



**III ENCONTRO NACIONAL
I ENCONTRO LATINO-AMERICANO**
Gramado, RS, 4 a 7 de julho de 1995

REVISÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CÁLCULO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES: APRESENTAÇÃO DO COBRA

Paulo Smith Schneider, Eng. Mecânico, Dr.
Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos - Depto Eng- Mecânica - UFRGS
Rua Sarmento Leite 425, 90050-170, Porto Alegre, RS
Tel. : (051) 228 16 33 r. 3165 Fax : (051) 226 03 21 e-mail : pss@vortex.ufrgs.br

RESUMO

A simulação do comportamento térmico de edificações obriga à resolução de um conjunto de equações de balanço. Algumas das estratégias clássicas de resolução destes balanços, adotadas pelos programas de simulação mais conhecidos na comunidade científica, são apresentadas e discutidas. O programa de simulação COBRA é apresentado como uma ferramenta de comparação das estratégias Direta, Iterativa e pelo Método dos Acoplamentos. O programa foi elaborado de forma à poder compara-las, através de uma base de descrição comum da edificação, e do compartilhamento de rotinas de modelização. Um quadro comparativo é apresentado, com comentários sobre os principais pontos em jogo na avaliação das estratégias. Finalmente, uma visão geral é deixada de cada estratégia, permitindo que o conjunto de informações passado aqui possa auxiliar na decisão da escolha de métodos adequados.

ABSTRACT

The simulation of the thermal behavior of buildings leads to a resolution of a set of balance equations. Some of the classic strategies of resolution of this balances, adopted by some of the best known softwares in the scientific community, are presented here. The COBRA software is shown as a tool for comparing the Direct, Iterative and Coupling Method strategies. The target of this software is to compare these strategies, by the use of a common base of building description, and by sharing the same modeling routines. A comparative table is presented, containing the main points concerning strategies evaluation. Finally, a overview of each strategy is left: as a way to provide elements of decision, when the problem is choosing the adequate method.

PALAVRAS CHAVE

Comportamento Térmico de Edificações, Simulação Numérica, Programas de Simulação

INTRODUÇÃO

A simulação do comportamento térmico de edificações tem como ponto de partida a modelização dos diversos fenômenos físicos responsáveis pelas trocas térmicas. O conjunto de equações resultante é variado e admite diversas técnicas e estratégias de resolução. Quando da elaboração de um programa de simulação, a escolha de uma dada estratégia define uma série de características que marcarão o programa, das quais, as principais são: modularidade, capacidade de evolução e atualização, custos computacionais (tempo de execução e de tipo de equipamento) e estabilidade dos esquemas de

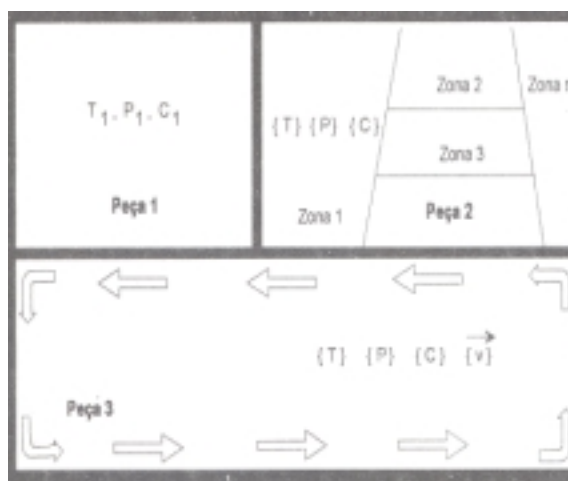
cálculo. O programa COBRA [Schneider (1994)] foi desenvolvido inicialmente para testar algumas das estratégias de solução do problema, permitindo assim confronta-las. O conhecimento do comportamento destas estratégias permite apontar a vocação de cada uma, dando assim subsídios à escolha de esquemas de cálculo e à avaliação de seu desempenho.

A parte inicial deste artigo mostra de forma sucinta a formulação do problema que nos propomos a resolver, onde o estado dos sistemas é expresso em função das temperaturas e das pressões. À seguir, uma revisão das principais estratégias de cálculo é mostrada. Tratam-se das opções **Direta**, **Iterativa**, **Mista** e pelo **Método dos Acoplamentos**, consideradas como clássicas devido à sua difusão. A estrutura de cálculo do programa COBRA é apresentado logo após, onde é então discutida a implementação das estratégias **Direta**, **Iterativa** e pelo **Método dos Acoplamentos**. Um quadro que sintetiza e compara os comportamentos das opções utilizadas no programa é apresentado. O artigo é finalizado com um resumo dos pontos fortes assim como das desvantagens de cada estratégia.

2 PROBLEMA À RESOLVER

A modelização dos fenômenos físicos observados na edificação forma um problema que envolve tanto sistemas fluídicos (ar das peças, cavidades, etc.) como sólidos (envelope da edificação, estrutura interna, etc.). A figura I mostra 3 dos enfoques mais empregados para a modelização dos sistemas fluídicos.

Figura 1 - Modelização dos volumes de ar de uma edificação multipeça segundo os enfoques monozona (peça 1), multizona (peça 2) e por modelos de campo (peça 3)



- Monozona : caracterizado pelas variáveis de estado médias temperatura **T1**, pressão **P1** e concentração **C1**. As superfícies de contorno do volume coincidem com as paredes da peça. O conceito de zona é aplicado à um volume contendo uma mistura de gases à concentração constante [Feustel et al (1990)], onde constata-se que a concentração é fracamente acoplada à pressão, mas fortemente acoplada à temperatura. Logo, podemos admitir um campo variável de pressões num volume onde os campos de concentração e de temperatura são uniformes.

- Multizona : na peça 2, o volume de uma única peça é dividido em várias zonas [Laret (1980)]. Este conceito é seguidamente confundido com o de multipeça, que é reservado exclusivamente à descrição geométrica da edificação.

- Modelos de campo : representado na peça 3, é formado pelas equações da continuidade, da conservação da energia e da quantidade de movimento, permitindo a determinação dos campos de temperatura, pressão, concentração e velocidades.

As formulações propostas neste trabalho são baseadas na modelização monozona dos sistemas fluídicos, pertencentes à edificações multipeças. Como as concentrações não serão integradas, o estado dos sistemas é dado em função de **T** e **P**. Os sistemas sólidos são modelizados em função de seu estado térmico, dado que os fenômenos de transporte de massa e de mudança de fase na estrutura não são abordados. A apresentação do problema é feita à partir das zonas de ar internas, pois é delas que aparecem os acoplamentos com o conjunto da edificação.

O balanço energético (equação 1) efetuado sobre uma zona interna **Z** dá a variação de sua temperatura **Tz**, em função dos fluxos trocados, transportados ou dissipados pelas fronteiras ou no interior do volume. O ar é tomado como não participante ao longo de todo o espectro de radiação.

$$[Cz] \left\{ \frac{dTz}{dt} \right\} + \{Q_{As}\} + \{Q_t\} + \{Q_c\} + \{Q_{cv}\} = \{0\}$$

onde $[Cz]$ é a matriz das capacitâncias térmicas do ar. O vetor $\{Q_{AS}\}$ contém os aportes de calor sensível, transportados pelos fluxos de massa m_v' , que atravessam os elementos de ventilação que conectam as zonas. Neste trabalho, os fluxos são expressos por leis de potência, escritas em função das diferenças de pressão locais (medidas na altura dos elementos de ventilação). A diferença de pressão local faz aparecer as pressões de referência das zonas, assim como suas temperaturas. A determinação dos fluxos é obtida por um balanço de conservação sobre cada zona interna r , em relação à todas as zonas internas e externas s :

$$[\sum m_{r,s}] = \{0\} \quad (2)$$

Ainda em respeito à equação 1, os vetores $\{Q_I\}$ e $\{Q_C\}$ representam cargas internas de utilização e de climatização, respectivamente, e são termos independentes das variáveis de estado. $\{Q_{CV-SI}\}$ é o vetor dos fluxos convectivos, proporcional à diferença entre as temperaturas do ar e das superfícies internas das zonas, e que acopla termicamente a zona as fronteiras da estrutura da edificação. Os acoplamentos deste último fluxo chamam outra equação de balanço, sobre as superfícies internas SI.

$$\{Q_{Cd}\} + \{Q_{CV}\} + \{Q_{OI}\} + \{Q_{OC}\} |_{SI} = \{0\} \quad (3)$$

onde $\{Q_{OI}\}$ e $\{Q_{OC}\}$ são os vetores dos fluxos radiativos em ondas longas e curtas, respectivamente. O vetor $\{Q_{Ca}\}$ traz o acoplamento com a estrutura da edificação, por intermédio das temperaturas das superfícies externas. O balanço sobre o envelope é dado por:

$$\{Q_{Cd}\} + \{Q_{CV}\} + \{Q_{OI}\} + \{Q_{OC}\} |_{SE} = \{0\} \quad (4)$$

Os fluxos deste último balanço são formalmente similares aos da equação 3, e acoplam as superfícies externas ao ambiente externo à edificação. Finalmente, há ainda o acoplamento com as temperaturas T_n , no interior dos elementos sólidos. Este acoplamento pode ser explicitado ou não, em função do tipo de modelização escolhida para a difusão de calor na estrutura. Técnicas tais como as de diferenças finitas, por exemplo, obrigam à determinação do vetor $\{T_n\}$, enquanto que o uso de funções de transferência evita este cálculo. O problema completo é formado pelas equações de balanço 1, 2, 3 e 4, apresentado à seguir, juntamente com suas dependências funcionais.

$$\left\{ \begin{array}{l} \{f(T_Z, P_Z)\} = [\sum m'] \quad (5.a) \\ \{g(T_Z, P_Z, T_{SI})\} = [C_Z]\{T_Z\} - \{Q_{CV-SI}\} - \{Q_{AS}\} - \{Q_I\} - \{Q_C\} \quad (5.b) \\ \{h(T_Z, T_{SI}, T_{SE})\} = \{Q_{CD}\} - \{Q_{CV}\} - \{Q_{OL}\} - \{Q_{OC}\} |_{SI} \quad (5.c) \\ \{k(T_{SI}, T_{SE})\} = \{Q_{CD}\} - \{Q_{CV}\} - \{Q_{OC}\} - \{Q_{OC}\} |_{SE} \quad (5.d) \end{array} \right.$$

3 ESTRATÉGIAS DE CÁLCULO

A equação 5 admite várias estratégias de resolução, mas nos interessamos em particular por 3 delas:

1- Iterativa - Cada um dos fluxos que compõe a equação 5 são separados em estruturas chamadas de módulos, onde o fenômeno ou sistema modelizado é desacoplado dos restantes. O problema é reconstituído pela conexão ordenada do conjunto de módulos (figura II), onde todas as entradas são consideradas como dados (conhecidos ou estimados) e as saídas são valores calculados das variáveis diretamente ligadas à cada módulo. Desta forma não se procede à uma resolução do sistema de equações, mas um cálculo de atualização dos diversos fluxos que o compõem. A convergência dos cálculos é obtida no interior do **laço iterativo**, e o resultado é uma aproximação da solução, pois será sempre comparado à um critério de precisão. Só então passa-se à um novo passo de tempo (**laço temporal**), onde a seqüência de cálculo é reiniciada com os valores obtidos do passo de tempo anterior. Esta estratégia é clássica na resolução de problemas diversos de Engenharia. Particularmente para sistemas térmicos podemos citar o ambiente de simulação TRNSYS (1988) como uma referência entre os programas de simulação.



Figura II - estratégia iterativa

2- Direta - O sistema completo formado pelas equações de balanço 5 é resolvido simultaneamente, sem qualquer manipulação ou preparação anterior. É uma técnica que pode ser tomada como uma referência, pois trata-se do procedimento mais imediato, preservando a integridade do sistema. Esta estratégia permite a verificação do conjunto de acoplamentos, por simples verificação do preenchimento da matriz de coeficientes do sistema. O fluxograma deste método é apresentado na figura III, onde o sistema $Ax=b$ representa a equação 5, escrita em função de T_z , T_{SI} , T_{SE} e P_z . O laço iterativo é opcional, pois serve ao cálculo das não linearidades do sistema de equações, quando estas estão presentes. O **laço temporal** é responsável pelo avanço da simulação no tempo. Esta estratégia é utilizada por programas de simulação tais como CLIM2000 [Bonneau et al(1993)] e SPANK [Buhl et al (1990)]

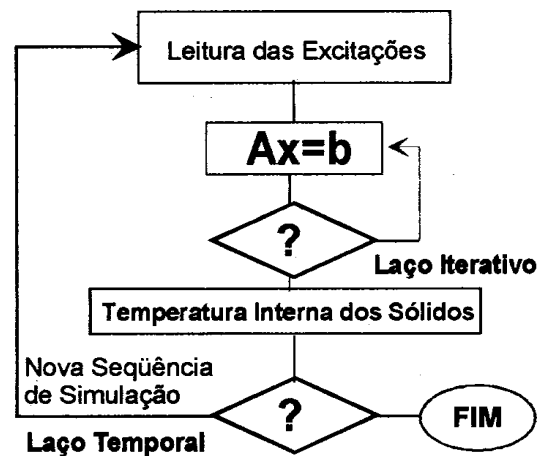


Figura III - estratégia direta

3- Método de Acoplamento - Trata-se de uma variante do método direto, baseado na decomposição do problema da equação 5 em subconjuntos. Como vantagens, esta estratégia gera subsistemas de tamanho bem menores que o original, além de permitir a análise dos papéis destes acoplamentos. Inicialmente, 'níveis de acoplamento' são identificados, coincidindo com os tipos de balanços existentes no problema. Estes são manipulados de modo à obter-se 'vetores de acoplamento', 'formados pelas variáveis de acoplamento T_{SE} , T_{SI} , T_Z , e P_Z , isolados das equações 5d, 5c, 5b e 5a, respectivamente. A expressão do vetor de acoplamento de cada nível substitui o do nível seguinte, até chegar-se a isolar um conjunto de equações referentes ao ar das zonas internas. Neste nível, o cálculo das trocas de ar por ventilação natural pode ser resolvido por via iterativa ou simultânea [Schneider (1994)1. Uma vez determinados T_z e P_z , as demais variáveis de acoplamento são obtidas por simples substituição (figura IV). O **laço iterativo** é opcional (assim como na estratégia direta), pois serve à correção das não linearidades. Assim como nos outros esquemas, o **laço temporal** controla o avanço da simulação no tempo. Esta técnica é empregada pelo programa S3PAS [Rodriguez (1990)] e inspira o programa Passeport, do projeto Pascool, atualmente em desenvolvimento.

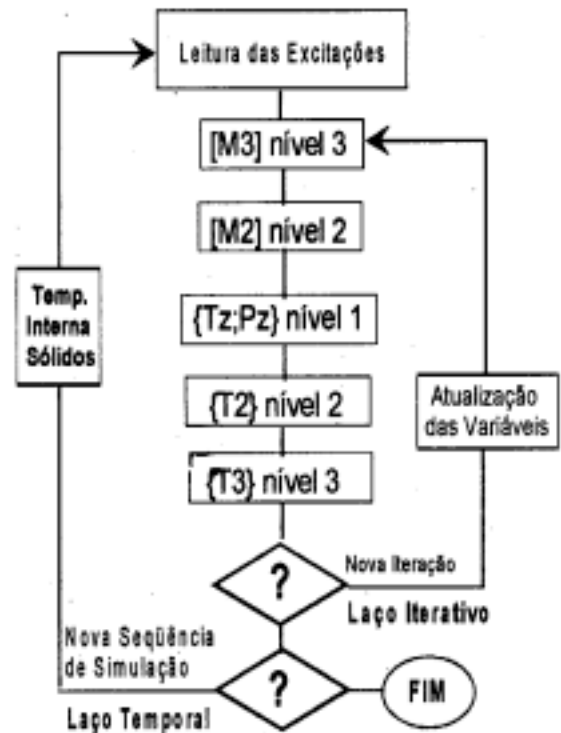


Figura IV - Figura IV - método dos acoplamentos

3- Mista - Trata-se de uma variação que consiste em resolver de maneira direta ou simultânea o sistema de equações que representa uma única zona à cada vez. Desta forma, as incógnitas do problema localizadas no exterior de uma determinada zona são tratadas como dados aproximados. O processo de cálculo dá-se no interior do laço iterativo da figura V, cuja seqüência é composta por tantos módulos quanto for o número de zonas da edificação. Este esquema de cálculo é utilizado por um bom número de códigos, mas ficou consagrado pelo programa ESP [Clarke (1985)], que durante muitos anos foi o tomado como padrão na comunidade européia.

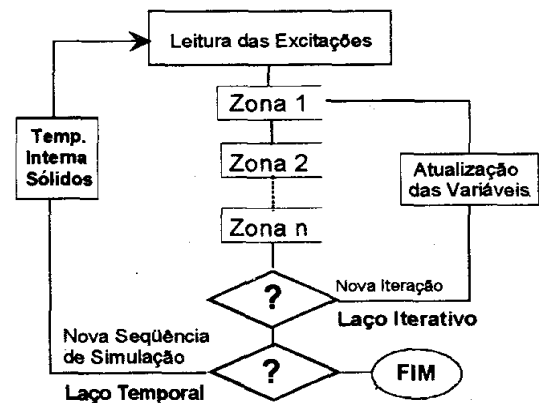


Figura V - estratégia mista

4 O PROGRAMA COBRA

O programa COBRA foi elaborado de maneira à poder comparar o desempenho das estratégias de cálculo mais difundidas, encontradas nos principais programas de simulação internacionais. As estratégias escolhidas foram: **iterativa**, **direta** e de **acoplamento**. A escolha das duas primeiras justifica-se facilmente pois elas se baseiam em esquemas de resolução fundamentalmente opostos, além de serem clássicas. O método dos acoplamentos foi logo a seguir selecionado, pois apresenta inúmeras vantagens de cálculo. Inicialmente, permite reduzir o tamanho dos sistemas de equações e focalizar o interesse em um dado nível de cálculo, em função do fenômeno físico analisado. Além disto, o método de cálculo continua a ser do tipo direto. Finalmente, o método misto não foi empregado por não fornecer maiores novidades, principalmente ao que se refere aos cálculos de ventilação.

A estratégia **iterativa** utilizada não difere do tradicional, pois sua sequência de cálculo é constituída por uma série de módulos, onde os fluxos radiativos, convectivos, condutivos e devido as trocas de ar são calculados. Este são concatenados de maneira à reconstituir os acoplamentos físicos do problema. A estratégia direta trata o sistema completo de equações como um problema numérico que deve ser resolvido da forma mais eficaz possível, i.e. procurando o esquema de cálculo que melhor se adapta as características do problema. O método dos acoplamentos é essencialmente um método direto, mas fornece uma visão dos acoplamentos físicos. Também nesta opção, a resolução do problema de ventilação, feito no nível 1 - zonas de ar - foi tratado tanto de forma direta (Tz e Pz simultaneamente) como por blocos (Tz e Pz separadamente).

Quanto ao tratamento das não linearidades de certos balanços, introduzidas pela modelização da convecção e da ventilação, os 3 métodos tem comportamentos diferentes. Vários programas, entre eles o ESP e o S3PAS, adotam o calculo explícito das não linearidades, i.e. utilizando os valores das variáveis obtidos do passo de tempo anterior. Este procedimento é justificável apenas quando a evolução dos fenômenos é lenta. Na estratégia iterativa, cálculo dos coeficientes não lineares é naturalmente feito de forma implícita (com os dados da simulação presente), visto que a passagem pela sequência de cálculo por repetidas vezes é obrigatória. Nos esquemas direto e de acoplamentos este cálculo pode ser tanto implícito como explícito. O primeiro é certamente mais correto, mas acarreta um maior tempo de cálculo e é responsável por instabilidades numéricas da resolução. Estas são contornadas, no COBRA, pelo emprego de coeficientes de sub-relaxação.

Quanto a comparação do desempenho das três estratégias de simulação, ela só é possível se os casos estudados compartilham da mesma lógica de descrição da edificação e dos mesmos princípios de modelização dos sistemas físicos. Desta forma, o programa conta com uma etapa inicial comum (figura VI), onde se codifica a realidade física da edificação, i.e. sua descrição geométrica e as características termo-físicas de seus componentes. Quanto as estratégias de resolução, as opções de cálculo são montadas a partir de um conjunto comum de rotinas de modelização dos sistemas. Sobre este ponto específico, o que- muda em cada uma destas opções é a organização das variáveis e os dados são no seu interior



Figura VI - programa COBRA

O desempenho destas opções pode ser analisado em função de vários aspectos, mas mostraremos no quadro 1 os que consideramos como mais importantes, de forma esquemática.

	ITERATIVA	DIRETA	ACOPLAMENTOS
Lógica de construção	Lógica de conexão de módulos de modelização	Conjunto completo de equações de balanço	Manipulação de sub-conjuntos de equações
Tamanho dos sistemas à resolver	Sem importância	Proporcional ao número de balanços	Proporcional ao número de balanços por nível de acoplamento físico
Sensibilidade aos critérios de relaxação	Muito sensível	Pouco sensível	Pouco sensível
Sensibilidade aos critérios de precisão	Muito sensível	Pouco sensível	Pouco sensível
Tempo de execução	Muito dependente da intensidade dos acoplamentos físicos	Muito dependente da ordem do sistema completo de equações	Dependente da ordem dos subsistemas de equações e dos acoplamentos físicos
Integração de outros programas existentes	Aceita facilmente	Possível, em casos específicos (ex: ventilação)	Possui vários pontos de controle da precisão. Combina as qualidades dos 2 outros.
	Iterativa	Direta	Acoplamentos

Quadro I – Comparação do desempenho das opções de cálculo do programa COBRA

5 CONCLUSÃO

A estratégia iterativa é uma das maneiras mais consagradas de resolução de problemas físicos em geral, baseada no desacoplamento matemático dos balanços físicos. Do ponto de vista computacional, tem como vantagem o fato de ser pouco consumidora de memória. Graças à sua modularidade, ela aceita facilmente a integração de rotinas desenvolvidas externamente. Como pontos fracos, salienta-se que os resultados obtidos são sempre dependentes do critério de precisão adotado, e que a estratégia é muito sensível à intensidade dos acoplamentos físicos. A estratégia direta é baseada na resolução simultânea do sistema de equações do problema, e adaptada-se bem ao uso de 'solvers'. Entre seus pontos fortes esta o caráter automático da resolução, uma vez que o sistema completo é disponível. Entretanto, estes sistemas podem atingir dimensões proibitivas, em relação à capacidade dos computadores. A resolução pelo método dos acoplamentos constitui uma maneira de salientar-se as relações físicas existentes entre os sistemas da edificação. O problema completo é dividido em subconjuntos de equações, segundo os tipos de acoplamentos existentes. Esta estratégia consome menos recursos de memória dos computadores que a direta, mas guarda ainda seu caráter simultâneo. Como pontos fracos, salientamos a lógica de programação empregada, que é particular do método e que exige uma adaptação do pesquisador para emprega-la.

No âmbito do assunto tratado neste artigo, a grande perspectiva aberta com o programa COBRA é de pesquisar a adaptação ou vocação de cada tipo de estratégia de cálculo à casos específicos. Desta forma, estamos desenvolvendo um conhecimento especialista, que visa dar subsídios à tomadas de decisão.

6 REFERÊNCIAS

SCHNEIDER, P.S. (1994) *Comportement Thermo-Aéroulique des, Bâtiments: Stratégies de Résolution du Problème Couplé*. Tese de Doutorado: INSA-LYON, 1994, 247 p.

FEUSTEL et al (1990) *Fundamentals of the Multizone Air Flow Model-COMIS*, Coventry: University of Warkick Science Park, Barclays Venture Centre, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1990, 115 p. Technical Note AIVC 29.

LARET. L. (1980) *Contribution au Développement des Modèles Mathématiques du Comportement Thermique Transitoire des Structures d'Habitation*. Tese de Doutorado: Université de Liège, 1980, 330p.

TRNSYS (1988) *A Transient System Simulation Program*, Version 13. 1, Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, 1988, paginação múltipla.

BONNEAU, D. et al (1993) CLIM2000: Modular Software for Energy Simulation in Buildings, *Proceedings of the Third International Conference of the International Building Performance Simulation Association MPSA*, Adelaide (Austrália), 1993, pp 85-91.

BUHL, F. et al. (1990) The U.SEKS: Advances in the SPANK-based Energy Kernel System, *Proceedings of the Third International Conference on System Simulation in Buildings*, Liège, 1990, pp 107-150.

RODRIGUEZ, E.A. (1990) *Sistematizacion de Acoplamientos Termicos y Termoaerolicos en Ia Simulation de Edificios*, Tese de Doutorado: Universidade de Sevilha, 1990, 227 p.

CLARKE, J.A. (1985) *Energy Simulation in Building Design*, Bristol: Adam Hilger, 1985,387 p.