

Celdas de combustible

Una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo xxi

Francisco Acuña Garrido*, Ventura Muñoz Yi**

Resumen

Este artículo trata sobre la utilización en un futuro próximo de las celdas de combustible como fuente de generación de potencia; así como también de su forma de operación, su eficiencia y rendimiento, previa descripción de la misma.

Palabras claves: Celda, combustible, electrodos, electrolito, iones, catalizadores, oxidante, eficiencia, rendimiento.

Abstract

This article speaks about the fuel cells as power generation sources in a next future; like wise of its operation way, efficiency and performance, previous description about itself.

Key words : Cell, fuel, electrodes, electrolyte, ions, catalyts, oxidezer, efficiency, performace.

Fecha de recepción: 20 de abril de 2001

INTRODUCCIÓN

La energía en uno de los grandes soportes para el desarrollo de la humanidad y el mejoramiento de la calidad de vida. La energía no es un fin en sí mismo, sino un medio para alcanzar la meta del desarrollo humano sostenible. Antes se creía que el crecimiento económico iba ligado al consumo de energía; sin embrago, cada vez más es posible tener crecimiento con menor consumo de energía, como lo muestra la experiencia de Estados Unidos de América, el Japón y la Unión Europea.

*Ingeniero Mecánico; Diplomado en Educación Universitaria y Diplomado en Gestión Ambiental. Profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Mecánica. Miembro del Grupo de Investigación Gas Natural y Termodinámica. (facuna@uninorte.edu.co).

**Ingeniero Mecánico; M.Sc en Ingeniería Ambiental. Profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Mecánica.

Hoy en día nadie desconoce el deterioro de la capa de ozono, escudo natural de nuestro planeta contra la radiación ultravioleta, así como también el calentamiento paulatino debido al efecto invernadero, causado principalmente por los gases de combustión emitidos por las plantas generadoras de potencia y por el parque automotor en todos los países. La gran mayoría de estos focos de contaminación quemar combustibles de origen fósil para su funcionamiento. Sin embargo, los yacimientos de los cuales se extraen a la vuelta de algunas décadas se agotarán.

Durante más de veinte años los países desarrollados han tratado de desarrollar fuentes más limpias de energía eléctrica. Actualmente se está tratando de hacer uso de las Celdas de Combustible en la generación de potencia tanto a gran escala como a pequeñas aplicaciones; ya que ellas sólo se usan en los dispositivos espaciales como fuente de generación de potencia debido a su alto costo para ser empleadas en aplicaciones comerciales ordinarias.

1. QUÉ ES UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible son aparatos electroquímicos análogos a las baterías convencionales: ambos poseen electrodos positivos y negativos y un electrolito. Sin embargo, a diferencia de las baterías, que pueden suministrar potencia sólo por un tiempo definido, luego del cual hay que recargarlas o remplazarlas, la celda de combustible—gracias a que absorbe nuevos suministros de combustible permanente—puede operar continuamente, es decir, produce electricidad mientras esté siendo alimentada con combustible y oxidante.

Una *celda de combustible* es un sistema de flujo estable, en el cual el combustible y el oxidante se suministran desde una fuente externa que provee un medio de transformar energía química en eléctrica, sin combustión y sin contaminar el aire ni el agua, en un proceso continuo y directo mediante reacciones de reducción y oxidación en presencia de un catalizador, y elimina los productos de la reacción. De manera ideal, no hay cambio en la composición química del electrolito o de ambos electrodos (ver figuras 1 y 2).

La reacción química que ocurre en la celda de combustible es isotérmica y continua. Las celdas de combustión no están limitadas por el Principio de Carnot, por lo que pueden alcanzar una mayor eficiencia teórica en la conversión de energía, mientras que las reacciones de combustión involucran grandes variaciones de temperatura, lo cual genera energía como calor o calor y trabajo. Las pérdidas excesivas que se producen en los sistemas de conversión de energía de varias etapas pueden evitarse mediante el uso de celdas de combustible que hacen la conversión en un proceso de una sola etapa.

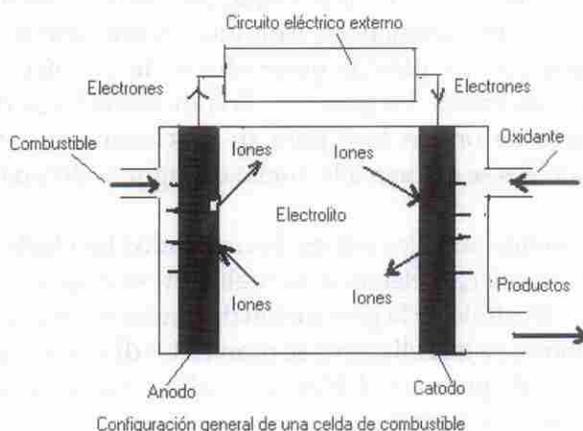


Figura 1. Configuración general de una celda de combustible

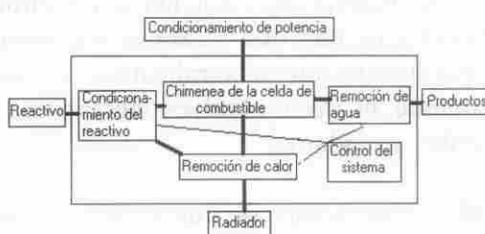


Figura 2. Sistema completo de la celda de combustible

2. OPERACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

En una celda de combustible, el combustible y el oxidante reaccionan isotérmicamente, por lo cual se produce una reacción en cada electrodo por separado. Una reacción ocurre en la superficie de un electrodo que ioniza el combustible y manda los electrones liberados a un circuito eléctrico externo, y en la superficie del otro electrodo ocurre una reacción que recibe electrones del circuito externo que cuando se combinan con el oxidante crean iones. Los iones se combinan en el electrolito para completar la

reacción total. El electrolito, que no es conductor eléctrico, transporta los iones entre los electrodos, para completar el circuito y continuar con el flujo de electrones.

Una celda de combustible está constituida por las siguientes partes:

- Los **electrodos**. El *ánodo*, que suministra los electrones al circuito externo, y el *cátodo*, que los recibe del circuito externo. Los electrodos separan al combustible y al oxidante del electrolito, y están hechos de materiales porosos para incrementar el área sobre la cual ocurre la reacción.
- El **electrolito**. El tipo de electrolito usado clasifica a las celdas de combustible, y determina el flujo de iones y la temperatura de operación de la celda; puede ser ácido, transportando iones positivos H^+ , o alcalino, transportando iones negativos OH^- . Puede ser, además de acuoso, líquido y también sólido, que son los adecuados para celdas que funcionen a elevadas temperaturas (ver tabla 1).

Tabla 1
Tipos de celdas de combustible

Tipo	Electrolito	Temperatura de operación (°C)	Características especiales	Aplicaciones
Celda de combustible alcalina (AFC)	Solución de hidróxido de potasio diluido	60 a 120	Alta eficiencia, adecuada sólo para el hidrógeno puro y el oxígeno.	Sistemas espaciales, sistemas de defensa
Celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM)	Membrana polímero conductora de protones	20 a 120	Comportamiento de la operación muy flexible, densidad de alta potencia	Vehículos, generación descentralizada de electricidad (plantas pequeñas)
Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC)	Acido Fosfórico	160 a 220	Eficiencia limitada, problemas de corrosión	Generación de electricidad descentralizada, potencia y calor combinados
Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC)	Carbonatos diluidos	600 a 650	Control de proceso complejo, problemas de corrosión	Generación de electricidad centralizada y descentralizada, potencia y calor combinados
Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)	Bióxido de Zirconio sólido	850 a 1000	Potencia eléctrica directa del gas natural , tecnología de cerámica (altas temperaturas)	Generación de electricidad centralizada y descentralizada calor y potencia combinados

Fuente: JONES, J.B. DUGAN, R.E. *Ingeniería Termodinámica*. México, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997, p. 864.

- El **combustible**. Los combustibles utilizados en las celdas de combustibles son el hidrógeno, el **gas natural**, hidrocarburos ligeros, etc. (ver tabla 2); sin embargo, el hidrógeno gaseoso es el único que podría ser el de mayor aplicación. El hidrógeno tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible, y en caso de accidente se dispersa rápidamente. Cuando reacciona con el oxígeno en la celdas de combustible, éste puede producir electricidad directamente, y puede sobrepasar los límites de eficiencia del ciclo de Carnot obtenidos en la actualidad en plantas termoeléctricas. El hidrógeno puede producirse de una gran variedad de fuentes de energía, tales como: Electrólisis del agua, **gas natural**, la biomasa, etc., y se puede almacenar de diferentes maneras, como gas comprimido, licuado a muy bajas temperaturas, como compuesto líquido (metanol, amoníaco) o como un sólido en forma de hidruro metálico.

Otros combustibles no son tan reactivos, por lo cual requieren catalizadores metálicos; o son tóxicos, y por tanto inseguros. En las celdas de combustible utilizadas como fuente de energía móvil, el uso de metano o metanol, en lugar de hidrógeno puro, reduce drásticamente el volumen de almacenamiento para un rango de operación requerido.

Tabla 2
Funcionamiento teórico de la Celda de Combustible

Reacción de la celda	$-\Delta H$ kJ/kgmol	$-\Delta G$ kJ/kgmol	h_{celda}	V voltios
$H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \Rightarrow H_2O_{(l)}$ a 298K a 1000K	286010 -	237327 -	0.830 -	1.229 -
$H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \Rightarrow H_2O_{(g)}$ a 298K a 1000K	241971 247856	228729 175940	0.945 0.777	1.184 0.998
$CO_{(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \Rightarrow CO_{2(g)}$ a 298K a 1000K	283161 282796	257405 195797	0.909 0.692	1.333 1.014
$C_{\text{(grafito)}} + O_{2(g)} \Rightarrow CO_{2(g)}$ a 298K a 1000K	393757 394828	394631 396042	1.002 1.003	1.002 1.026
$C_3H_{8(g)} + 5 O_{2(g)} \Rightarrow$ $3CO_{2(g)} + 4H_2O_{(g)}$ a 298K a 1000K	2044884 2046558	2075023 2149953	1.015 1.051	1.075 1.124

Fuente: BURGHARDT M., David. *Ingeniería Termodinámica*. México, Harla, 1984, p. 329.

- **Catalizadores.** La tecnología de las celdas de combustibles fue en sus principios limitada por los catalizadores, ya que en las celdas de combustibles de baja temperatura que usan electrolitos acuosos se requerían metales nobles caros, tales como el platino, para aumentar la velocidad de la reacción en los electrodos.
- **Oxidante.** Aunque el oxígeno es el gas oxidante, no es necesario utilizarlo puro, ya que para muchas de las aplicaciones se usa el aire como el oxidante.

3. ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

El trabajo máximo que puede producir un sistema de flujo estable con una sustancia que entra y sale del mismo a la temperatura de la atmósfera de sus alrededores e intercambia calor sólo con la atmósfera es igual al decremento en la energía libre de Gibbs (G) de la sustancia.

$$W_{m\acute{a}x} = -\Delta G$$

$$\Delta G = G_2 - G_1 = \sum N(\overline{\Delta g_{f,ref}^{\circ}} + \overline{g_2} - \overline{g_{ref}^{\circ}})_{productos} - \sum N(\overline{\Delta g_{f,ref}^{\circ}} + \overline{g_1} - \overline{g_{ref}^{\circ}})_{reactivos}$$

El cambio de entalpía que corresponde a la reacción en la celda es:

$$\Delta H = \sum N(\overline{\Delta h_{f,ref}^{\circ}} + \overline{h_2} - \overline{h_{ref}^{\circ}})_{productos} - \sum N(\overline{\Delta h_{f,ref}^{\circ}} + \overline{h_1} - \overline{h_{ref}^{\circ}})_{reactivos}$$

Donde el subíndice *ref* y el superíndice $^{\circ}$ indican la temperatura y la presión, respectivamente, del estado de referencia. Los valores de $\overline{\Delta g_{f,ref}^{\circ}}$ y $\overline{\Delta h_{f,ref}^{\circ}}$ se encuentran en las tablas de las propiedades termodinámicas de las sustancias. El calor transferido puede ser mayor que, igual a, o menor que cero, dependiendo de las magnitudes relativas de ΔG y ΔH .

Las celdas de combustible no operan cíclicamente e intercambian calor y trabajo sólo con los alrededores, por lo que no se puede definir un parámetro de rendimiento para ellas como eficiencia térmica que sólo involucra transferencia de calor y trabajo.

4. EFICIENCIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

El parámetro de rendimiento de operación en las celdas de combustible es:

$$\eta \equiv \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

el cual es llamado **eficiencia de la celda de combustible**, que puede ser mayor, igual, o menor que 1. Cuando h es igual a 1, indica que el $W_{m\acute{a}x}$ supera el decrecimiento en la entalpía de la corriente que pasa a través de la celda; por lo tanto, existe transferencia de calor desde los alrededores hacia la celda.

El trabajo por unidad de carga realizado por las celdas de combustible puede calcularse a partir de la carga C a través del circuito externo y la *fem* terminal o voltaje V de la celda.

$$W_{m\acute{a}x} = F \cdot Nj^o \cdot V$$

Donde:

F : Constante de Faraday ($96,487 \times 10^6$ C/kmol de electrones o $96,487$ kJ/V.kmol de electrones.

N : Número de moles de reactivos que tienen una valencia j .

V : Voltaje terminal de la celda.

En una celda ideal, el voltaje terminal está dado por:

$$V_i = \frac{\Delta G}{F \cdot Nj}$$

En una celda de combustión real no se puede obtener este valor, ya que factores como la resistencia interna de la celda y otros efectos lo hacen imposible.

5. RENDIMIENTO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustibles reales no tienen un rendimiento como el de las ideales, ya que varios factores lo imposibilitan:

- **Área de la superficie de interfase en los electrodos.** En una celda de combustible real, el transporte de combustible, oxidante, electrolito y productos hacia y desde las superficies de los electrodos es, además de complejo, problemático. Para proporcionar una gran área de superficie se utilizan electrodos porosos para la interfase de los fluidos. Sin embargo, si entra mucho líquido o demasiado gas al electrodo puede desplazar a la otra fase del fluido, lo cual reduce el área de interfase entre las fases e impedir la reacción.
- **Concentración del producto.** Las concentraciones de productos se incrementan por la reacción, lo cual reduce la concentración de los reactivos en la zona de reacción, y esto, a su vez, retrasa la misma, pero se soluciona agitando los fluidos.

- **Difusión de especies químicas en la superficie del electrodo.** Los gradientes de concentración de las especies químicas originan la difusión, la cual se mantiene en la interfase del electrodo por la quimiabsorción, que requiere de una energía de activación para ser iniciada, lo cual reduce el trabajo de la celda.
- **Impedancias eléctricas en la celda de combustible.** La impedancia que aparece asociada al flujo de electrones en el proceso de difusión en la superficie del electrodo y las resistencias óhmicas en otros sitios de la celda reducen la *fem* terminal y el trabajo de la celda.
- **Reacciones adicionales.** Las reacciones químicas y electroquímicas parásitas que tienen lugar en varios lugares de la celda también afectan su rendimiento.
- **Misceláneos.** Otras pérdidas resultan de la filtración de corriente eléctrica y de fluidos.

El rendimiento de una celda de combustible real se aproxima al de una celda ideal bajo condiciones de muy baja corriente más que bajo las condiciones de diseño, ya que la mayor parte de las pérdidas relacionadas con los factores mencionados aumentan con el incremento de la corriente.

CONCLUSIONES

Las plantas de potencia de celdas de combustión a gran escala tienen varias ventajas de diferentes índole con respecto a las plantas convencionales de combustibles fósiles. Una celda de combustión funciona como un convertidor directo de energía y no como máquina térmica.

La eficiencia de un sistema de celdas de combustión está relacionada en forma directa con la eficiencia de las celdas individuales; esto es, que el tamaño de la planta no afecta la eficiencia.

Una de las ventajas importante de estas plantas es su capacidad para responder con rapidez ante las fluctuaciones de la carga.

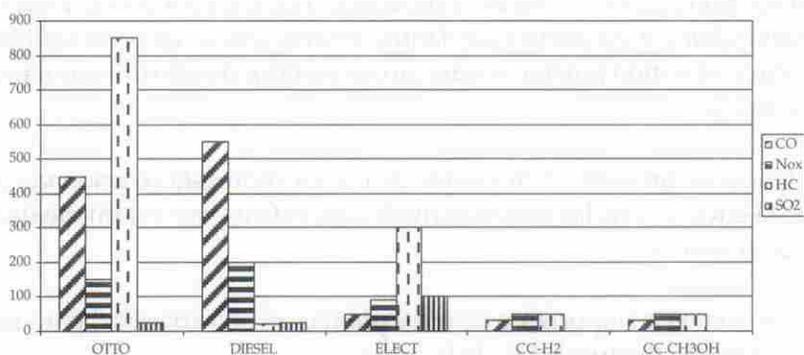
Las emisiones de óxido de azufre y óxido de nitrógeno de la planta son extremadamente pequeñas, ya que no se lleva a cabo un proceso de combustión directa.

No es necesario expulsar grandes cantidades de energía térmica de desperdicio hacia el ambiente, por lo que no se requieren grandes cantidades de agua de enfriamiento, con lo cual **desaparecen los problemas de contaminación térmica ambiental.**

Algunos tipos de celda de combustible necesitan expulsar algo de calor de desperdicio, la cual puede emplearse para producir agua caliente que algún proceso alterno demande.

La celda de combustión desempeñó un papel importante en la década de los sesenta como fuente de potencia de los vuelos espaciales tripulados. Se espera que en el futuro próximo el sistema de celdas de combustible evolucione para contribuir de manera importante en la producción de potencia en las plantas de potencia comerciales a gran escala.

En la actualidad se está haciendo un esfuerzo por desarrollar un tipo de celda que emplee hidrocarburo convencional como fuente de energía y aire como fuente de oxígeno. Si el esfuerzo llega a ser fructífero, es posible que se lleguen a constituir en las unidades de potencia de los vehículos del futuro, lo cual **reduciría significativamente el problema de la contaminación ambiental** (ver figura 3), ya que los fabricantes de automóviles parecen estar dispuestos a cambiar la idea de automóviles eléctricos por los que usen celdas de combustibles, y es así como la *Ford* y *Daimler-Chrysler*, junto con *Sistemas Ballard Power* – líder en el desarrollo de combustibles– proveerán a California de más de 40 autos y buses alimentados con celdas de combustible entre 2000 y 2003. *Shell*, *ARCO* y *Texaco* están planeando desarrollar la tecnología y la infraestructura para el empleo de metanol y gasolina como fuente del combustible de hidrógeno.



OTTO: Encendido por chispa
 DIESEL: Encendido por compresión
 ELECTRI: Vehículo eléctrico
 CC-H₂: Celda de combustible de Hidrógeno
 CC-CH₃OH: Celda de combustible de Metanol.

Figura 3. Cuadro comparativo de emisiones contaminantes (mg/km)

Fuente: JONES, J.B. DUGAN, R.E., *op. cit.*, p. 861.

Las celdas de combustible de hidrógeno presentan la dificultad de almacenar combustible de hidrógeno para aplicaciones automotrices (ver figura 4); y comprimido no brinda un rango satisfactorio. Así mismo, es difícil manejar hidrógeno líquido.

Energy Conversion Devices (ECD), de Troy (Michigan), desarrolló el sistema *Ovonic* para almacenamiento de hidrógeno sólido. Una mezcla finamente pulverizada de níquel, cromo y vanadio forma un hidruro metálico que, a semejanza de una esponja, atrapa el hidrógeno. Extraer el gas es sencillo; tan solo con la aplicación de calor. La unidad de almacenamiento tiene el tamaño de un tanque convencional y almacena combustible suficiente para impulsar un automóvil por distancias que pueden ir desde 400 hasta 800 kilómetros.

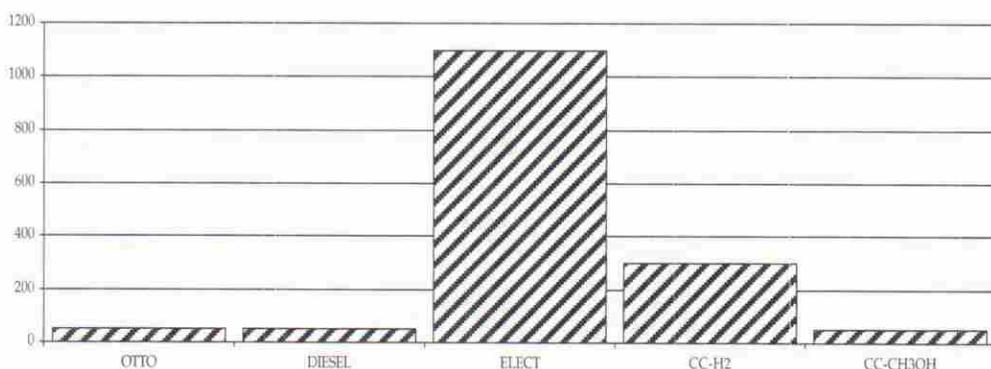


Figura 4. Volumen de almacenamiento (Litros / intervalo de 750 km)

Fuente: JONES, J.B. DUGAN, R.E., *op. cit.*, p. 861.

Además del ahorro en costos que representa el uso de las celdas de combustible, se producen beneficios ambientales. Gracias a esta tecnología, las emisiones de productos de ellas, ante todo dióxido de carbono y agua, son mucho más limpias. Este hecho ha llamado la atención de los administradores de la calidad del aire en muchos países. En algunos lugares ya se ha reglamentado de manera especial el uso de las celdas de combustible, en el sentido de que las exigencias relacionadas con la calidad del aire son menores, lo cual podría convertirse en factor preponderante en la decisión de instalar y operar una celda de combustible, especialmente en áreas donde ya no se expiden nuevos límites de emisiones o en los casos en que los niveles operacionales de emisión ya han sido excedidos.

Su utilización prácticamente no altera el medio ambiente, ya que su producción y descomposición incluye hidrógeno, oxígeno y agua.

Hasta la fecha, una de las tecnologías más promisorias ha sido la de las celdas de combustible combinadas con gasificador de carbón, las cuales convierten la energía química del carbón en energía eléctrica.

Los resultados de estudios recientes muestran que la eficiencia del parque térmico existente en el país tiene un promedio del 20-25%, que está muy por debajo de los niveles deseables; que para el caso de las tecnologías de conversión utilizadas se sitúan cerca del 30% y para los nuevos proyectos (tecnologías tradicionales) a gas en cerca del 50%. Con celdas de combustible con gasificador de carbón puede superarse el 80% y con gas natural el 85%.

Si los diferentes tipos de energía se usan de manera racional habrá muchas posibilidades de tener una sociedad de alta tecnología con relativamente bajo consumo de energía. La sociedad tiende a usar bienes y servicios más eficientemente, y los ahorros de energía han estado en las políticas de regulación, educación, aprovechamiento de mercados e investigación y desarrollo. Se requiere un nuevo paradigma para el desarrollo de los sistemas energéticos con más énfasis en el uso eficiente de la energía.

Bibliografía

- BURGHARDT, M. David. *Ingeniería Termodinámica. Celdas eléctricas de combustible*. 2ª ed. México, Harla, 1984.
- GRANET, Irving. *Termodinámica. Celdas de combustible*. 3ª ed. México, Prentice-Hall, 1988.
- HUANG, Francis F. *Ingeniería Termodinámica, fundamento y aplicación. Celdas de combustible*. 2ª ed. México, CECSA, 1997.
- JONES, J.B, DUGAN, R.B. *Ingeniería Termodinámica. Sistemas de conversión directa de energía*. México, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997.
- MECANICA POPULAR, volumen 52-10 y 53-11. Edición Colombia.
- WARK, Kenneth, Jr. *Termodinámica. Celdas de combustible*. 5ª ed. México, McGraw-Hill, 1991.