



METODOLOGIAS SIMPLIFICADAS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES

V. Neumann ⁽¹⁾, P. S. Schneider ⁽²⁾

1. Escola de Engenharia e Arquitetura	Curso de Eletromecânica
Universidade Católica de Pelotas	Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Sul
Rua Félix da Cunha, 412	Praça 20 de Setembro, 455
96010-000 – Pelotas – RS	96015-360 – Pelotas – RS

velington@cpovo.net

(2) GESTE – Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Sarmiento Leite, 425
90050-170 – Porto Alegre – RS

pss@mecanica.ufrgs.br

RESUMO *Esse trabalho apresenta uma revisão das principais metodologias simplificadas de avaliação do desempenho energético de edificações. As diversas formas de modelagem dos fenômenos térmicos é apresentada para então mostrar as metodologias simplificadas em ambientes monozona. A maior atenção é dada aos modelos baseados em analogia elétrica e em regressão linear. Após a revisão é feita uma avaliação crítica das diversas metodologias apresentadas para possibilitar a escolha de uma dessas para o desenvolvimento de um diagnóstico energético conforme o grau de precisão desejado.*

ABSTRACT *This work presents a review of some simplified methodologies for the evaluation of the energy performance of buildings. The different ways of modeling thermal phenomena are presented in order to show the simplified methodologies for the monozone approach. The main focus is over the electrical analogy and the linear*

regression. A critical evaluation follows the review in order to make easier the choice of the suitable method for predicting the energy performance within a desired precision.

1 Introdução

A avaliação do comportamento térmico de uma edificação ainda em fase de projeto é baseada em dados que muitas vezes ainda estão em curso de definição, e que poderão sofrer alterações. Portanto, não é econômico e prático o uso de programas de simulação detalhados para prever o desempenho térmico e energético da futura edificação, enquanto que seria conveniente o emprego de uma ferramenta mais genérica. Também as avaliações de cunho energético prescindem menos de detalhes da construção, o que dispensa programas muito sofisticados. Uma ferramenta eficiente para este fim deve ser desenvolvida de forma que a complexidade dos problemas seja reduzida sem sacrificar, na mesma proporção, a precisão das respostas. Ela deve proporcionar a análise de vários tipos de edificações reais, com uso amigável, onde o usuário seja capaz de dominá-la em pouco tempo, e que os valores de entrada sejam reduzidos aos dados mais significativos e que o tempo de simulação seja pequeno.

Este trabalho apresenta os enfoques de modelagem de edificações encontrados atualmente e depois foca sua atenção nas metodologias de modelagem simplificadas, que são adaptadas ao propósito de simulações rápidas.

2. Enfoques de Modelagem

A modelagem dos fenômenos físicos observados numa edificação forma um problema que envolve tanto sistemas fluídicos (ar das peças, cavidades, etc.) como sólidos (envelope da edificação, estrutura interna, etc.). A figura 1 mostra 3 dos enfoques mais empregados para esta modelagem.

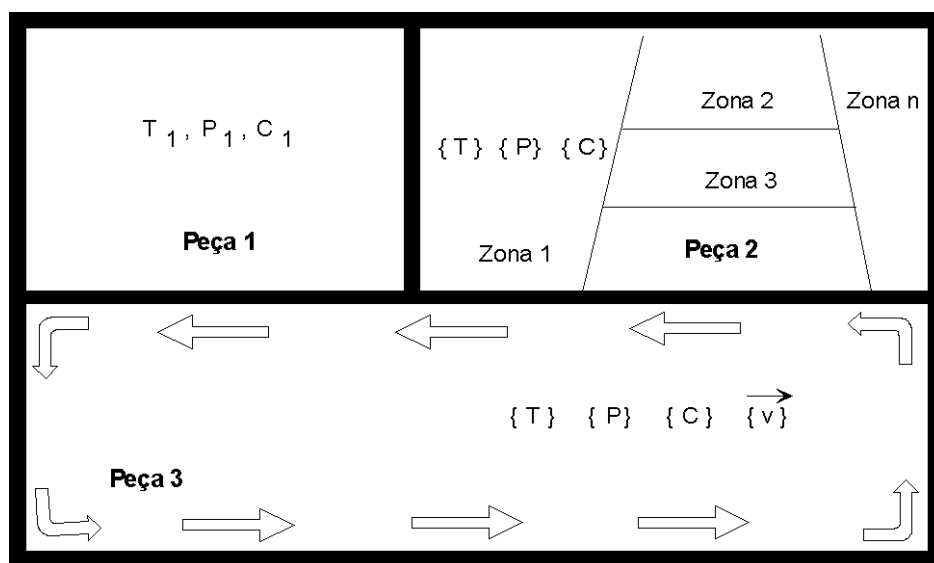


Fig. 1 – Modelagem dos volumes de ar de uma edificação multi-peça segundo os enfoques monozona (peça 1), multizona (peça 2) e por modelos de campo (peça 3)

O enfoque **monozona** é caracterizado pelas variáveis de estado temperatura T_1 , pressão P_1 e concentração C_1 em valores médios. As superfícies de contorno do volume coincidem com as paredes da peça. O conceito de zona é aplicado a um volume contendo uma mistura de gases a concentração constante (Feustel et al., 1990), onde se constata 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. O enfoque **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 a descrição geométrica da edificação. Finalmente, o modelo de campo (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.

A simulação por modelos de campos é atualmente o que se dispõe de mais detalhado, possibilitando a observação de fenômenos de transferência em escalas reduzidas. Dispõe-se hoje de pacotes de simulação com interfaces gráficas evoluídas, mas seu emprego ainda deve ser reservado aos profissionais capazes de interpretar criticamente os resultados. O enfoque multizona tem pouca abrangência e é reservado a situações onde se estabeleça um escoamento interno esperado, como aquele provocado por um radiador de calefação.

A simulação monozona é a mais empregada na simulação de comportamento energético, não só em função da simplicidade do equacionamento mas também porque é uma aproximação razoável quando se trata de ambientes climatizados. A partir do enfoque monozona é que se desenvolvem os balanços de transferência de calor e massa, cujo conjunto de equações é resolvido aplicando-se métodos tradicionais de solução de sistemas (lineares ou não) ou ainda com o auxílio de esquemas como fatores de resposta, analogia elétrica, métodos nodais, etc.

2.1 Métodos Detalhados

Existem vários programas que empregam modelos detalhados seguindo o enfoque de modelagem **monozona**, e são empregados para simular em detalhes as edificações compostas por múltiplas peças. Eles geralmente apresentam a capacidade de levar em conta as características construtivas das edificações, sua geometria e orientação, o tipo de utilização e em muitos casos acopla os tipos de equipamentos de climatização dos ambientes. Dentre os programas mais conhecidos citam-se o DOE e o TRNSYS (Klein et al., 1994) por representarem empregos diferentes. O DOE é um programa direcionado à análise energética de edificações, alcançando melhores resultados quando a temperatura das zonas é controlada.

Entre suas virtudes encontra-se a capacidade de acoplar-se sistemas de climatização e outros sistemas mecânicos auxiliares. O TRNSYS é mais abrangente pois trata-se de um ambiente de simulação, capaz de simular sistemas térmicos em geral. Além de possuir dois modelos voltados a simulação de ambientes, também dispõe de rotinas para equipamentos solares e é capaz de abrigar desenvolvimentos novos, realizados pelos seus usuários.

2.2 Métodos Simplificados

Dentre os métodos simplificados capazes de proporcionar uma ferramenta com as características acima podemos destacar os métodos análogos elétricos e as regressões lineares.

2.2.1 Métodos Análogos Elétricos

Os métodos análogos elétricos, também chamados de modelos nodais (Rodrigues, 1990), são aqueles onde os fenômenos térmicos são associados aos elétricos. Assim, a temperatura corresponde a uma tensão, o fluxo de calor a uma corrente, e a condutância e a capacitância térmica correspondem as mesmas grandezas elétricas. A representação da edificação segundo esse método pode ser feita de forma simplificada, onde toda a edificação é representada por poucos componentes elétricos análogos (modelos de edificação), ou com maior detalhamento, através de uma modelagem de cada elemento que a constitui em separado (modelo de componentes).

Modelos de Componentes - Uma parede ou qualquer outro componente sólido é modelado individualmente, tendo como hipótese a transferência de calor unidimensional e com propriedades constantes. As resistências são parâmetros concentrados e a capacitância é distribuída em todo o componente sólido. Rodrigues (1990) representa uma parede seguindo vários modelos, e os descreve de acordo com o número de nós em modelos de dois, três e quatro nós. O modelo de dois nós ($2C+R$) representa uma parede mediante duas capacitâncias e uma resistência, onde os nós correspondem às superfícies externas (Fig. 2a). Outro modelo é o de três nós ($2R+C$), onde a parede é representada por duas resistências e uma capacitância, sendo os dois nós externos para representar as superfícies e o outro nó, um ponto interno da parede (Fig. 2b). Finalizando, o outro modelo tem quatro nós ($3R+2C$), dois correspondem às superfícies e os outros dois à pontos internos da parede (Fig.2c).

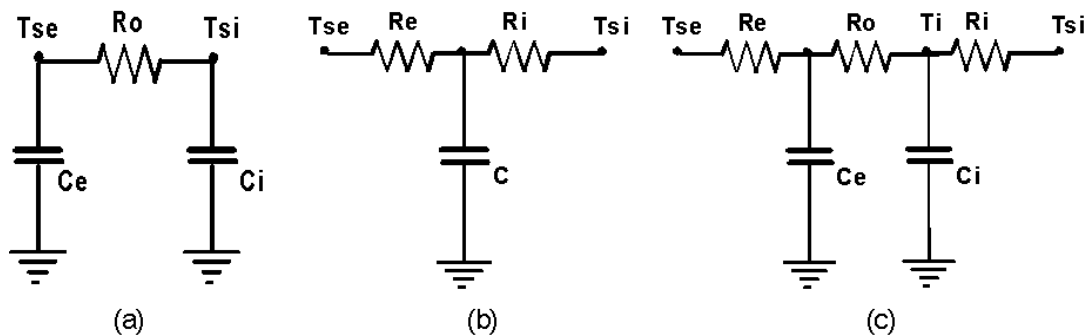


Fig. 2- Modelos de representação de estruturas opacas por analogia elétrica (Rodrigues, 1990)

A representação de uma zona térmica se faz através de um balanço dos fenômenos envolvidos e uma montagem possível é dada na figura a seguir, onde são considerados os fluxos de calor por condução, convecção e radiação dos elementos opacos (paredes, teto, piso, etc.) e das aberturas envidraçadas. O circuito análogo é excitado pelas fontes externas, correspondendo às temperaturas do ar exterior, da peça adjacente, do solo e do céu. Esse circuito não apresenta fontes internas, mas estas podem ser incluídas. A temperatura do ar do ambiente é representada por um único nó, que indica a hipótese de uma zona à temperatura uniforme.

A linha tracejada delimita o contorno ou envoltória da edificação, e os elementos do circuito são: T_{sa} – temperatura sol-ar, R_o – resistência da parte externa do envelope, C – capacitância térmica total, incluindo o ar do ambiente interno e a estrutura, R_i – resistência da parte interna do envelope, Q_r – fonte radiante de calor dissipado no ambiente, R_a – resistência do ar interno, Q_c – fonte convectiva de calor dissipado no ambiente, R_v – resistência devido a ventilação, T_o – temperatura do ar exterior.

O circuito tem uma interpretação física muito clara, o que facilita a inclusão de novas arquiteturas e materiais de construção. Se somente as características essenciais da edificação são descritas os dados de entrada exigidos são modestos e ainda sua aplicação não requer nenhum conhecimento especialista em análise térmica. Essas características facilitam avaliar várias opções de um projeto básico em poucos segundos.

Modelos de Segunda Ordem - Segundo Penman (1990) um modelo simplificado de segunda ordem (Fig.5), segue as mesmas hipóteses de simplificação adotadas para o modelo anterior.

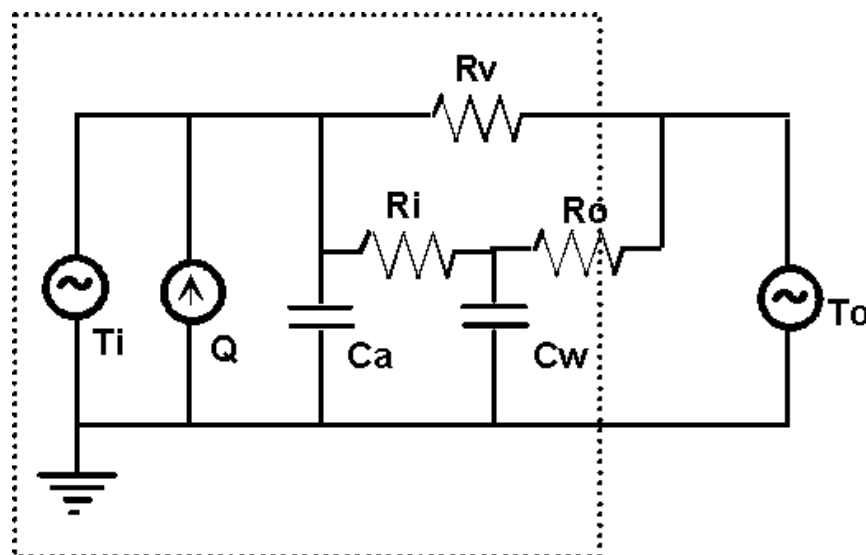


Fig. 5 – Circuito elétrico análogo de segunda ordem

Nesse modelo, o fluxo de calor (Q), incluindo ganhos solares, da dissipação de equipamentos e ganhos casuais é aplicado diretamente à temperatura do ar interno, que tem associado a capacitância térmica (C_a) como uma fonte convectiva. A capacitância engloba o ar interno e a contribuição das camadas internas das paredes e do teto. A temperatura do ar interno (T_i) é conectada à temperatura do ar externo (T_o) por dois caminhos, um de resposta rápida, que é representado pela resistência de ventilação (R_v), e o de resposta lenta. Esse último é formado pelas resistências da estrutura interna (R_i) e externa (R_o), associadas à capacitância da massa estrutural (C_w). Esses parâmetros do modelo podem ser calculados através dos dados da estrutura ou através de séries temporais da temperatura interna, externa e das entradas de calor da edificação.

2.2.2 Regressões Lineares

Segundo Lam (1997) a análise de regressão é uma técnica estatística usada para relacionar variáveis. O objetivo é construir um modelo relacionando uma variável

dependente com variáveis independentes. As técnicas de regressão tem sido usadas para estudar os efeitos de vários parâmetros na performance energética de edificações e para desenvolver equações simplificadas para padrões de consumo de energia. Pela variação das variáveis de entrada para o caso de uma edificação de referência, um grande número de simulações detalhadas são rodadas, gerando os dados necessários para obter, assim, expressões algébricas relacionando a performance da edificação com os parâmetros de projeto. Para Signor (1999) uma equação capaz de relacionar as principais variáveis construtivas que influenciam no consumo de energia de uma edificação comercial deve considerar as seguintes variáveis: a área total, de telhado, das fachadas, fator de projeção, coeficiente de sombreamento dos vidros, transmitâncias do telhado e das paredes, a absorvidade à radiação e da carga interna que se divide em potência de iluminação, carga dos equipamentos e de ocupação.

Os métodos de análise por regressão, embora sendo fáceis de serem utilizados, apresentam o problema da falta de generalidade de aplicação e de flexibilidade devido as condições exploradas no projeto de referência no seu desenvolvimento, como por exemplo uma determinada geometria da edificação, a localização, as limitações do programa de simulação detalhado, se esse for o processo de validação. O efeito das ilhas de calor, comum nas grandes cidades, também colaboram, pois geralmente os dados climáticos são levantados em regiões periféricas e então não correspondem fielmente ao clima no qual a edificação está inserida.

3 Conclusão

O trabalho centra suas atenções na revisão das metodologias simplificadas de representação do comportamento térmico de edificações, seguindo um enfoque monozona de modelagem dos ambientes. Os modelos de analogia elétrica tem a capacidade de simular tanto a evolução térmica livre de ambientes como o comportamento energético, quando se fixa a temperatura de climatização. A aproximação com circuitos elétricos permite o emprego de programas de simulação dessa última área. A maior dificuldade desses modelos é o cálculo dos parâmetros que alimentam os circuitos análogos. O modelo de regressão linear, ou de outra ordem superior, são muito práticos e de fácil utilização, tendo seu uso restrito a avaliações energéticas e sua exatidão depende da extensão do universo analisado, que serviu como base para sua elaboração.

4 Referências Bibliográficas

DOE-2 Supplement Version 2.1E (1993), Rep. No.LBL-34947, *Lawrence Berkeley Laboratory*, Berkeley, CA.

Feustel, H. 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*. Technical Note AIVC 29.

Klein et al, (1994) A Transient System Simulation Program, Version 14.2, Madison : Solar Energy Laboratory, *University of Wisconsin*.

Lam, J.C. (1997): Regression analysis of high-rise fully air-conditioned office buildings. *Energy and Buildings*, 26, pp. 189-197.

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

Mathews, E.H. et al (1993): An Efficient Tool for Future Building Design, *Building and Environment*, vol 28, nº 4, pp. 409-417.

Mathews, E.H. et al (1991): A Procedure to Estimate the Effective Heat Storage Capability of a Building, *Building and Environment*, vol 26, nº 2, pp. 179-188.

André, J.N. et al. (1994): Analysis Methodology, Experimental Investigation, and Computer Optimization of a Passive Solar Commercial Building in the Belgian Climate. *Solar Energy*, vol 52, nº1, pp. 9-25.

Penman, J.M. (1990): Second Order System Identification in the Thermal Response of a Working Scholl, *Building and Environment*, vol 25, nº 2, pp. 105-110.

Penman, J.M. et al.(1996): Simplified Thermal Response Modelling in Building Energy Management. Paper III: Demonstration of a Working Controller, *Building and Environment*, vol 31, nº 2, pp. 93-97.

Rodriguez, E.A. (1990) Sistematizacion de Acoplamientos Termicos y Termoaeraulicos en la Simulation de Edificios, *Tese de Doutorado* : Universidade de Sevilha, 1990, 227 p.

Signor, R. (1999): Análise de Regressão do Consumo de Energia Elétrica Frente a Variáveis Arquitetônicas para Edifícios Comercias Climatizados em 14 Capitais Brasileiras, *Dissertação de Mestrado*, UFSC.