

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE PLANTA PILOTO DE VAPOR PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Gómez Sandoval, Daniel Leonardo (1) Riesco Avila, José Manuel (2)

1 Ingeniería Mecánica, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia | Dirección de correo electrónico: dlgomezs611@gmail.com

2 Departamento de Ingeniería Mecánica, División de ingenierías, Campus Irapuato- Salamanca, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: riesco@ugto.mx

Resumen

En el presente trabajo se muestra el balance exergético realizado a una planta de vapor para la generación de energía eléctrica ubicada en la Universidad ECCI Bogotá-Colombia. Para llevar a cabo el balance, se empieza con el análisis energético de la planta como sistema de control para determinar todos los estados termodinámicos de cada equipo involucrado, de este modo, se conocen las propiedades que son indispensables para conocer el trabajo útil máximo en los flujos especificados. Por medio del balance exergético se puede determinar las principales fuentes de irreversibilidades e ineficiencias de la planta. El análisis muestra si los equipos de la planta están operando en excelentes, buenas o en malas condiciones, dependiendo de su función principal. Se concluye con unos planteamientos teóricos que podrán ayudar a mejorar el rendimiento de cada uno de los equipos o la necesidad de adquirir un equipo, todo con el fin de contribuir a la mejora del rendimiento total del sistema, sin llegar a realizar modificaciones físicas a la planta de generación de vapor.

Abstract

In this work the exergy balance carried out to a steam plant for power generation located at the University ECCI Bogota-Colombia is shown. To carry out the balance, you start with the energy analysis of the plant and control system to determine all the thermodynamic states of each equipment involved, thus, known the properties that are essential for the maximum useful work in the specified flows. Through the exergy balance can determine the main sources of irreversibilities and inefficiency of the plant. This analysis show if the equipments of plant are operating in excellent, good or bad conditions, depending on their main function. It concludes with a theorists approaches that may help improve the performance of each of the equipment or the need to purchase equipment, all in order to contribute to the improvement of overall system performance, without to make physical modifications to the steam generation plant.

Palabras Clave

Energía; Exergía; Irreversibilidades; Eficiencia.

INTRODUCCIÓN

Los conceptos de la termodinámica destacaron importancia en los balances de energía, entropía y flujos de masa en un sistema termodinámico. Al realizar estos balances se pudo conocer la eficiencia de una planta de generación de vapor, manipulando la energía neta producida y la tasa de calor generada en la combustión. Al evaluar la eficiencia térmica, se llegó a la conclusión de contribuir con el aumento de ésta, lo que posteriormente ayudaría en un ahorro económico.

Una planta térmica es un montaje de equipos que produce energía eléctrica a partir de la combustión de ACPM en una caldera que es diseñada para esto. El combustible se almacena en depósitos, donde se suministra a la central, pasa por la caldera, en la que se provoca la combustión. La caldera genera vapor a partir del agua que circula por una red de tuberías que recubren las paredes de esta. El vapor hace girar los alabes de la turbina adiabática, cuyo eje rotor gira solidariamente con el de un generador que produce energía eléctrica; esta energía se transporta a los centros de consumo. Por su parte, el vapor es enfriado en un condensador por medio de una torre de enfriamiento encargada de llevar la fase de vapor de agua a la de agua líquida o mezcla saturada, el agua retorna a la bomba hidráulica para comenzar de nuevo el ciclo [1].

La temperatura promedio a la que el calor es transferido hacia el vapor puede ser incrementada sin aumentar la presión de la caldera. Sin embargo, la temperatura en la caldera y entrada de la turbina sufre una variación, siendo $T_4' > T_4$. En este caso el trabajo del ciclo aumenta, dado que el calor neto del ciclo aumenta con la temperatura máxima del ciclo, de la misma manera que aumenta el trabajo neto del ciclo.

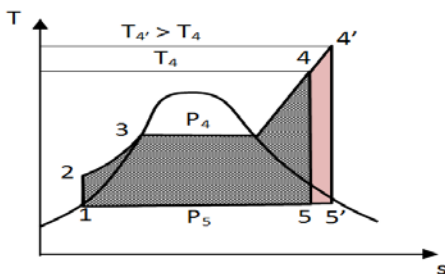


IMAGEN 1. Diagrama T-s para el efecto del sobrecalentamiento de vapor.

El rendimiento del ciclo aumenta claramente cuanto mayor es la temperatura en la caldera y entrada de la turbina. Además del aumento del rendimiento, observamos que $x_{5'} > x_5$, es decir, la calidad del vapor a la salida de la turbina aumenta. Por lo tanto, al aumentar la temperatura en la caldera no sólo aumenta el rendimiento térmico del ciclo, sino también el rendimiento interno de la turbina [2].

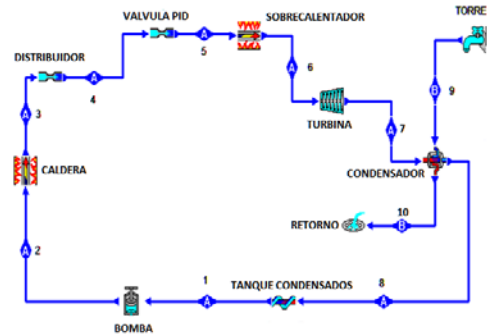


IMAGEN 2. Diagrama de la planta térmica de la Universidad ECCI, Bogotá - Colombia.

Exergía

El término exergía hace referencia a la disponibilidad de energía que se puede convertir en trabajo dentro de un sistema. La exergía se define como el trabajo máximo disponible que se puede obtener de un sistema que interactúa con su medio ambiente, hasta que llega a su estado de equilibrio con el medio ambiente, o también llamado estado muerto. En la energía mecánica y eléctrica toda la energía es exergía, pero en la energía térmica no es así, ya que hay una cantidad de irreversibilidad (exergía destruida). La irreversibilidad es la fracción de energía de la que no se puede obtener ningún trabajo útil.

Estado muerto o punto de equilibrio

Un sistema se dice que está en estado muerto cuando se encuentra en equilibrio termodinámico con el medio ambiente. En el estado muerto un sistema se encuentra a presión y temperatura ambiente (equilibrio térmico y mecánico), no posee energía cinética o energía potencial en relación con el medio ambiente (velocidad cero, elevación cero con respecto al nivel de referencia). Podemos concluir entonces que la exergía de un sistema en un estado muerto es cero, es decir ningún trabajo

puede ser producido a partir de un sistema que se encuentre en un estado muerto inicialmente.

Irreversibilidad y trabajo reversible

El **trabajo reversible W_{rev}** se define como la cantidad máxima de trabajo útil que puede producirse (trabajo mínimo que necesita ser proporcionado) cuando un sistema experimenta un proceso entre los estados inicial y final especificados. Este es el trabajo de salida útil (o entrada) obtenido (o gastado) cuando el proceso entre los estados inicial y final se ejecuta de una manera totalmente reversible. Cuando el estado final es el estado muerto, el trabajo reversible es igual a la exergía. Para procesos que requieren trabajo, el trabajo reversible representa la cantidad de trabajo mínima necesaria para llevar a cabo ese proceso.

Cualquier diferencia entre el trabajo reversible W_{rev} y el útil W_u , se debe a irreversibilidades presentes durante el proceso y esta diferencia se llama **irreversibilidad I** [3].

$$I = W_{rev,sal} - W_{útil,sal} \quad (1)$$

$$I = W_{útil,ent} - W_{rev,ent}$$

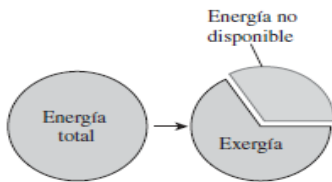


IMAGEN 3. Identificación de la exergía y la energía no disponible o irreversibilidad, en un sistema termodinámico.

Exergía para flujos estables

Se considera entonces un flujo másico estable en un estado definido por T_1 , P_1 y s_1 . El ambiente (estado muerto) está definido por los parámetros de equilibrio T_0 y P_0 .

Para obtener el máximo trabajo en el proceso de transición del estado del flujo hasta alcanzar el equilibrio (exergía), es necesario dividir este proceso en dos etapas: un proceso isentrópico reversible y un proceso isotérmico reversible, tal como muestra la siguiente figura:

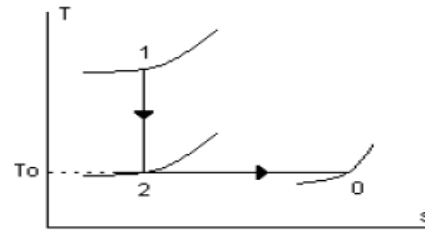


IMAGEN 4. Diagrama T-s que muestra la evolución de un estado termodinámico hasta el estado muerto.

Se tiene entonces que la exergía específica para un flujo de materia estable será:

$$W_{max} = (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (2)$$

Exergía para flujos de calor

$$\dot{X}_i = \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \quad (3)$$

Q_i = flujo de calor

T_0 = temperatura del estado muerto (ambiente)

T_m = temperatura del medio que transfiere calor

Exergía para flujos químicos y eléctricos

Las energías cinética y potencial así como los flujos de naturaleza eléctrica y química son exergía pura, es decir, todo su potencial energético es capaz de convertirse en trabajo. [4]

Justificación

Cualquier intento por mejorar la eficiencia de un sistema es válido reconocerlo, puesto que los análisis de exergía permiten identificar donde hay pérdidas y ubicar los dispositivos menos eficientes en el estudio de un sistema cerrado, controlando el uso de los recursos empleados por dicho sistema. Además, cabe resaltar que la información suministrada por esta propuesta, puede utilizarse para rediseñar el sistema térmico a evaluar (Planta termoeléctrica), reducir las fuentes de ineficiencia o irreversibilidades presentes y determinar la viabilidad económica del sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología para llevar a cabo el análisis energético y balance exergetico se describe a continuación:

1. Realizar una descripción tanto del sistema como del proceso que va a estudiarse.
2. Dividir convenientemente el sistema en volúmenes de control.
3. Definir el estado muerto (ambiente del sistema).
4. Realizar las idealizaciones necesarias (energía cinética y potencial son despreciables).
5. Calcular los flujos de masa y de energía por medio de un análisis de Primera Ley.
6. Calcular los flujos de exergía y la destrucción de exergía en cada componente.
7. Definir y calcular las eficiencias exergeticas y otros parámetros de evaluación de cada componente.
8. Elaborar un diagrama de flujo exergetico.
9. Identificar la ubicación y magnitud de los principales sumideros de exergía [5].

Trabajo útil máximo (exergía)

Para realizar un balance exergetico a cada uno de los equipos involucrados en la planta termoeléctrica, es necesario conocer los distintos flujos que intervienen en su proceso. En la imagen 5 se muestran los flujos de la planta térmica de la Universidad ECCI ubicada en Bogotá-Colombia.

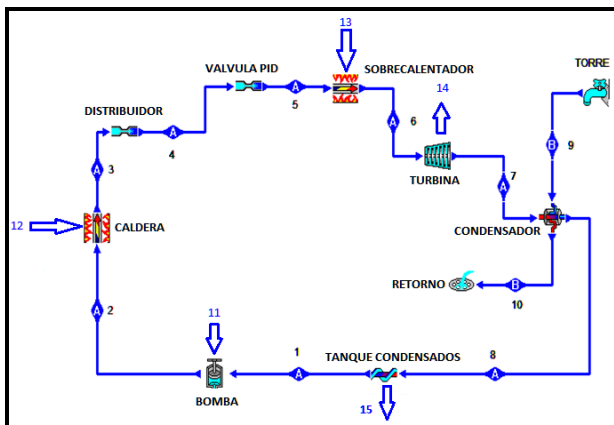


IMAGEN 5. Diagrama de la Planta con sus flujos identificados, cortesía de CyclePad.

La exergía para flujos de agua y vapor se calcula por medio de la ecuación 2, la exergía para flujos de calor con la ecuación 3 y la exergía para flujos eléctricos es el mismo trabajo que se consume o se genera, ya que todo trabajo es exergía pura. Para ello, es necesario conocer los flujos másicos que interactúan con la planta, en la imagen 5 se puede notar que hay dos flujos (A y B), donde A es el flujo másico de vapor para la generación de energía en el ciclo de potencia y B, es el flujo másico de agua empleado para el enfriamiento del vapor en el intercambiador de calor (condensador).

A continuación se muestra el cálculo para el flujo másico de vapor que atraviesa la válvula PID (válvula de placa y orificio con un sensor electrónico y actuador neumático para la apertura o cierre de la misma) entre los estados 4 y 5 según la imagen 5.

$\dot{m}_{vapor} = 1.265 \cdot Y \cdot d^2 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{v}}$	
Presion atmosferica (mmHg)	560
Presion atmosferica (kPa)	74,7
Diametro tuberia (in)	3/4
Diametro tuberia D (m)	0,01905
Diametro orificio d (m)	0,0105
Presion 1 (barg)	8,05
Presion 1 (kPa)	879,66
Presion 2 (barg)	7,09
Presion 2 (kPa)	783,66
Diferencial de Presion (kPa)	96,00
Diferencial de presion (Pa)	96000,0
Relacion calor especifico γ (cp/cv)	1,3
Relacion diametro B	0,55
Relacion de presiones	0,11
Factor de expansion Y	0,965
Coefficiente de flujo	0,623
Volumen especifico (m ³ /kg)	0,23350
Flujo masico de vapor (kg/s)	0,05376

$\Delta P = P_1 - P_2$
 $\beta = d/D$
 $R = \Delta P/P_1$

IMAGEN 6. Cálculo del flujo másico de vapor por medio de la técnica de presión diferencial en las válvulas placa y orificio. [6]

Balance exergetico

El balance de exergía permite descifrar la exergía consumida (Dispositivos consumidores de trabajo), la exergía generada (Dispositivos generadores de trabajo) y la exergía destruida en cada uno de los procesos involucrados.

A modo de ejemplo, se mostrará el balance exergetico para la turbina y para el condensador.

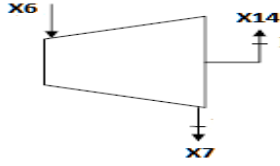
Turbina.

$$\dot{X}_{ent} = \dot{X}_{sal}$$

$$\dot{X}_6 = \dot{X}_7 + \dot{X}_{14} + \dot{X}_D$$

$$\dot{X}_D = \dot{X}_6 - \dot{X}_7 - \dot{X}_{14}$$

(4)



La exergía destruida para la turbina se calcula también de la siguiente manera:

$$\dot{X}_D = \dot{W}_{rev} - \dot{W}_{real} \quad (5)$$

La eficiencia por la segunda ley de la termodinámica (calidad de la energía) se calcula por la siguiente ecuación:

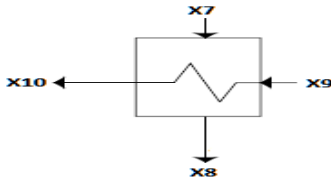
$$\eta_x = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{W}_{rev}} \quad (6)$$

La eficiencia del potencial de trabajo máximo en la turbina se calcula así:

$$\eta_p = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{X}_{ent}} \quad (7)$$

Condensador.

$$\begin{aligned} \dot{X}_{ent} &= \dot{X}_{sal} \\ \dot{X}_7 + \dot{X}_9 - \dot{X}_D &= \dot{X}_8 + \dot{X}_{10} \\ \dot{X}_D &= \dot{X}_7 + \dot{X}_9 - \dot{X}_8 - \dot{X}_{10} \end{aligned} \quad (8)$$



La exergía del calor rechazado por el condensador se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{rec} = \dot{X}_7 - \dot{X}_8 \quad (9)$$

La exergía del calor absorbido por la torre de enfriamiento se halla por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{X}_{10} - \dot{X}_9 \quad (10)$$

La eficiencia exergética, al igual que en la turbina, se basa en lo que se aprovecha sobre lo que se tiene, cambiando el trabajo de la ecuación 6 por la tasa de transferencia de calor.

$$\eta_x = \frac{\dot{Q}_{abs}}{\dot{Q}_{rec}} \quad (11)$$

Los datos del estado muerto (ambiente) fueron tomados según la temperatura y presión mostrada en la carta psicrométrica de Bogotá-Colombia.

Costo del kWh generado

Para determinar el costo del kWh generado de energía, se emplea la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\dot{V}_{ACPM} \cdot C}{\dot{W}_G} \quad (12)$$

En el numerador, el flujo volumétrico (gal/h) por el costo del combustible (\$/gal) y en el denominador, la potencia generada por el generador eléctrico (kW).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor de la potencia generada por la turbina obedece a la máxima carga (7 bombillos encendidos 1300 W). Aquí ya se puede observar que el generador eléctrico tiene una eficiencia, ya que al encender las 7 cargas, está generando una potencia de 1143 W. Esta potencia generada junto con los 4,517 gal/h que consume de combustible y un precio por galón de \$7275.2 COP, muestra que la planta consume **\$28760.4 COP por kWh generado**.

Con el fin de mostrar los resultados esperados, la Tabla 1 muestra la exergía en cada uno de los flujos especificados en la imagen 5.

Tabla 1. Trabajo útil máximo (exergía) en los flujos de la planta térmica.

# de flujo	Exergía específica (kJ/kg)	Exergía (kW)
1	1,9875	0,10685228
2	3,3867041	0,182076505
3	849,8534	45,68994907
4	846,9434	45,5335012
5	832,3934	44,75126187
6	798,5634	42,93248821
7	537,8734	28,91723237
8	340,391351	18,30017209
9	0,5203	0,389627776
10	3,4849	2,609674872
11	NA	0,1065
12	42932763,3	174,36
13	NA	2
14	NA	1,1427
15	NA	19,2862

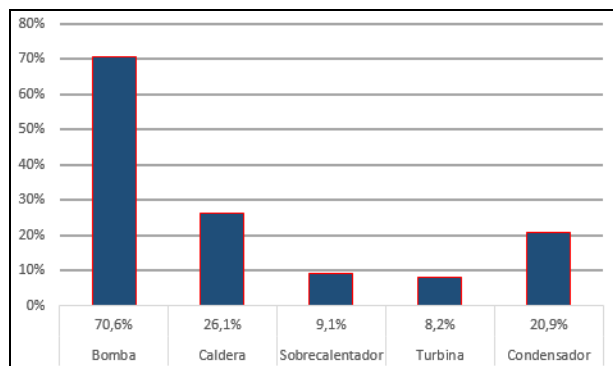
A partir de los datos de exergía en cada uno de los flujos, se realiza el balance exergetico en cada uno de los procesos de la planta realizados por los volúmenes de control con flujo estacionario (el flujo másico que entra es igual al que sale en cualquier tiempo cronometrado y las propiedades termodinámicas no varían con el tiempo).

La Tabla 2 muestra los resultados del balance de exergía.

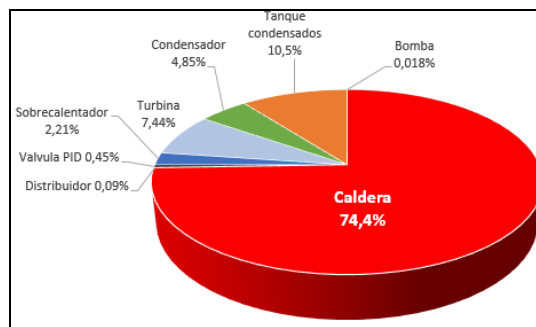
Tabla 2. Exergía destruida y eficiencia exergetica de los equipos de la planta térmica de la Universidad ECCI.

Equipo	Exergía destruida (kW)	Eficiencia exergetica (%)
Bomba	0,03129	70,6%
Caldera	128,853	26,1%
Distribuidor	0,1564	0
Válvula PID	0,7822	0
Sobrecalentador	3,8188	9,1%
Turbina	12,873	8,2%
Condensador	8,397	20,9%
Tanque condensados	18,1933	0

En cuanto a las eficiencias exergeticas, explican que los equipos no tienen el potencial para convertir en trabajo toda la exergía que entra a los volúmenes de control, por lo tanto, hay una cantidad de exergía que se pierde al ambiente en forma de calor. La grafica 1 y 2 muestran el resultado del potencial de trabajo y las irreversibilidades o exergía destruida presentes en cada uno de los volúmenes de control (equipos y accesorios) respectivamente.



Gráfica 1. Eficiencia exergetica de los equipos de la planta térmica.



Gráfica 2. Porcentaje de irreversibilidades (exergía destruida) en los procesos termodinámicos de la planta térmica.

CONCLUSIONES

La eficiencia del ciclo es muy baja, esto se debe a que la energía consumida en la combustión y por las resistencias eléctricas, no es totalmente aprovechada para generar trabajo por parte de la turbina. Cabe considerar que la planta fue construida para fines didácticos y no se consideró invertir en una turbina con mayor capacidad para generar trabajo.

La turbina en su más alto rendimiento puede generar 4.8 kW de energía, pero, debido al calor que se escapa en forma de vapor al ambiente, hace que posea la menor eficiencia exergetica de la planta. Estas pérdidas se pueden observar por la nube de vapor que se forma en la turbina, las malas operaciones han arruinado los sellos hidráulicos del eje-rotor. Ver Grafica 2.

La caldera es la mayor fuente de exergía destruida debido a que la exergía generada por la combustión es aprovechada en un 26% para generar vapor. La exergía destruida se ve reflejada en los gases de combustión que se escapan al ambiente sin ser utilizados para generar trabajo (exergía 0). Ver Grafica 1.

Los gases de combustión podrían ser utilizados para sobrecalentar el vapor a una temperatura más alta a la de la salida del vapor saturado, ya que el sobrecalentador, en vez de aprovechar el calor generado por las resistencias, lo está desperdiciando en un 91%. Ver Tabla 2.

También, se podría pensar en un economizador para precalentar el agua de alimentación a la caldera, dependiendo en que la cantidad de gases que intervienen en el sobrecalentamiento de vapor

no disminuyan demasiado la temperatura a la hora de salir por la chimenea, con el fin de prevenir gases nocivos para la salud y el medio ambiente.

El tanque de condensados actúa como un segundo condensador, la diferencia es que este está rechazando calor sin ser aprovechado para alguna aplicación en específico. Es por esto que es la segunda fuente de irreversibilidades con una eficiencia exergética del 0%.

Al tanque llegan todos los condensados durante el funcionamiento de la planta, cuando la planta se apaga, este calor se pierde al ambiente, dejando que el agua en su interior llegue a las condiciones del estado muerto. Este mismo calor puede ser empleado para precalentar el agua de alimentación a la caldera (economizador).

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor José Manuel Riesco Ávila por su asesoría durante la estancia en los veranos UG.

Un especial agradecimiento a mi tutor en Colombia Vladimir Silva Leal, quien, por su apoyo y su fe puesta en mí, hizo este trabajo posible.

REFERENCIAS

- [1] R. A. García Mauricio, «Centrales Eléctricas,» 19 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/paginaprincipal.html>. [Último acceso: 9 Junio 2016].
- [2] S. F. Paredes, «ANÁLISIS TERMODINAMICO DE LOS CICLOS DE RANKINE,» Universitat Politècnica de Catalunya, 8 Abril 2015. [En línea]. Available: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/25938/TFG%20Sergi%20Fuste.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 10 Junio 2016].
- [3] M. A. B. Yunus A. Çengel, «Exergía: Una medida del potencial de trabajo,» de Termodinámica, México, D.F., McGraw-Hill, 2012, pp. 427-489.
- [4] P. J. C. C. LUIS ALBERTO GONZALEZ PEREZ, «Análisis exergético de la planta térmica de la escuela de ingeniería mecánica,» Universidad Industrial de Santander, 17 Noviembre 2009. [En línea]. Available: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/5876/2/132371.pdf>. [Último acceso: 10 Junio 2016].
- [5] División de ingeniería CRANE, «Flujo de Fluidos en Válvulas y Accesorios,» de Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías, México, McGraw-Hill, 1992, pp. 23-42.