

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE IMPLANTAÇÃO DO EDIFÍCIO NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Léa Cristina Lucas de Souza (1); Marcio Luís Yamaguti (2)

UNESP – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação
Av Luiz Edmundo Carrijo Coube 14-01 Vargem Limpa 17033360 Bauru-SP Fone/Fax: (14)3103-
6059

(1) e-mail: leacrist@faac.unesp.br

(2) e-mail: marcioyamaguti@yahoo.com.br

RESUMO

Essa pesquisa aborda as relações de variáveis de implantação do edifício com o consumo de energia elétrica de unidades residenciais. Os seguintes parâmetros construtivos são levados em consideração: orientação, altura do pavimento e fator de visão do céu (FVC). A partir de um levantamento de dados de consumo de energia elétrica e do perfil do usuário, diversas variáveis foram consideradas para desenvolvimento de um modelo de Redes Neurais Artificiais. A partir daquele modelo, foi possível determinar a importância relativa de cada variável. Os resultados mostram que apesar da orientação dos apartamentos ser a variável principal para o consumo de energia, a altura do pavimento e o fator de visão do céu são elementos que têm papel fundamental nesse consumo. Ressalta-se que acima de 24m de altura, os apartamentos não apresentam melhoria na eficiência energética e, além disso, que o incremento do FVC tem influência diferenciada conforme a orientação do apartamento.

ABSTRACT

This research studies the relationships of building location variables with the electrical energy consumption of residential units. The following building parameters are considered: orientation, stories heights and sky view factor (FVC). Data of electrical energy consumption and users' profiles were collected and several variables were considered for the development of an Artificial Neural Network model. This model allowed the determination of the relative importance of each variable. The results show that, although the apartment orientation is the most important variable for the energy consumption, the story height and the sky view factor play a fundamental role in that consumption. We highlight that building heights above 24m do not optimize the energy efficiency of the apartments and also that the SVF increment influences the energy consumption of the apartment according to their orientation.

1. INTRODUÇÃO

Com base nos dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o consumo de energia elétrica em janeiro de 2006 foi recorde no país, atingindo 47.968 megawatts (MW) médios diários, que significou um acréscimo de 5,23% em relação a janeiro do ano anterior. Esse quadro energético do país demonstra a necessidade de serem tomadas ações, que minimizem o consumo de energia elétrica.

Sabe-se que as atividades humanas exercidas nos ambientes internos acabam por determinar o desempenho energético do edifício, sendo essas influenciadas pelo seu projeto. Nesse sentido, as variáveis de implantação do projeto tornam-se ferramentas essenciais para que se alcance a eficiência energética na construção civil.

O consumo de energia na escala do edifício foi estudado por Carrières & Roriz (2005) em edifícios de escritórios, Papa, Jota & Assis (2005) em prédios públicos, Alucci; Buoro (2005) em fachadas de edifícios, enquanto as pesquisas de Assis (2002), Brandão & Alucci (2005), Souza et al (2005) estudaram o consumo de energia tendo em vista a preocupação com a escala da cidade.

No intuito de ser feito um estudo de interface entre o ambiente interno e a área urbana, nesse trabalho, tem-se como objetivo estudar as relações entre variáveis de implantação do edifício no consumo de

energia elétrica em unidades residenciais multifamiliares, com tipologia verticalizada. Procura-se com isso identificar a influência da orientação, da altura do pavimento e do fator de visão do céu (FVC) no consumo dos apartamentos.

Apesar da orientação e altura dos edifícios já se apresentarem como elementos frequentemente abordados nos estudos de eficiência energética, o FVC ainda se configura como aspecto a ser investigado. O FVC representa a porcentagem de céu visível a partir de um ponto intra-urbano e é um grande responsável pela liberação de calor das superfícies terrestre e formação de ilhas de calor. Nesse sentido, esse fator estabelece uma relação entre o edifício e o meio urbano, poucas vezes levado em consideração. Se por um lado a maior área de céu visível representa maior disponibilidade de luz natural, por outro também representa maior incidência solar sobre as superfícies, aumentando a carga térmica das construções. Portanto, é necessário identificar como esse fator age em conjunto com as demais variáveis de implantação e de que forma influem no consumo de energia elétrica dos edifícios.

Pela complexidade das relações dessas variáveis, propõe-se uma análise através do desenvolvimento de modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos, estuda-se uma edificação composta por unidades habitacionais multifamiliares, que apresenta tipologia construtiva verticalizada. A figura 1 apresenta foto e implantação do referido edifício. Trata-se de um conjunto de três blocos de edifícios (blocos A, B e C), todos com 12 pavimentos, 4 apartamentos por andar, com planta-tipo apresentada na figura 2.



Figura 1 – Caracterização do conjunto de edifícios estudado: foto e implantação.

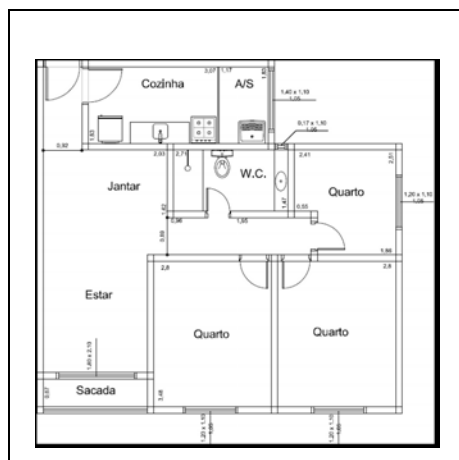


Figura 2 – Planta-tipo dos apartamentos.

A planta-tipo é encontrada em posições simétricas, conforme a coluna que ocupa o apartamento no bloco, alterando assim suas orientações. Para cada apartamento foi determinada a orientação, altura do pavimento e fator de visão do céu.

Quanto à orientação, adotou-se a seguinte designação: apartamentos com fachada principal orientada a NO e secundária a NE são aqui denominados NO-NE; apartamentos com fachada principal orientada a NO e secundária a SO são aqui denominados NO-SO; apartamentos com fachada principal orientada a SE e secundária a SO são aqui denominados SE-SO. Quanto à altura, foi estimadas em função do número do pavimento e com base em um pé-direito de 3m, variando-se até a altura até 36m. Quanto ao FVC, foram calculados através da extensão 3DSkyView (SOUZA et al, 2003), incorporada ao SIG ArcView. Os FVC foram considerados a partir do ponto médio das fachadas principais e secundárias de cada apartamento.

Dados do consumo de energia elétrica dos apartamentos foram levantados junto a CPFL-Companhia Paulista de Força e Luz e informações sobre o perfil do usuário foram obtidas através de questionários. Os questionários permitiram identificar outras variáveis do consumo de energia elétrica. Dessa forma, além das variáveis de interesse direto desse estudo - orientação, altura e FVC - foi considerado também o mês (inverno/verão), o número de moradores, a ocorrência de sombreamento, a existência de ar-condicionado e a existência de freezer.

Para estabelecer a contribuição das diversas variáveis, foi desenvolvido um modelo de Redes Neurais Artificiais (RNA), aplicando-se o software Easy NN, desenvolvido por Stephen Wolstenholme.

Simulando o comportamento dos neurônios do cérebro humano, nas RNA, os modelos são criados a partir de dados reais, tanto para variáveis de entrada, como variáveis de saída. Os dados são processados e há uma aprendizagem de padrões, a partir da qual a rede é desenvolvida e o modelo gerado. Uma vez reconhecidos os padrões com que se relacionam os dados, a rede pode então simular novos valores, desde que estejam inseridos entre os valores mínimos e máximos que geraram o próprio modelo. Silva et al (2004) apresentam detalhadamente essa técnica.

No caso desse trabalho, a variável de saída é o consumo médio mensal dos apartamentos, enquanto as variáveis de entrada são as variáveis de implantação e as demais levantadas com o questionário ao usuário. Utilizou-se a RNA para avaliar os pesos de variáveis no consumo de energia elétrica, não havendo intenção de identificar o modelo matemático em si, mas sim possibilitar uma avaliação da influência de cada variável.

Para cada modelo foram preparados três conjuntos de dados para aprendizagem. Na preparação de cada conjunto de dados, os dados reais foram selecionados aleatoriamente, separando-se 50% para a fase de treinamento (fase iterativa em que a rede “aprende”), 25% para a fase de validação (fase em que os pesos das variáveis são avaliados iterativamente) e 25% para a fase de teste (fase em que é possível simular com o modelo). Dentre os modelos desenvolvidos, o de melhor desempenho foi selecionado, levando-se em consideração o seu coeficiente de determinação e erro relativo.

Após o desenvolvimento e seleção do modelo, uma análise do comportamento de cada variável de implantação de interesse dessa pesquisa foi elaborada.

3. RESULTADOS

Dos modelos gerados por RNA, adotou-se o de menor erro relativo (cerca de 15%) e coeficiente de determinação de 0,72 (índices gerados a partir da correlação entre dados reais e dados simulados). A importância revelada para cada variável naquele modelo é apresentada na tabela 1. Das variáveis inseridas no modelo, as de implantação encontram-se grifadas na referida tabela.

Ressalta-se que, para o desenvolvimento do modelo, todas as variáveis foram essenciais, mesmo aquelas que atingiram valores abaixo de 10%. Testes foram elaborados na tentativa de desconsiderá-las, porém os resultados diminuíram o desempenho do modelo, aumentando o erro relativo e diminuindo o coeficiente de determinação.

Tabela 1 – Importância das variáveis no modelo de RNA.

<i>Variável</i>	<i>Importância relativa no modelo RNA</i>
orientação	0.15
mês (verão/inverno)	0.13
número de moradores	0.13
bloco (A, B ou C)	0.12
altura do pavimento	0.10
ocorrência de sombreamento	0.09
ar-condicionado	0.08
renda	0.08
freezer	0.07
FVC	0.07

Observa-se que a orientação se destacou como variável principal. Para uma análise mais detalhada das variáveis de implantação, foram feitos testes de simulação, aplicando-se o modelo. Para isso foi alterado apenas o valor da variável analisada, variando-a de seu valor mínimo ao seu valor máximo, e mantendo-se constante o valor médio das demais. Ressalta-se mais uma vez que a equação que representa o modelo não precisa ser identificada para a simulação, pois após desenvolvida a rede, ela fica acessível à alteração de variáveis, sem influir em seu modelo interno. Os resultados da influência das variáveis de implantação são apresentados na seqüência.

3.1 Influência dos blocos e orientações

Nessa simulação, alteraram-se os blocos e os quadrantes das fachadas dos apartamentos e consideraram-se os diferentes meses de inverno e verão. Levou-se ainda em conta a condição real de existência ou não de sombreamento entre os blocos, conforme a orientação analisada. As figuras 3 e 4 representam os gráficos resultantes dessa simulação.

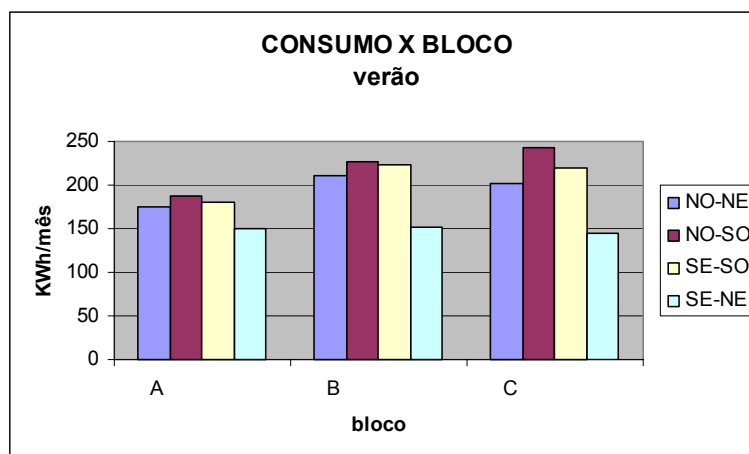


Figura 3 – Consumo de verão simulado por bloco para cada fachada.

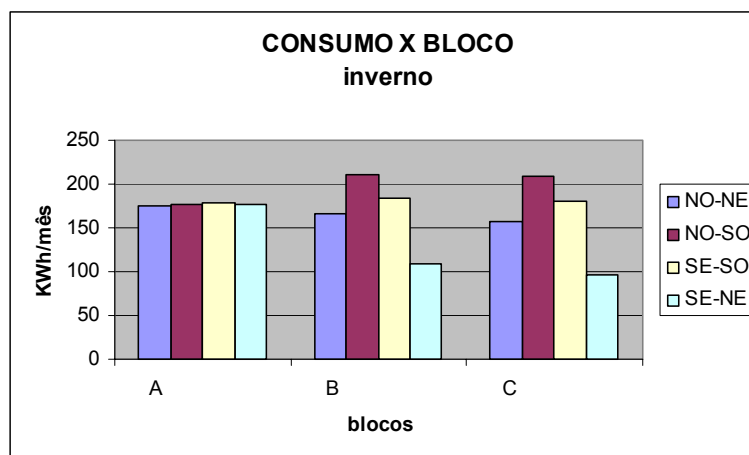


Figura 4 – Consumo de inverno simulado por bloco para cada fachada.

Enquanto para o bloco A, as médias de inverno e verão são semelhantes, para os blocos B e C, estas diferenças são mais significativas, com queda de consumo no inverno. A média geral de consumo é de 150 KWh/mês.

Os apartamentos orientados sobre os quadrantes NO-SO (fachada principal - fachada secundária) tenderam a ser os maiores consumidores, seguidos por aqueles implantados sobre o quadrante SE-SO. Quanto aos menores consumidores, os apartamentos voltados a SE-NE tenderam ao menor consumo e maior equilíbrio de valores entre eles.

3.2 Influência da altura do pavimento

Utilizando-se o mesmo modelo, foram alteradas as alturas dos pavimentos e mantidas as demais variáveis em seus valores médios. Os resultados analisados para verão e inverno em função das fachadas e dos blocos são apresentados das Figuras 5 a 7.

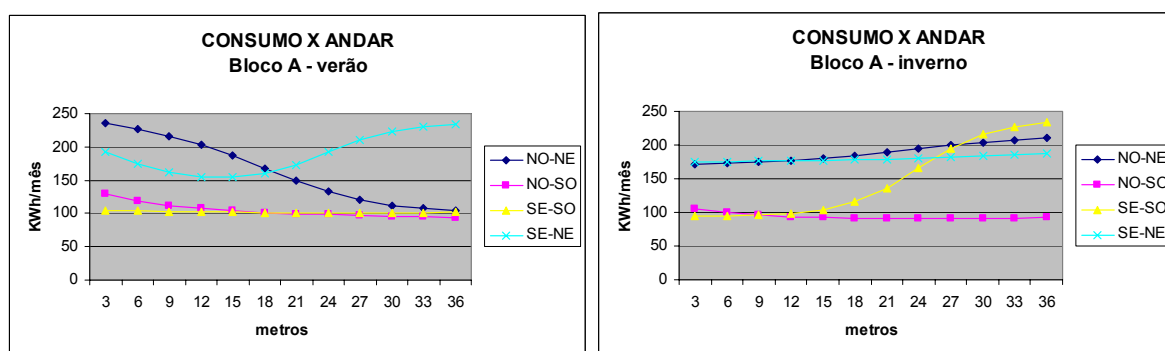


Figura 5 – Consumos de verão e inverno simulado por altura do pavimento para o bloco A.

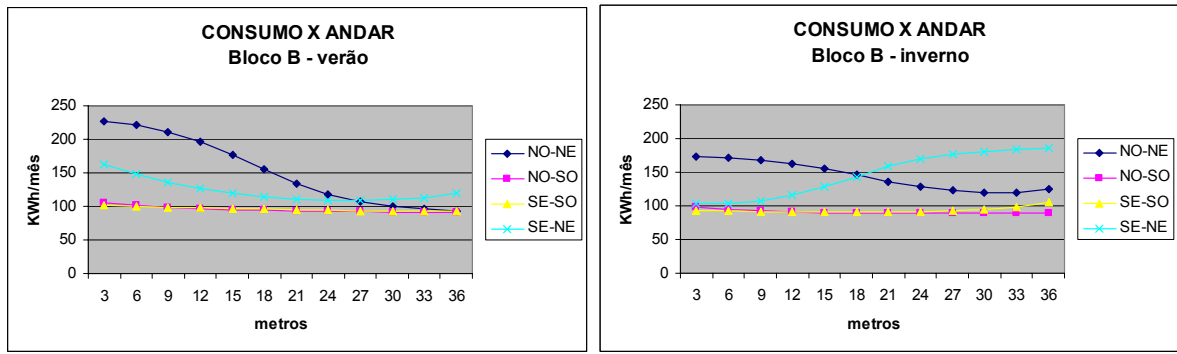


Figura 6 – Consumos de verão e inverno simulado por altura do pavimento para o bloco B.

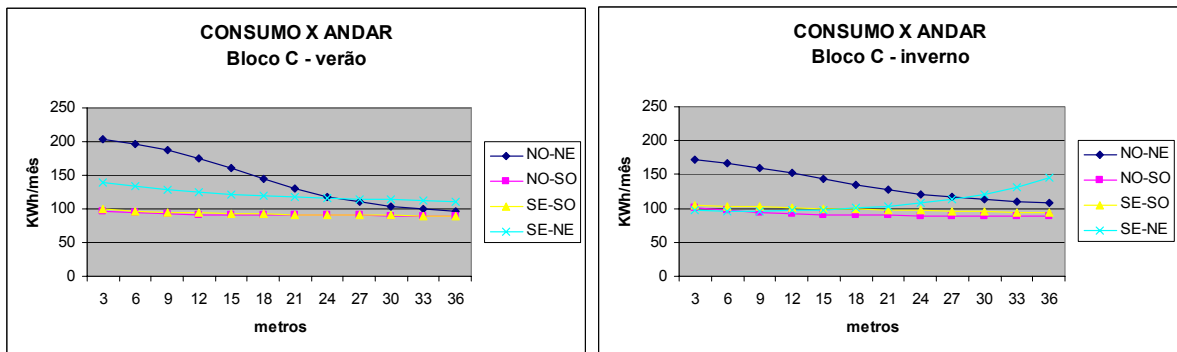


Figura 7 – Consumos de verão e inverno simulado por altura do pavimento para o bloco C.

Com pequenas exceções, a influência da altura do apartamento é semelhante para os três blocos estudados. Na maioria das situações, o incremento na altura dos apartamentos voltados a NO-NE, indicou queda no consumo, alcançando valores abaixo da média de 150KWH/mês a partir dos 18m. A partir de 24m de altura essa queda tendeu a se estabilizar. O oposto foi verificado para a fachada SE-NE, para a qual a maior tendência é de aumento do consumo à medida que se aumenta a altura do pavimento. Em alguns casos esse aumento de consumo para os apartamentos a SE-NE ocorre acima dos 18m de altura. Para as fachadas NO-SO e SE-SO, com pequenas exceções (como no bloco A no inverno), a tendência é de equilíbrio, mesmo que a altura do pavimento seja alterada, mantendo-se abaixo da média de 150KWh/mês.

3.3 Análise da influência do FVC

Os valores de FVC testados variaram de 0,3 a 0,5, respeitando-se os limites máximo e mínimo do modelo gerado. É ressaltado aqui que os valores máximos e mínimos testados são diferentes para cada fachada nos blocos, pois foram simulados apenas para os valores reais ocorridos em cada bloco e por isso, nos resultados apresentados nas figuras de 8 a 10, os gráficos indicam algumas colunas inexistentes.

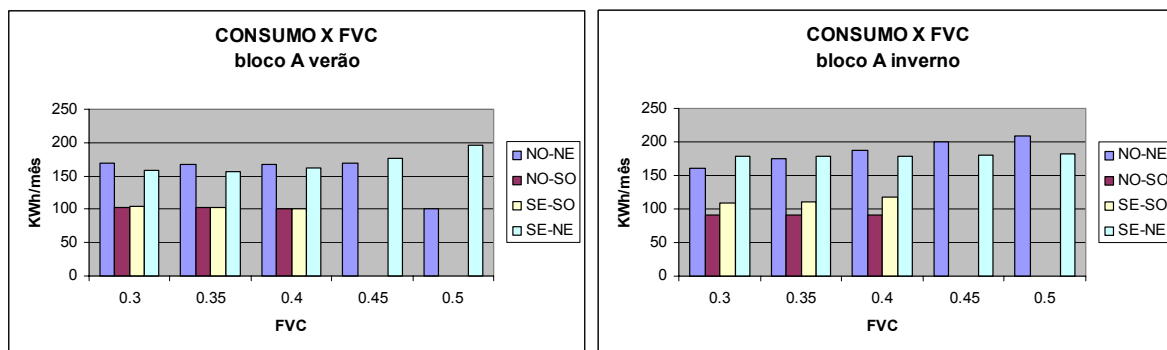


Figura 8 – Consumos de verão e inverno simulado por FVC o para o bloco A.

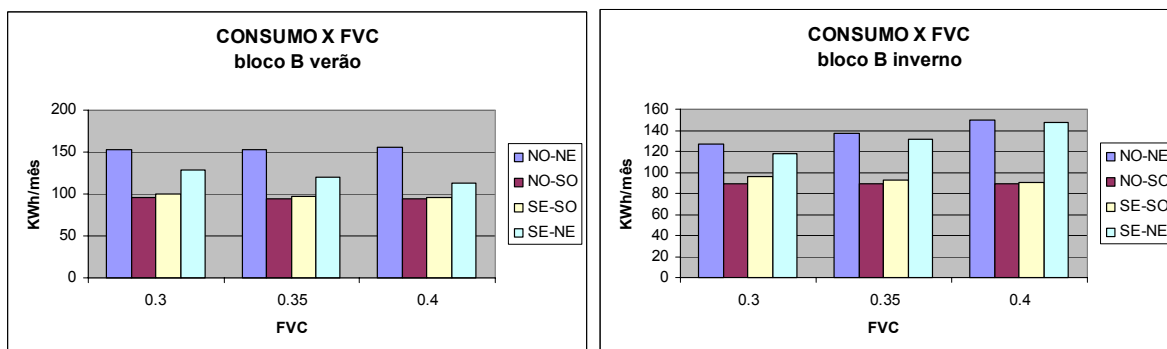


Figura 9 – Consumos de verão e inverno simulado por FVC o para o bloco B

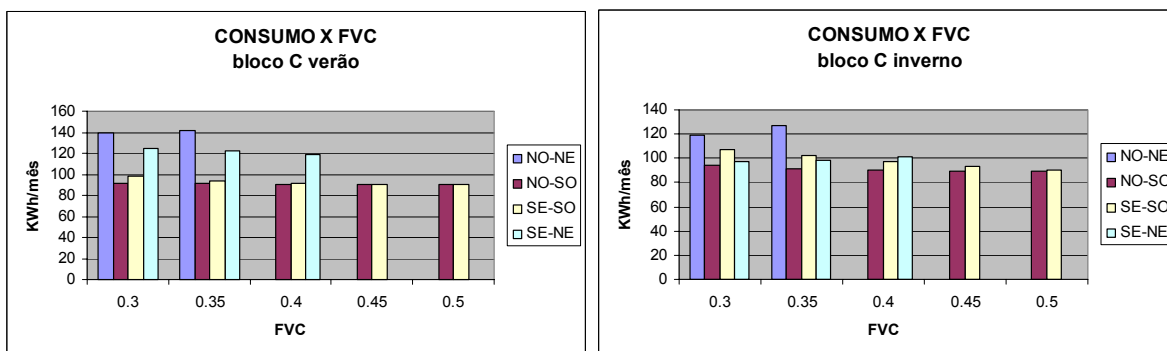


Figura 10 – Consumos de verão e inverno simulado por FVC para o bloco C.

Para cada fachada, verifica-se um comportamento diferenciado em relação ao FVC. Para apartamentos voltados a NO-NE, a maioria das situações apresentou um pequeno aumento do consumo com o incremento do FVC, principalmente nos meses de inverno. Para a fachada NO-SO, a alteração do FVC não representou mudança significativa de consumo. Na orientação SE-SO, o aumento do FVC gerou, na maioria das vezes, uma pequena redução no consumo de energia. Por último, para a orientação SE-NE, com exceção do verão nos blocos B e C, uma tendência de aumento do consumo com o incremento do FVC é verificada, principalmente para o bloco C no inverno.

4. DISCUSSÕES

Pelo número de dados envolvidos, essa análise não seria facilmente realizada apenas pela comparação direta de valores reais, já que cada apartamento analisado encontra-se em uma determinada condição. Nesse sentido, as RNA se mostraram bastante eficientes, permitindo a identificação da importância relativa de cada variável no consumo de energia.

Quanto à relevância das condicionantes de implantação, fica evidenciada a orientação como fator fundamental para o consumo de energia elétrica, porém, o peso das variáveis é bem distribuído, com todas assumindo valores próximos e variando entre 7% e 15%. Isso sugere que todas as variáveis são indispensáveis para a previsão do consumo. De fato, essa hipótese foi confirmada quando a tentativa de desconsiderar as variáveis de menor importância (abaixo de 10%), levaram a uma queda no desempenho do modelo.

Na comparação entre os três blocos, observa-se que o bloco A é aquele implantado mais a leste e o bloco C mais a oeste, estando o bloco B entre os dois. Considerando-se a questão de insolação, os blocos A e B deveriam apresentar menor consumo de energia do que o C, já que esse recebe radiação solar direta no período da tarde. De um modo geral isso se confirma.

Quando considerada a questão da altura dos pavimentos, os apartamentos a NO-NE sofrem mais influência do que os demais, reduzindo os seus consumos com a altura até 24m. Acima de 24m a queda permanece estabilizada. Isso indica que a melhor eficiência energética devido ao incremento da altura ocorre para apartamentos a NO-NE, somente até o oitavo pavimento. Por outro lado, quando estudado o incremento do FVC para essa mesma orientação, ocorre tendência de aumento do consumo. Esses dois parâmetros agindo em conjunto acabam por se compensar e equilibrar o consumo desses apartamentos.

No caso de apartamentos a NO-SO, apontados como os maiores consumidores, tanto o incremento na altura, como do FVC, não representam alteração significativa no seu consumo. Acredita-se que a sua incidência solar desfavorável, devido à orientação, restrinja a ação das demais variáveis de implantação. Isso indica que a questão térmica está sendo prioritária para o consumo nessas fachadas.

Para aquelas fachadas sobre o quadrante SE-SO, apesar do aumento da altura não representar alteração significativa de consumo, o incremento do FVC leva a uma redução. Como esses apartamentos só sofrem incidência solar direta em horários restritos no início e fim do dia, o aumento do FVC leva à maior disponibilidade de luz natural, não influenciando em escala significativa na questão térmica, mas melhorando o conforto lumínico. Nesse caso, o uso da luz artificial pode ser minimizado pelo aumento do FVC.

Quanto aos apartamentos voltados a SE-NE, que são os menores consumidores, o incremento na altura e no FVC resultam em aumento do consumo de energia elétrica. São os apartamentos que oferecem melhor condição de insolação. Pode estar indicando que a maior disponibilidade de luz não é prioritária em relação à questão térmica.

Um quadro-síntese na tabela 2 indica as principais informações extraídas dessas discussões.

Tabela 2 – Quadro síntese da influência das variáveis de implantação no consumo de energia elétrica.

Orientação	Tendência de consumo em relação à média de 150KWh/mês	Incremento de Altura (de 3 a 36m)	Incremento de FVC (de 0,3 a 0,5)	Questão prioritária
NO-NE	↔	↓ até 24m ↔ acima de 24m	↑	lumínica e térmica
NO-SO	↑	↔	↔	térmica
SE-SO	↑	↔	↓	lumínica
SE-NE	↓	↔ abaixo de 18m ↑ acima de 18m	↑	térmica

Legenda: ↓ redução de consumo com o incremento da variável
 ↑ aumento de consumo com o incremento da variável
 ↔ neutralidade de consumo com o incremento da variável

5. CONCLUSÕES

Com o auxílio das RNA foi possível identificar tendências de consumo de energia elétrica e extrair informações importantes para o projeto do edifício. Os resultados indicaram que além da orientação, outras características de implantação do edifício, como a altura do pavimento e o fator de visão do céu, têm papel fundamental no consumo de energia elétrica, devendo ser características ponderadas desde o projeto.

Dentre as orientações estudadas, os apartamentos mais consumidores são aqueles voltados a NO-SO, o que indica ser esta uma fachada cuja localização de aberturas representa queda na eficiência do apartamento. Os menores consumidores são representados por apartamentos voltados a SE-NE, já que estão sujeitas ao menor tempo de insolação.

Em relação à altura das edificações, os resultados para as fachadas NO-NE e SE-NE indicam que acima de 24m de altura não há melhoria na eficiência energética do apartamento. Isso que corresponde a um edifício de no máximo 8 pavimentos.

Com relação ao FVC, o aumento ou queda no consumo de energia com o incremento do FVC é variável, conforme a fachada considerada. Quando este aumento representa alto ganho de calor por aumento do tempo de insolação, o aumento no FVC entre valores que variam de 0,3 a 0,5, tende a representar incremento no consumo de energia elétrica. Porém para fachadas cuja incidência solar é mais restrita, esse aumento pode significar redução no consumo.

6. REFERÊNCIAS

ALUCCI, M. P.; BUORO, A. B. Aplicação do software Fachada 2.0 para avaliação do desempenho térmico de fachadas como e sem brise. In.: **ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO, 8, e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 4**, 2005, Maceió. Anais dos Encontros Nacionais sobre Conforto no Ambiente Construído. Maceió: RORIZ, M., CABUS, R., GHISI, E., 2005, p. 9-16.

ASSIS, E. S. Critérios de acessibilidade ao sol e à luz natural para conservação de energia em escala de Planejamento Urbano. In.: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE**

CONSTRUÍDO, 9, 2002, Foz do Iguaçu. Anais dos Encontros Nacionais sobre Conforto no Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, 2002, p. 991-1000.

BRANDÃO, R. S.; ALUCCI, M. P. Procedimento para avaliação do impacto de novas edificações no consumo energético do entorno. In.: **ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO, 8, e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**, 4, 2005, Maceió. Anais dos Encontros Nacionais sobre Conforto no Ambiente Construído. Maceió: RORIZ, M., CABUS, R., GHISI, E., 2005, p. 230-239.

CARRIÈRES, K. M.; RORIZ, M. Desempenho térmico e consumo energético de edifícios de escritórios em São Carlos, SP. In.: **ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO, 8, e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**, 4, 2005, Maceió. Anais dos Encontros Nacionais sobre Conforto no Ambiente Construído. Maceió: RORIZ, M., CABUS, R., GHISI, E., 2005, p. 2222-2224.

PAPA, R. P.; JOTA, P. R. S.; ASSIS, E. S. Normalização do consumo específico do edifício sede da CEMIG em função da temperatura externa. In.: **ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO, 8, e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**, 4, 2005, Maceió. Anais dos Encontros Nacionais sobre Conforto no Ambiente Construído. Maceió: RORIZ, M., CABUS, R., GHISI, E., 2005, p. 1416-1423.

SILVA, A.N.R; RAMOS, R. A.R.; SOUZA, L.C.L; RODRIGUES, D.S; MENDES, J.F.G. **SIG Uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes**. São Carlos, SP: Ed. Dos Autores, 2004.

SOUZA, L. C. L.; PEDROTTI, F. S.; LEME, F. T.; CORRÊA, J. R. Consumo de energia urbano: influência do perfil do usuário, da geometria urbana e da temperatura. In.: **ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO, 8, e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**, 4, 2005, Maceió. Anais dos Encontros Nacionais sobre Conforto no Ambiente Construído. Maceió: RORIZ, M., CABUS, R., GHISI, E., 2005, p. 1960-1969.

SOUZA, L.C.L.; RODRIGUES, D.S.; MENDES, J.F.G. A 3D-GIS extension for sky view factors assessment in urban environment, **Proc. of the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management**, Sendai, 27-29 May, 2003: Japan.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao auxílio prestado pela FUNDUNESP, FAPESP e CNPq em diversas etapas de desenvolvimento dessa pesquisa.