



ANÁLISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA FRENTE A VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS PARA EDIFÍCIOS COMERCIAIS CLIMATIZADOS EM 14 CAPITAIS BRASILEIRAS

R Signor; R Lamberts

Universidade Federal de Santa Catarina

Depto. de Engenharia Civil

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

88040-900 - Florianópolis/SC - Brasil

Fax: + 55 (48) 331-9770

e-mail: resignor@zipmail.com.br; lamberts@ecv.ufsc.br

RESUMO

Este trabalho equaciona o consumo de energia elétrica de edifícios de escritórios climatizados artificialmente para climas de 14 capitais brasileiras, a saber, Belém, Brasília, Curitiba, Florianópolis, Fortaleza, Maceió, Natal, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, Salvador, São Luís, São Paulo e Vitória.

Regressões lineares múltiplas foram desenvolvidas para cada cidade estudada, correlacionando o seu gasto energético anual a diversas variáveis arquitetônicas, construtivas e climáticas, estas já processadas para cada localidade.

Diversas variáveis foram testadas para buscar-se aquelas de maior importância na determinação do consumo de eletricidade. Os parâmetros selecionados englobam o tamanho do prédio (número de pavimentos e área de planta), a composição de suas fachadas (quantidade de áreas envidraçadas), materiais constituintes (tipos de telhados e vidros) e outras características, como brises e cores de fachadas e cobertura.

As equações obtidas são bastante simples e possuem bom ajuste, com r^2 superior a 0,99 para quase todas as localizações.

ABSTRACT

The aim of this work was to predict the consumption of electric energy of office buildings artificially air-conditioned, for 14 (fourteen) Brazilian capitals, (Belém, Brasília, Curitiba, Florianópolis, Fortaleza, Maceió, Natal, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, Salvador, São Luís, São Paulo and Vitória), subjected to different climates.

Multiples linear regressions for diverse architectural, constructive and climatic variables were carried on for each city analysed and correlated with its annual energy consumption.

Many variables were tested to seek those more important to establish the electricity's consumption. The aspects that have been selected are the building's size (number of floors and the project area), the facade composition (quantity of glazed areas), materials (kind of roof and glass) and other characteristics, as solar protection, facade and roof color.

The equations demonstrate good result with r^2 higher than 0.99 for most of the cities. This fact and the simplicity of the formulas give us the conviction that the study's objectives have been reached with satisfactory results.

1 Introdução

O uso eficiente de energia elétrica possui hoje a maior consideração que já teve em nosso país, pois, atualmente, são comuns as campanhas publicitárias de informação e estímulo a conservação de energia elétrica. As recentes crises no setor de distribuição que vêm originando blecautes nas regiões sul e sudeste e a falta de recursos para investimentos no setor são fatores predominantes na atual atribuição de importância ao tema.

As iniciativas de conservação surgiram na década de 80, sendo que em 1985 foi iniciado o Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica, o PROCEL, que vem desde então implementando variadas medidas de conservação, e é hoje o mais importante órgão nacional de implementação de eficiência, coordenando programas e pesquisas no tema em todo o território brasileiro.

No entanto, mesmo com as medidas que vêm sendo tomadas, ultimamente o regime de consumo nacional de energia elétrica tem atingido o patamar mais alto de sua história, chegando a demandas de 95% da capacidade disponível. Tal fato põe em teste todo o sistema, já que a menor falha tende a provocar grandes colapsos, como estes que vêm ocorrendo e que são noticiados em toda a imprensa nacional.

Procurando diminuir tal problema é que hoje busca-se aumentar a eficiência no consumo de maneiras distintas, seja modernizando equipamentos para que consumam menos para realizar o mesmo trabalho, seja planejando melhor a construção de novos prédios para que estes ofereçam a seus ocupantes todos os serviços e confortos necessários com um consumo menor de energia. É aqui que se insere este trabalho, que se relaciona a diversos detalhes do projeto arquitetônico que podem ser controlados de maneira a possibilitar ganhos significativos de eficiência, desde que corretamente explorados.

1.1 Justificativas

Os principais responsáveis pelo consumo elevado de energia elétrica no país são os setores industriais, residenciais, comerciais e públicos. A energia consumida nos edifícios destes setores representa mais de 46% do total nacional. Além disso, nos últimos anos o crescimento do consumo da indústria foi pequeno, e o crescimento do setor residencial apresentou-se atrelado, basicamente, à ligação de novos consumidores. Estes fatos fazem com que a influência dos setores público e comercial aumente ainda mais, como também a importância deste trabalho.

Nas edificações dos setores público e comercial grande parte do consumo é atribuída a variáveis arquitetônicas e construtivas já que, em média, 64% de seu consumo é devido ao condicionamento ambiental (que vem crescendo constantemente) e iluminação (GELLER, 1994), razão pela qual pode-se demonstrar a responsabilidade dos projetistas e construtores no consumo final de energia elétrica nas construções. Estima-se que edifícios com projetos adequados possam consumir em torno de 30% menos energia que outros que ofereçam níveis de conforto e utilização similares (GÓMEZ et alii, 1995).

O aumento da eficiência no consumo de energia elétrica em edificações depende, no entanto, de orientações e prescrições de uma legislação específica para o tema, a exemplo do que ocorre nos países desenvolvidos. Infelizmente uma norma deste tipo ainda não existe no Brasil, onde grande parte dos prédios energeticamente ineficientes poderiam ter sido coibidos por uma legislação que os regulasse.

As equações encontradas podem auxiliar tanto os profissionais que desejem quantificar a influência de suas decisões de projeto no consumo posterior de edifícios, quanto servir de subsídio para uma futura norma nacional.

2 Metodologia

O primeiro passo do trabalho foi a definição do tipo de edificações que seriam estudadas. Optou-se por edifícios de escritórios climatizados artificialmente pela grande contribuição que estes dão ao consumo nacional. Além disso, prédios deste tipo têm seu comportamento mais fácil de ser modelado, uma vez que seus padrões de uso, número de ocupantes e atividades são bem definidos.

Também merece atenção o conjunto de variáveis a ser estudado. Entre variáveis construtivas e de operação são inúmeras as que têm importância na definição do consumo dos prédios. Optou-se basicamente por aquelas que possam ser definidas na fase de projeto arquitetônico e que, isoladas ou em conjunto com outras características, tivessem o maior potencial de economia aliado à simplicidade de implantação. Buscando conhecer quais os parâmetros que melhor se enquadrassem nestas exigências, efetuaram-se algumas simulações prévias.

O software utilizado para estas e todas as demais simulações do trabalho foi o Visual DOE, versão comercial do DOE2. 1E que foi desenvolvido pelo Department Of Energy dos Estados Unidos e é um dos mais utilizados em todo o mundo nesta área.

O primeiro edifício simulado, que serviu de base para os primeiros trabalhos, possuía forma retangular, com 20x40 m, 12 pavimentos, com orientação norte para a maior fachada e pé-direito de 3,0 m. O telhado do prédio era composto por telhas de fibrocimento seguidas de uma laje de concreto termicamente isolada. As paredes externas seriam construídas em tijolos cerâmicos 6 furos, e seu WWR foi de 50%, com vidros claros 3,0 mm ($U=6,31 \text{ W/m}^2\text{K}$; $SC=1,0$) e $PF=0,5$. O prédio não possuía forro e fora dividido em 5 zonas térmicas sendo quatro perimetrais e uma central, atendidas por um ar condicionado por zona do tipo PTAC – Packaged Terminal Air Conditioner, com eficiência de 10,00 Btu/h/W. O ar condicionado não aquecia o ambiente, somente resfriava-o, pois este é o tipo de aparelho necessário para a maioria dos edifícios brasileiros de escritórios, conforme pode-se verificar pelas cartas bioclimáticas das cidades estudadas.

Depois de definidas as características gerais do prédio, partiu-se para o primeiro grupo de simulações, sendo que 27 variações foram estudadas para que as principais tendências fossem detectadas. Forma, dimensões, pé-direito, cargas internas, orientação, WWR, temperatura interna, transmitâncias das janelas, iluminação natural, cortinas, sistemas e equipamentos de ar condicionado, infiltração e número de pavimentos foram testados nesta etapa.

Com o auxílio dos resultados destas simulações pôde-se definir alguns dos parâmetros que foram descartados para o restante do trabalho. A forma retangular com núcleo vazio, por exemplo, embora demonstrasse ser bastante influente não foi posteriormente estudada por não se tratar de prática corrente em nosso meio, e a forma quadrada não demonstrou ser significativa. Falta de influência também descartaram o pé-direito, a orientação, a temperatura de ajuste do ar condicionado, cortinas, infiltração e o número de lâminas de vidro, que afeta basicamente a transmitância da janela. A iluminação natural é uma questão complexa e bastante variável, causa pela qual não foi estudada neste trabalho, embora apresente grande potencial de economia. Caso semelhante é o do ar condicionado, que deverá ser estudado com maior profundidade no futuro em trabalho específico, já que oferece potencial e um vasto campo de possibilidades a serem exploradas. As demais variáveis foram analisadas com maior rigor neste trabalho.

O próximo passo dado foi a obtenção de resultados de simulações, cobrindo as variações dos parâmetros mais significativos no fenômeno. Tais variáveis eram o tamanho do edifício, os materiais que o compõe, a relação janela/fachada, brises e carga interna instalada, conforme mostra a tabela 1.

Para a consideração do tamanho do prédio fez-se necessário considerar suas dimensões em planta e altura como novas variáveis ($A_{\text{fachada}}/A_{\text{total}}$ e $A_{\text{cobertura}}/A_{\text{total}}$). Isto permitiu que o consumo pudesse ter uma relação linear com cada parâmetro, simplificando a análise e os tratamentos posteriores. A figura 1 ilustra o fenômeno.

Tabela 1: Variáveis consideradas nas regressões.

Parâmetro	Descrição
A_{cob}/A_{total}	relação entre a área de cobertura e a área construída
A_{fach}/A_{total}	relação entre a área de fachada e a área total edificada
WWR	relação entre a área envidraçada e a área de fachada
PF	fator de projeção horizontal dos brises
SC	fator de sombreamento dos vidros
$U_{cobertura}$	Transmitância da cobertura
$\alpha_{cobertura}$	Absortividade da cobertura
$U_{fachada}$	Transmitância das paredes externas
$\alpha_{fachada}$	Absortividade das paredes externas
ILD	densidade de carga interna instalada

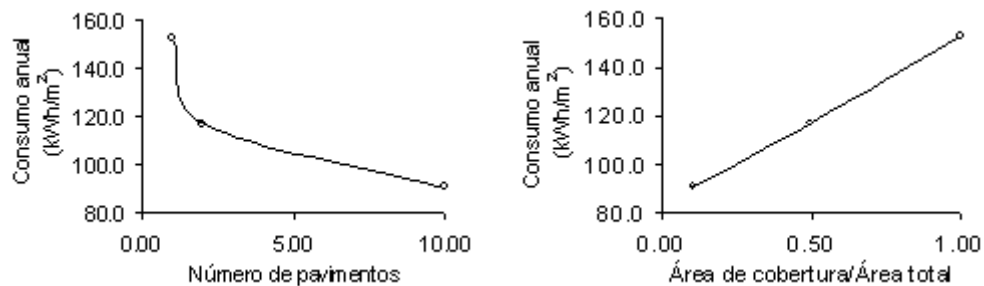


Figura 1: Linearização do consumo frente ao número de pavimentos.

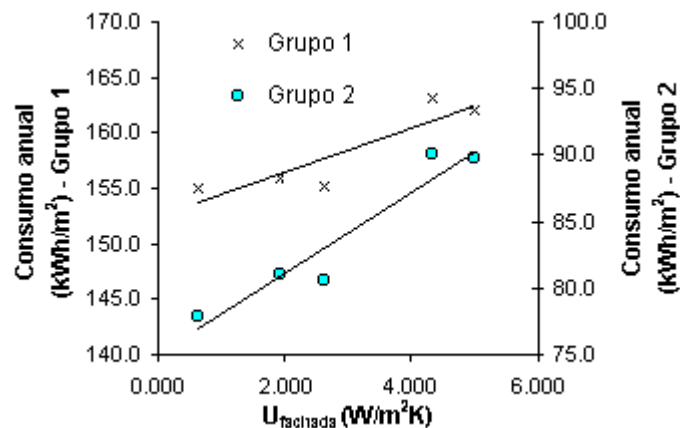


Figura 2: Comportamento do consumo frente à transmitância das paredes externas.

Assim, utilizando-se todos os parâmetros e suas possíveis combinações, chegou-se (para 3 valores distintos por parâmetro) a $3^{10}=59049$ simulações por cidade. Este valor

é extremamente elevado, inadmissível de ser executado face ao tempo necessário para tal. Partiu-se então para um estudo piloto, buscando-se avaliar destes parâmetros àqueles que possuísse tendência linear. Com isto, em um grupo menor de simulações seria possível prever aquelas variáveis que apresentassem tendências lineares e diminuir o seu número de variações de 3 para 2, totalizando $2^{10}=1024$ simulações, valor já aceitável para uma cidade.

As simulações foram efetuadas e então se percebeu claramente as tendências de consumo frente à variação de cada parâmetro. Das 10 variáveis estudadas, nove apresentaram influência claramente linear no consumo de energia elétrica. Somente a transmitância das paredes externas foi exceção, apresentando o comportamento mostrado na figura 2. Como este parâmetro demonstrou ser não-linear, optou-se por descartá-lo da análise, ficando-se então com 512 simulações por cidade.

Para a análise de regressão foram estipulados dois valores para cada parâmetro. Combinações de todos os parâmetros foram então estudadas, de forma que nenhuma combinação fosse esquecida no momento das simulações finais. Com isto, o próximo passo foi à obtenção de resultados de simulações, cobrindo as variações dos parâmetros escolhidos e todas as suas combinações possíveis. Após isso efetuou-se análise de variância e regressão do consumo de energia elétrica de edificações frente aos parâmetros supracitados, para cada um dos 14 climas disponíveis.

3 Resultados

Após a definição dos valores utilizados para cada variável efetuaram-se as regressões para cada cidade analisada, iniciando-se por Belém.

A primeira hipótese assumida para a regressão foi a da simplificação extrema, em que a equação obtida considera todas as variáveis independentemente, sem levar em conta suas inter-relações. Como esperados todos os parâmetros tinham influência significativa, mas o r^2 da equação resultou em 0,8435. O baixo valor determinou a busca de equações que considerassem os agrupamentos necessários, como, por exemplo, a consideração das variáveis WWR e SC em uma só (WWR.SC), já que ambas são relacionadas aos vidros da edificação.

Neste método continuou-se agrupando variável conforme se julgasse necessário, sempre perseguindo o melhor ajuste possível da equação aos dados disponíveis. Após várias opções testadas para as equações chegou-se a sua forma final (eq.1).

$$C = a + b_1 \cdot \frac{A_{cob}}{A_{total}} + b_2 \cdot \frac{A_{cob} \cdot U_{cob} \cdot \alpha_{cob}}{A_{total}} + b_3 \cdot \frac{A_{fach}}{A_{total}} + b_4 \cdot \frac{A_{fach} \cdot WWR \cdot SC}{A_{total}} + b_5 \cdot \frac{A_{fach} \cdot WWR \cdot SC \cdot PF}{A_{total}} + b_6 \cdot WWR + b_7 \cdot WWR \cdot SC + b_8 \cdot PF + b_9 \cdot ILD$$

Assim obteve-se para cada cidade os valores dos coeficientes a, b_1 , ..., b_9 . Tais coeficientes podem ser visualizados na tabela 2.

Cidade	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	b ₉	r ²
Belém	0.1852	26.7333	21.5828	22.9030	121.2920	-69.3877	8.3352	-6.5732	-1.6465	3.4877	0.995
Brasília	0.2519	13.5155	16.9485	10.6659	98.8472	-58.3597	8.0296	-6.3926	-0.9805	3.1637	0.993
Curitiba	1.2263	4.1088	12.8814	5.5546	85.4248	-59.1657	5.2619	-4.2291	-1.1170	2.9686	0.986
Florianópolis	0.3248	21.3259	18.2102	15.5842	117.5037	-63.6895	6.6063	-5.3010	-0.8792	3.2376	0.996
Fortaleza	0.9016	25.6696	20.3421	20.9979	127.4440	-74.1659	6.2410	-4.9223	-2.0033	3.4487	0.995
Maceió	0.3545	24.9158	18.1697	17.2905	117.2060	-62.8371	6.8614	-5.4983	-0.9938	3.3823	0.996
Natal	0.8508	24.9889	19.5052	18.0043	123.0471	-65.8075	5.8330	-4.8250	-1.1651	3.4339	0.996
Porto Alegre	0.1834	19.8506	17.0976	13.4166	102.2652	-59.5099	7.8103	-6.0980	-0.9772	3.1766	0.994
Recife	0.6967	23.0309	19.0084	17.5862	117.1743	-64.2483	6.2336	-4.8821	-1.7850	3.4002	0.994
Rio de Janeiro	0.9426	33.0970	18.5129	22.8195	111.4680	-64.7343	6.6649	-5.4853	-1.4294	3.2942	0.992
Salvador	0.8042	39.2882	25.7574	28.8127	150.5586	-91.2173	7.4166	-5.9585	-1.9095	3.5709	0.995
São Luis	-0.0251	26.8401	18.5073	22.4462	129.5665	-68.9280	8.5627	-6.6757	-1.8573	3.5058	0.996
São Paulo	0.4589	18.5600	16.7289	13.9604	106.6288	-63.0035	6.5062	-5.1134	-0.7973	3.2334	0.996
Vitória	1.0075	18.5090	15.9077	14.8643	120.0666	-68.4767	6.7702	-5.2399	-1.3010	3.2937	0.995

Tabela 2: Coeficientes da correlação da equação 1 para as cidades estudadas.

4 Conclusões

As regressões resultantes do trabalho foram julgadas plenamente satisfatórias, uma vez que os modelos descrevem com precisão os consumos de energia elétrica dos edifícios considerados. Para todas as cidades consideradas houve bom ajuste, com valores de r^2 iguais ou superiores a 0,99. Praticamente todos os climas brasileiros estão representados, uma vez que as capitais analisadas espalham-se por quase todo o território nacional.

Cabe, no entanto, lembrar que embora as equações descrevam bem os consumos dos prédios em questão, há alguns fatores a serem considerados quando de sua utilização. Condições de contorno fizeram-se necessárias ao trabalho, para que simplificações fossem introduzidas e o estudo fosse viável. Cita-se algumas, como o tipo e sistema de ar condicionado com todas as suas características (eficiência, temperaturas de ajuste, etc.), todos os padrões de uso dos prédios, sua forma, etc.

Limitações do programa Visual DOE, utilizado nas simulações, também podem ser causas de erros nas estimativas de consumos. Pequenos problemas de algoritmo podem ocasionar diferenças de consumos simulados, acarretando também pequenas alterações nas fórmulas encontradas. Destaque merece o fato do tratamento linear que o programa dá a alguns parâmetros, tais como aqueles que envolvem radiação (WWR, PF, SC, α), cujos fenômenos não são lineares. Nos testes efetuados o consumo de energia elétrica apresenta-se diretamente proporcional a eles, tendo sido considerados estes resultados nas regressões aqui apresentadas.

Com os resultados deste trabalho, profissionais da área de projetos de edificações ganham uma ferramenta simples e confiável para avaliação da influência de suas decisões no comportamento energético da edificação. Além disso, o projeto brasileiro de normalização da eficiência energética em edificações conta com uma ferramenta a mais para suas prescrições, a exemplo das principais normas internacionais. Acatando-se a idéia de simplicidade da primeira versão da norma, as fórmulas matemáticas encontradas neste trabalho podem ser utilizadas para avaliação de projetos de novos empreendimentos.

5 Referências Bibliográficas

ASHRAE/IES (1993): Energy code for commercial and high-rise residential buildings. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta.

GELLER, H. S. (1994): O uso eficiente da eletricidade: uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética.

GÓMEZ, L. A., LAMBERTS, R. & SIGNOR, R. (1995): Comparação de resultados de simulação com o consumo energético medido num edifício de escritórios. in III Congresso Ibero-Americano de Ar Condicionado e Refrigeração, Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, São Paulo.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F.O.R. (1997): Eficiência energética na arquitetura. São Paulo, PW. 192p. il.

LAMBERTS, R. (1997): Energy efficiency in buildings in Brazil: towards a standard. Report presented to the International Energy Initiative.

SIGNOR, R. (1999): Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 122 p.

SIGNOR, R. (1995): Estudo do consumo de energia elétrica do Fórum utilizando o programa DOE-2. in V Seminário Catarinense de Iniciação Científica, Imprensa Universitária, Florianópolis.