	2623	2825	2972	3100	3218	3330	3441	
	$\hat{V}$	0.002830	0.006734	0.008680	0.0102	0.0114	0.0126	0.0136	0.0147	
500	$\hat{P}$	1878	2293	2723	3021	3248	3439	3610	3771	
(-)	$\hat{C}$	1791	2169	2529	2765	2946	3091	3224	3350	
	$\hat{V}$	0.001726	0.002491	0.003882	0.005112	0.006112	0.007000	0.007722	0.008418	
1000	$\hat{P}$	1798	2051	2316	2594	2857	3105	3324	3536	
(-)	$\hat{C}$	1653	1888	2127	2369	2591	2795	2971	3131	
	$\hat{V}$	0.001446	0.001628	0.001893	0.002246	0.002668	0.003106	0.003536	0.003953	