

## AQUECIMENTO EM FORNO DE MICROONDAS / DESENVOLVIMENTO DE ALGUNS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Ana Cláudia R. N. Barboza, Camila V. M. S. Cruz, Marcelo B. Graziani, Myrian C. F. Lorenzetti, Edvaldo Sabadini\*  
Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, CP 6154 13083-970 Campinas - SP

Recebido em 30/5/00; aceito em 28/5/01

HEATING IN MICROWAVE OVENS/ DEVELOPING OF BASIC CONCEPTS. The microwave oven became a common domestic equipment, due mainly to the short time spent to heat foods. One of the most interesting characteristics of the microwave oven is the selective heating. Different from the conventional oven, where the heating is not selective, the heating by microwave depends on the chemical nature of the matter. Many Students of Chemistry have no knowledge of the principles involved in this selective heating, in spite of the daily microwave oven use. The heating by microwave is feasible for chemistry courses. In discussions about the microwave absorption by the matter it is possible to explore chemical properties like: heat capacity, chemical bond, molecular structure, dipole moments, polarization and dielectric constant. This paper presents the basic principles involved in the microwave heating. It is proposed a simple and inexpensive experiment that could be developed in general chemistry courses, to illustrate the relationship between heating and the chemical properties of some solvents. Experiments to check the power of the microwave oven are also proposed.

Keywords: microwave oven; educational experiments; basic concepts.

## INTRODUÇÃO

O forno de microondas (MO) é um equipamento que passou a fazer parte da maioria dos lares nas duas últimas décadas. Talvez o ponto mais favorável na sua utilização, em relação ao fogão, está relacionado com o menor tempo requerido para efetuar o cozimento dos alimentos. Por exemplo, uma batata pode ser cozida em aproximadamente 8 minutos, enquanto que seriam requeridos 45 minutos em um forno convencional<sup>1</sup>. Em laboratórios de química o forno de MO pode ser utilizado para auxiliar em trabalhos rotineiros, tais como: preparo de amostras analíticas, esterilização de materiais, secagem de vidrarias etc. Em muitos casos o equipamento utilizado não é um forno doméstico, mas sim projetado para atender as necessidades requeridas<sup>2</sup>.

Um dos mais interessantes aspectos relacionados com o forno de MO é o aquecimento seletivo. Diferente do forno elétrico ou de combustão, onde todos os corpos que estão no interior do forno sofrem aquecimento, no forno de MO o aquecimento dependerá do material presente no seu interior (dependerá fundamentalmente da constante dielétrica e da frequência de relaxação do material). Assim, é comum observar que partes do recipiente que contém o alimento recém aquecido no forno de MO, mas que não estão em contato direto com o mesmo, continuam na temperatura próxima à do ambiente.

Os princípios envolvidos no aquecimento por MO, envolve conceitos químicos, como: temperatura, capacidade calorífica, ligação química, estrutura molecular, momento de dipolo, polarização, constante dielétrica etc<sup>1</sup>. Apesar de ser um equipamento conhecido pela maioria dos alunos de química, muitos não conhecem os princípios envolvidos no aquecimento por MO. Como o número de trabalhos relacionados com este tema, na área de ensino é reduzido, procuraremos neste trabalho, apresentar os conceitos fundamentais sobre a interação de MO com a matéria e um experimento simples (desenvolvido dentro de um projeto do laboratório de ensino de Físico-Química), que permite determinar a potência de um forno de MO e relacionar os efeitos térmicos com as propriedades de alguns sol-

ventes. Assim experimentos semelhantes ao proposto poderiam ser desenvolvidos, considerando que o valor de um forno de MO é relativamente baixo (menor que US\$ 200,00) e que muitas escolas os possuem.

## Funcionamento de um forno de microondas

O “coração” do forno de MO é uma válvula (*magnetron*) que gera MO. Ela consiste de um dispositivo sob vácuo, que converte energia elétrica em MO. Uma diferença de potencial constante é aplicada entre o ânodo (que é um cilindro circular oco) e o cátodo. Os elétrons são acelerados do cátodo para o ânodo, mas a presença de um forte campo magnético (produzido por um eletro-ímã colocado entre os dois pólos) faz com que os elétrons descrevam uma trajetória curva e sigam um caminho em espiral, produzindo radiofrequência (RF). Posteriormente, por um mecanismo mais complexo, ocorrerá a emissão de ondas eletromagnéticas por uma antena colocada diretamente sobre o ânodo. As ondas produzidas serão guiadas por um guia de onda até a cavidade contendo o material a ser aquecido. As paredes metálicas do forno absorvem muito pouco da energia. A maior parte é refletida e dissipada em um dispositivo (*dummy load*), que evita que as MO danifiquem a válvula<sup>3</sup>. Um esquema de um forno de MO está apresentado na Figura 1.

## Relação entre as propriedades macroscópicas e moleculares das substâncias dielétricas

Do ponto de vista clássico, o aquecimento de um material devido à irradiação por MO é devido à interação da onda eletromagnética com o dipolo elétrico da molécula. O aquecimento de uma substância em um forno de MO, pode ser simplificado entendido, fazendo-se uma analogia ao que acontece com as moléculas quando submetidas à ação de um campo elétrico. Quando o campo é aplicado, as moléculas que possuem momento de dipolo elétrico, tendem a se alinhar com o campo (Figura 2). Quando o campo que provocou a orientação dos dipolos moleculares é removido ocorrerá uma relaxação dielétrica, isto é, as moléculas tenderão a voltar para o estado anterior (menos alinhado), dissipando a energia absorvida na forma de calor. A

\* e-mail: sabadini@iqm.unicamp.br

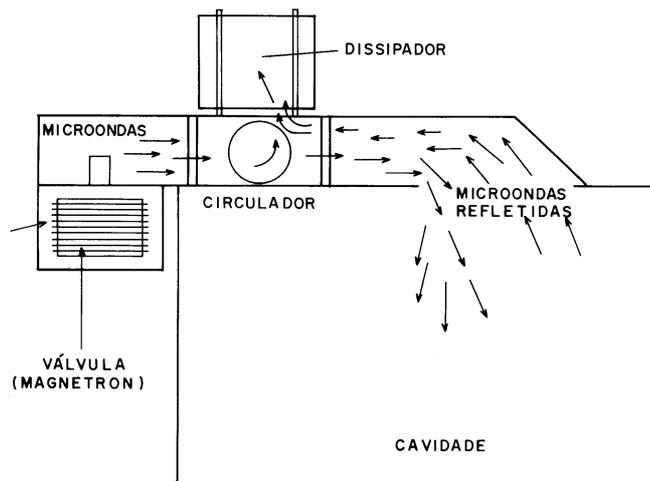


Figura 1. Esquema de um forno de microondas.

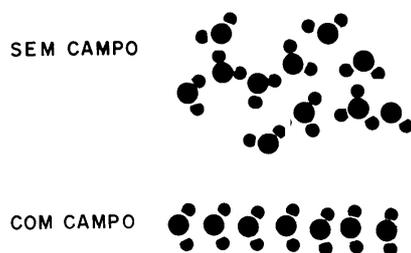


Figura 2. Esquema representando a polarização das moléculas de água devido à ação de um campo elétrico.

princípio, quanto maior for o dipolo mais intensa deve ser a orientação molecular sob a ação do campo elétrico. Se o campo elétrico pudesse ser ligado e desligado (ou se os pólos positivo e negativo) se alternassem com certa frequência teríamos então uma situação “parecida” com aquela onde o campo elétrico da onda eletromagnética interage com a molécula, aumentando a sua energia rotacional.

Se um material possui maior valor de constante dielétrica ( $\epsilon$ ), então maior quantidade de energia pode, a princípio, ser armazenada. Em um campo que alterna as fases (como em uma onda eletromagnética), a orientação molecular varia ciclicamente. Para irradiações na região de MO (1000 a 10000 MHz)<sup>4</sup> a polarização espacial das moléculas do material leva ao seu aquecimento. O tempo de relaxação requerido para os dipolos reduzirem o ordenamento dependerá fundamentalmente de dois fatores: o tamanho das moléculas e a da viscosidade do meio<sup>3</sup>. Em fase condensada, o tempo de relaxação também dependerá da “altura” da barreira de energia (associada com a interação entre as moléculas) que precisa ser alcançada no processo de re-orientação molecular. Haverá na verdade uma faixa de tempos de relaxação, pois existe um certo número de estados de equilíbrio para os dipolos separados por barreiras de potencial de diferentes magnitudes.

Em relação ao aquecimento de uma substância por MO, pode se dizer, que se uma amostra possuir uma frequência de relaxação (recíproca do tempo de relaxação) próxima da frequência da onda eletromagnética, então a quantidade de calor produzida será elevada. Em outras palavras, é importante que haja sincronismo entre a frequência de relaxação molecular e do campo eletromagnético<sup>3</sup>.

A interação de MO com as moléculas pode ser descrito pela mecânica quântica. Para tanto, vamos considerar um conjunto de moléculas no estado gasoso em uma dada temperatura. Em

atmosfera rarefeita as moléculas praticamente não interagem umas com as outras. As moléculas transladam, vibram e rodam livremente, no entanto, apenas nos possíveis níveis de vibração e rotação previstos pela mecânica quântica. As moléculas da substância gasosa estão distribuídas nos vários níveis de vibração e rotação. Esta distribuição é descrita pela distribuição de Boltzmann. No caso de moléculas que possuem dipolo permanente, a rotação do dipolo (devido à rotação molecular) gera um campo elétrico que pode interagir com o componente elétrico da MO. Os conceitos básicos sobre espectroscopia rotacional podem ser encontrados nos livros textos sobre espectroscopia molecular, como os das referências 5 e 6. Se a diferença de energia entre o nível rotacional em que a molécula se encontra e seu adjacente for igual à energia do fóton de MO, então pode ocorrer absorção de energia. A molécula é excitada para o outro nível rotacional. Ao irradiar a amostra gasosa com MO, as moléculas absorvem energia alterando a distribuição das moléculas nos diferentes níveis de energia rotacional. A população de moléculas nos níveis excitados aumenta. A energia absorvida por uma molécula pode ser transferida principalmente nos processo colisionais. Assim ocorre uma distribuição da energia absorvida e a temperatura da substância aumenta. Em fase condensada, as moléculas estão interagindo intensamente umas com as outras, de forma que a rotação molecular deixa de ser livre, isto é, passam a existir barreiras de energia potencial associadas com as possíveis interações intermoleculares. Existe, portanto, um grande número de estados de equilíbrio para os dipolos moleculares. Assim não haverá níveis de rotação molecular, mas uma região espectral onde ocorre excitação por MO. No caso do estado sólido, as moléculas no cristal possuem menor liberdade para mudar suas orientações, impedindo a rotação molecular. Por esta razão o gelo praticamente não absorve significativamente energia na região de MO.

### Outras variáveis que afetam a produção de calor

Como descrito até o momento, a quantidade de calor produzida depende da constante dielétrica, do tamanho da molécula e da viscosidade. No entanto, a dissipação de energia, que leva a produção de calor, também varia com a temperatura e significativamente com a frequência da MO utilizada. Em relação a esta última variável, mesmo utilizando uma frequência ressonante com a frequência de relaxação dielétrica, muitas vezes, a produção de calor, para uma dada substância, é pequena, pois pode ocorrer baixa penetração das ondas eletromagnéticas no material. A penetração da radiação eletromagnética é inversamente proporcional à sua frequência<sup>3</sup>.

### Microondas e o aquecimento de alimentos

O forno de MO doméstico opera em aproximadamente 2450 MHz; nesta frequência, a absorção da água não é máxima, no entanto foi otimizada para permitir máxima penetração da MO nos alimentos. O elevado conteúdo de água nos alimentos faz com que a dissipação de energia, seja grande. Assim, com a passagem de MO na cavidade do forno que contém certo material que possui água, a direção do campo muda  $2,45 \times 10^9$  vezes por segundo. Portanto, tão logo as moléculas de água sofram certo alinhamento parcial, a direção do campo reverte, e as moléculas sofrem um realinhamento. O alinhamento e re-alinhamento das moléculas com elevada frequência produzem grande quantidade de calor, levando ao cozimento do alimento.

No processo de descongelamento dos alimentos, o tempo requerido é geralmente elevado. Isto se deve ao fato de que a mobilidade das moléculas de água nos cristais de gelo é muito menor. A energia dissipada no gelo é aproximadamente 170 vezes menor que para a água líquida a 25° C<sup>3</sup>.

## PROPOSTA DE UM EXPERIMENTO

A seguir está apresentado um experimento envolvendo o uso do forno de MO, que foi desenvolvido dentro de um projeto do laboratório de ensino de Físico-Química. O experimento foi elaborado para ser desenvolvido com alunos que estejam estudando conceitos fundamentais sobre energia e estrutura molecular. Os resultados experimentais e uma breve discussão estão também apresentados de forma a auxiliar o Docente. As condições experimentais a serem utilizadas dependem das características do forno de MO específico, mas podem ser facilmente ajustadas a partir daquelas indicadas no experimento. Chamamos a atenção para as questões de segurança envolvidas no aquecimento de líquidos em forno de MO (veja seção 3, a seguir). O experimento está dividido em duas partes: primeiramente os alunos determinam a potência do forno de MO e, posteriormente o comportamento de alguns solventes frente à radiação de MO.

### Materiais

No experimento desenvolvido pelos autores foram utilizadas as seguintes substâncias: Água destilada, metanol (EM Science), etanol (Nuclear), propanol (Vetec), n-hexano (Grupo Química).

Foi utilizado um forno de microondas marca Continental 2001, modelo Digit 41, com programação de potência.

### Métodos

#### 1 - Verificação da reprodutibilidade e determinação da potência do forno de MO

Para verificar a reprodutibilidade de aquecimento do forno de MO foram realizados ensaios (em triplicata) de aquecimento de 100 mL de água em um bquer de 200 mL, posicionado no centro do forno (programado na potência máxima). O aquecimento foi realizado de 0 a 160 s, medindo-se a temperatura em intervalos regulares de tempo (10 s). A determinação da temperatura foi realizada após breve agitação. A partir destes dados foi construído um gráfico de temperatura em função do tempo.

A determinação da potência do forno foi realizada de acordo com a referência 7, pela medida indireta da elevação da temperatura da água, pelo aquecimento por um tempo estabelecido. Em um bquer de 2 L foi colocado 1 L de água (medido em um balão volumétrico de 1 L). O aquecimento foi realizado por 120 s, nas potências programadas de 20, 40, 60, 80 e 100 %.

#### 2 - Estudo sobre o comportamento dos diversos solventes submetidos à radiação de MO

Com o bquer de 200 mL posicionado no centro do forno de MO, foram realizados ensaios de aquecimento de 100 mL de cada um dos solventes (foi utilizado o mesmo volume, de forma a não alterar a geometria da amostra). As temperaturas foram obtidas em intervalos regulares de tempo (10 s). Foi utilizado o forno de MO operando na potência máxima. A partir dos dados obtidos foi construído o gráfico, sobreposto para cada um dos solventes, de temperatura em função do tempo.

#### 3 - Recomendações e sugestões

Alguns dos experimentos propostos envolvem o aquecimento de líquidos orgânicos. A realização dos experimentos requer, portanto cuidados especiais, pois sempre existem riscos de explosões e incêndios uma vez que é utilizado um equipamento elétrico. Além do mais é manipulado metanol, que é considerado um líquido tóxico. Neste caso sugerimos que os experimentos sejam supervisionados e, que todos os cuidados

necessários para a manipulação de líquidos aquecidos sejam tomados. **Recomenda-se um cuidado especial na agitação dos líquidos quando os mesmos estiverem próximos das suas temperaturas de ebulição, pois os líquidos podem entrar em ebulição vigorosamente no momento da agitação.**

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Reprodutibilidade e calibração do forno de MO

Os resultados sobre a reprodutibilidade do forno de MO estão apresentados na Figura 3. Observa-se que as curvas estão próximas, indicando que o forno reproduz bem a taxa de aquecimento. Entretanto, observou-se que o interrompimento do fornecimento de MO, para que seja determinada a temperatura da amostra não permite que a válvula de MO alcance o equilíbrio; assim o interrompimento em intervalos de 10 s, não permite uma boa correlação entre a programação da potência e o aquecimento alcançado. Para determinação da potência do forno, é necessário que o tempo de aquecimento seja consideravelmente maior. É necessário que a quantidade de água a ser aquecida seja suficiente para que praticamente toda a radiação de MO gerada no interior da cavidade seja absorvida. Foram realizados experimentos exploratórios com diferentes quantidades de água. Observou-se que, por exemplo, para o aquecimento de 100 mL, por 50 s, a potência determinada corresponde à apenas 50 % da potência que deveria ser obtida. Em experimentos com quantidades de água superiores a 1 L, por 120 s, os valores de potência estão sempre próximos. Foram estudadas as potências correspondentes a 20, 40, 60, 80 e 100 % da máxima alcançada (programada) pelo forno. A potência (P) foi determinada pela razão entre a energia absorvida pela água ( $nC_p\Delta T$ ) e o tempo de irradiação:

$$P = nC_p(\Delta T)/t,$$

onde: n é o número de moles de água (55,6 no caso);  $C_p$  é a capacidade calorífica molar da água ( $75,3 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )<sup>8</sup>;  $\Delta T$  é a variação de temperatura observada e t é o tempo de irradiação (120 s no caso estudado).

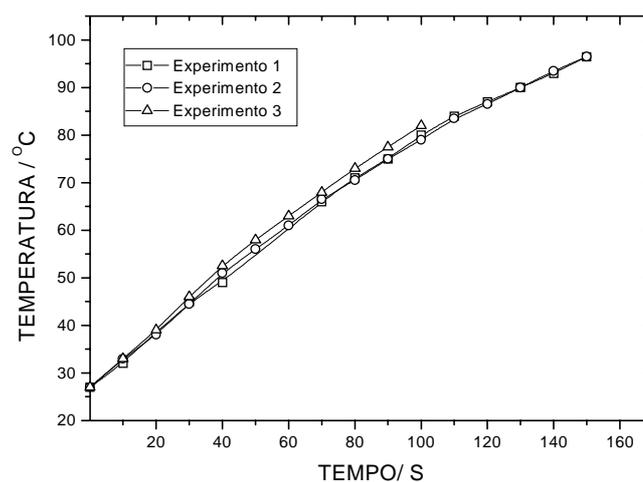


Figura 3. Curvas obtidas em três ensaios de aquecimento de 100 mL de água no forno de MO.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1. Observa-se que a relação entre a potência programada e a medida é razoável. O valor obtido da medida da potência máxima ( $\cong 600 \text{ W}$ ), apesar de estar dentro da faixa de potência típica de fornos de MO domésticos<sup>7</sup>, é consideravelmente inferior àquele fornecida pelo fabricante do forno (900 W).

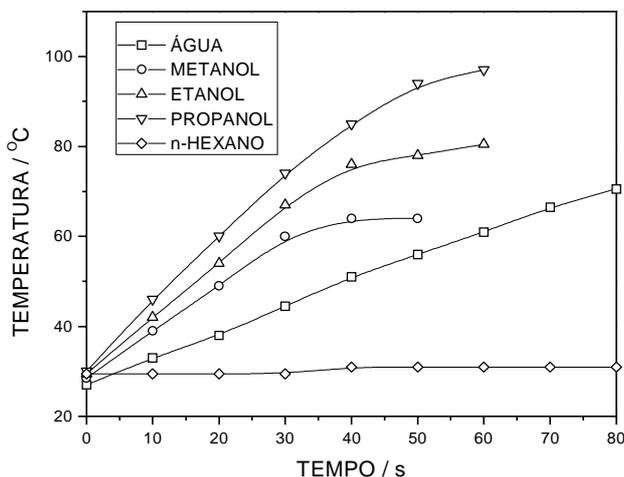
**Tabela 1.** Dados referentes à determinação da potência do forno de MO, usando 1 L de água por 120 s.

Potência programada/ % da potência máxima	Varição de temperatura/ °C	Potência determinada/ W
100	17	595
80	13	455 (76)
60	11	385 (65)
40	8	280 (47)
20	4	140 (24)

Os valores entre parênteses correspondem às porcentagens da potência máxima determinada

### COMPORTAMENTO DOS DIFERENTES SOLVENTES

Os resultados observados para as curvas de aquecimento dos diferentes solventes estudados estão apresentados na Figura 4. Observa-se que a ordem crescente para a taxa de aquecimento é:

**Figura 4.** Curvas de aquecimento de vários solventes no forno de MO.

Pode-se também observar que o n-hexano praticamente não sofre aquecimento. Isto realmente é esperado, uma vez que o momento de dipolo desta molécula é praticamente nulo e, assim a molécula não interage com as ondas eletromagnéticas na região do MO (um pequeno aquecimento pode ser observado, neste caso, devido à troca térmica com o vidro Pyrex<sup>®</sup> que absorve pequena fração da energia irradiada<sup>1</sup>). Os patamares observados nas curvas para os álcoois devem-se a o fato de que as temperaturas de ebulição dos líquidos foram atingidas. Pode-se agora buscar correlações entre os resultados obtidos, como a taxa de aquecimento ( $\Delta T/t$ ), com parâmetros como momentos de dipolo e capacidade calorífica dos líquidos. Estes parâmetros estão apresentados na Tabela 2. Os valores de  $\Delta T/t$  foram obtidos considerando o tempo de aquecimento até 40 s, que corresponde ao comportamento aproximadamente linear das curvas. Os valores dos momentos de dipolos para a água e para os álcoois não são significativamente diferentes. As moléculas destes solventes sofrem ciclos de orientação, produzindo o aquecimento observado; no entanto, a taxa de

aquecimento da água é menor que a dos álcoois. Isto se deve a diferenças na capacidade calorífica dos solventes. A capacidade calorífica da água (por grama; não foi considerada para a esta análise as diferenças de densidades entre os solventes) é aproximadamente 1,7 vez maior que dos álcoois, justificando a menor taxa de aquecimento (aproximadamente 2 vezes menor). O propanol, entre os líquidos estudados é o que apresentou maior taxa de aquecimento, sendo também aquele que possui menor capacidade calorífica.

**Tabela 2.** Dados sobre a taxa de aquecimento e parâmetros Físico-Químicos dos líquidos<sup>8</sup>.

Líquido	( $\Delta T/t$ ) / °C s <sup>-1</sup>	Momento de Dipolo / Debyes	Capacidade calorífica* /J K <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup>
n-Hexano	0,0	0,08	2,27
Água	0,5	1,87	4,18
Metanol	0,9	1,70	2,55
Etanol	1,2	1,69	2,42
Propanol	1,4	1,68	2,39

\*dado obtido da referência 9

### RESULTADOS PEDAGÓGICOS ALCANÇADOS

Os resultados deste trabalho foram apresentados no encontro sobre os projetos desenvolvidos na Disciplina de Laboratório de Físico-Química. Na oportunidade, pudemos constatar o grande interesse dos alunos pelo assunto. Acreditamos que isto se deva ao fato de que o aquecimento seletivo do forno de MO chame a atenção dos estudantes que, rotineiramente utilizam o forno, sem, no entanto compreenderem os princípios envolvidos no aquecimento. Muitos estudantes já haviam estudado espectroscopia rotacional e, consideraram que o experimento proposto consistia em uma forma muito simples de ilustrar alguns conceitos relativos a este tópico como, por exemplo, a necessidade de que a molécula apresente momento de dipolo permanente para interagir com a onda eletromagnética.

### AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Pedro A. M. Vazquez pelas sugestões.

### REFERÊNCIAS

- Watkins, K. W.; *J. Chem. Educ.* **1983**, *60*, 1043.
- Arruda, M. A. Z.; Santelli, R. E.; *Quim. Nova* **1997**, *20*, 638.
- Zlotorzynski, A.; *Crit. Rev. Anal. Chem.* **1995**, *25*, 43.
- Moore, W. J.; *Físico-Química*; Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1976.
- Barrow, G. M. *Introduction to Molecular Spectroscopy*; McGraw-Hill Book Company, New York, 1962.
- Chang, R.; *Basic Principles of Spectroscopy*; McGraw-Hill Book Company, New York, 1971.
- Kingston, H. M.; *Introduction to Microwave Sample Preparation- Theory and Practice*; Jassie, L. B., Ed.; American Chemical Society, DC, 1988.
- CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Weast, R. C., Ed.; 58<sup>th</sup> edition, West Palm Beach, 1977.
- Lange's Handbook of Chemistry*, Dean, J. A., Ed., 13<sup>th</sup> edition, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1968.