



Parametrização aplicada ao desempenho energético de edificações

Laila Oliveira Santana,
Ítalo Bruno Baleeiro Guimarães,
Joyce Correna Carlo

Como citar esse texto: SANTANA, L.O; GUIMARÃES, Í.B.B; CARLO, J.C., 2015. Parametrização aplicada ao desempenho energético de edificações. **VIRUS**, São Carlos, n. 11, 2015. [online] Disponível em: <<http://www.nomads.usp.br/virus/virus11/?sec=4&item=4&lang=pt>>. Acesso em: dd mm aaaa.

Laila Oliveira Santana é Arquiteta e Urbanista pela UFV e parte do programa de pós-graduação da UFV. Possui experiência nas áreas de Eficiência Energética, Gramática da Forma e Modelagem Generativa.

Ítalo Bruno Baleeiro Guimarães é Arquiteto e Urbanista pela UFV e parte do programa de pós-graduação da UFV. Possui experiência nas áreas de Parametrização, Eficiência Energética e Otimização.

Joyce Correna Carlo é Arquiteta, Pós-doutorada e professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa. Suas pesquisas e experiências são na área de Arquitetura Bioclimática, Eficiência Energética e Simulações Termo-energéticas e de Iluminação, tendo realizado consultorias e projetos arquitetônicos.

RESUMO

A parametrização de medidas de eficiência energética é praticada nos processos de simulação termo-energética, cujas avaliações gradativas por simulação visam obter soluções a ser aplicadas em projeto. Os procedimentos evoluíram para a otimização de soluções cujos parâmetros analisados têm impactos interdependentes no desempenho da edificação. Tais métodos envolvem análises complexas de sensibilidade com uso de métodos como Hipercubo Latino ou Redes Neurais, mas também análises simplificadas com métodos de regressão linear. O Programa Brasileiro de Etiquetagem do Inmetro faz uso de equações paramétricas de regressão linear para determinar o nível de eficiência energética de unidades habitacionais. Este estudo investiga parâmetros da forma de um modelo de habitação com tais modelos de regressão. A variação de dois parâmetros da forma (profundidade e largura de ambientes internos), impactou diversos parâmetros da etiquetagem, cujos resultados indicam os caminhos para introduzir uma gramática da forma da eficiência energética em habitações.

PALAVRAS-CHAVE

parametrização, eficiência energética, análises de sensibilidade, etiquetagem residencial.

1. INTRODUÇÃO

A parametrização aplicada aos estudos de eficiência energética em edificações iniciou-se com a análise de sistemas prediais ou materiais construtivos. Seu objetivo era reduzir o consumo da edificação (CÓRDOBA; MACIAS; ESPINOSA, 1998) em uma análise que envolvia a relação entre os custos de instalação de medidas de eficiência energética e sua economia de energia (ROSENFELD, 1996). Conforme os recursos computacionais avançaram em capacidade de processamento e interfaces gráficas, as avaliações por simulação do desempenho energético passaram a incluir parâmetros que impactam visualmente a forma da edificação e da fachada. Como exemplo, proteções solares *brise-soleil* de geometrias complexas impactam o desempenho ao integrar a economia de energia do ar condicionado pelo sombreamento com a economia de energia da iluminação artificial pelo aproveitamento da luz natural (CARLO; PEREIRA; LAMBERTS, 2004). As economias mencionadas são conflitantes, e as soluções obtidas com a simulação paramétrica visam encontrar a forma ótima entre dois objetivos que apresentam resultados inversos para uma mesma solução. Tais análises tendiam a ser voltadas a um ou dois problemas específicos para serem incorporadas ao projeto e avaliadas globalmente.

Araújo, Pedrini e Tinôco (2008) descreveram o processo de projeto baseado em simulação energética. A partir de uma proposta inicial da edificação, proveniente de estudos volumétricos, os problemas específicos de cada parte – como ventilação de átrios devido à porosidade ou sombreamento das fachadas – foram simulados e avaliados separadamente e incorporados ao projeto, cada qual a seu momento. É preciso destacar que, embora as medidas de eficiência tenham sido avaliadas em momentos distintos, elas não foram avaliadas individualmente: a edificação foi simulada por inteiro para que os impactos da solução anterior fossem contabilizados na análise seguinte. Vê-se, portanto, um desenvolvimento linear de uma proposta ao incorporar, gradativamente, as soluções projetuais de eficiência energética em um processo tradicional de criação arquitetônica. A simulação paramétrica, neste sentido, é um processo auxiliar para a solução de problemas que fornece dados para que o arquiteto analise o desempenho e conceba as soluções mais apropriadas ao caso.

Outros métodos para a tomada de decisões projetuais envolviam processos de otimização de casos a fim de analisar a interação entre parâmetros e seus impactos no desempenho da edificação. As soluções eram avaliadas linearmente: a cada etapa, um conjunto de problemas era investigado. Como uma solução impacta o desempenho da outra, a parametrização implicava em: avaliar todas as soluções isoladamente; identificar aquelas de maior impacto; incorporá-las ao modelo base para, em seguida, avaliar o desempenho dos demais parâmetros neste novo modelo base e, assim, repetir o processo (MARTINAITIS et al., 2004).

É o que mostrou Carlo (2008) nas simulações para otimizar o desempenho de fachadas de edificações comerciais. Usou parâmetros que descrevem a relação das áreas envidraçadas nas fachadas, dos vidros das janelas e forma de proteções solares com o objetivo de encontrar a melhor solução que integra os custos provenientes da economia de energia ao investimento de implantação da medida ainda na fase de projeto. Adotou, portanto, um processo de otimização linear com análise paramétrica, em que todos os parâmetros eram simulados individualmente, o de maior impacto era identificado e incorporado, para que os demais parâmetros fossem avaliados na rodada seguinte de simulações. Esses parâmetros foram posteriormente usados para criar modelos numéricos por regressão linear multivariada que descrevem os efeitos da fachada no desempenho de edificações (BRASIL, 2010).

Na década de 2010, os recursos de modelagem e simulação tornaram-se mais avançados, assim como os processos de interações de parâmetros no desempenho energético. As avaliações passaram a incorporar maior número de parâmetros interdependentes e ampliou o escopo de interações a milhares de casos (EISENHOWER et al., 2012). No Brasil, os metamodelos criados pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações em 2014, cuja pesquisa usa dezenas de computadores *slave* da instituição para processamento de 1 milhão de simulações paramétricas no *EnergyPlus* (LAMBERTS, 2014) aguardam publicação. Os

processos estatísticos passaram a ser adotados na busca da solução ótima, a partir de outros métodos matemáticos que não de regressão, que aumentassem a abrangência e confiabilidade dos casos estudados (MELO et al., 2013).

No item 2, algumas das abordagens difundidas na década de 2010 são apresentadas para fundamentar a análise apresentada neste artigo sobre a forma da habitação voltada para os critérios da etiquetagem de eficiência energética.

Em geral, os estudos de eficiência energética lidam com parâmetros relacionados aos sistemas, tais como automação, iluminação e condicionamento de ar (ROSENFELD, 1996; MARTINAITIS, 2004), ou com parâmetros referentes aos materiais da edificação (SILVA; GHISI, 2014; SORGATO et al., 2014). A forma arquitetônica é raramente avaliada em termos de desempenho. Ela foi investigada por Carlo e Lamberts (2007), em que indicadores da volumetria foram parametrizados mas, ao perceber que o desempenho não é linear à volumetria, Carlo (2008) criou mais de uma equação de regressão para o PBE Edifica comercial (BRASIL, 2010) em função das dimensões da edificação. Em abordagem semelhante, Versage (2009) e Sorgato (2009) analisaram tipologias de habitações multi e uni-familiares para enfim desenvolverem as equações de regressão para a etiquetagem residencial para análise de cada ambiente separadamente (BRASIL, 2012). Assim, o presente trabalho investiga as alterações do desempenho energético conforme o PBE Edifica residencial (BRASIL, 2012) em função da alteração de dois parâmetros da forma de ambientes, profundidade e largura, que geram impactos em inúmeros parâmetros de desempenho de uma habitação, além dos impactos em sua forma final. Após apresentados os métodos estatísticos mais utilizados na área nos anos 2010, o trabalho focou-se na equação de regressão para análise paramétrica da etiquetagem residencial, onde sua relevância e aplicação são mostradas.

2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE PARÂMETROS ENERGÉTICOS DE EDIFICAÇÕES

2.1. Análise de sensibilidade

Segundo Tian (2013), análises de sensibilidade são ferramentas estatísticas com potencial para serem usadas nos estudos de parâmetros intervenientes no desempenho energético de edificações, ao auxiliar a tomada de decisões a partir da compreensão da influência de tais parâmetros na identificação de quais podem ser simplificados e quais devem ser mais robustos; na quantificação do nível de confiança de um modelo e na otimização de dados de entrada (HOPFE; HENSEN, 2011).

As técnicas para aplicação das análises de sensibilidade podem ser divididas em três diferentes categorias: triagem, local e global. As análises por triagem podem ser úteis para investigações preliminares ou para teste, mas são imprecisas. O conceito básico das técnicas de triagem é o teste dos dois valores extremos, máximo e mínimo, para os dados de entrada, enquanto os demais são mantidos com valores médios (SILVA; GHISI, 2013). Já as análises classificadas como de caráter local tem como conceito básico à variação mais ampla do intervalo de um determinado dado de entrada, mas ainda com demais parâmetros constantes. Tem como vantagens exigir um custo de tempo e um custo computacional pequeno, mas não considera a interação entre os parâmetros (SILVA; GHISI, 2013; TIAN, 2013). Finalmente, as análises de sensibilidade globais envolvem um custo de tempo e computacional elevados, mas permitem a variação dos parâmetros simultaneamente, assim como a análise de um intervalo completo de variação do parâmetro. Esse método é mais preciso e abrangente, e ainda permite a quantificação de índices globais de sensibilidade (SILVA; GHISI, 2013; TIAN, 2013).

Tais análises lidam com históricos ou bases de dados e possibilitam estimar resultados com mínimo de incerteza em relação a uma edificação real (MELO et al., 2012). Dependendo da complexidade do caso e da disponibilidade de tempo para conduzir a análise, a obtenção do histórico pode abranger todo o universo de possibilidades. No caso de um número extenso de dados, haverá a necessidade de selecionar uma amostra que represente esse universo.

2.2. Amostragem

Em casos onde há necessidade de seleção amostral, é importante garantir que a amostra utilizada para o estudo consiga representar e executar o método estatístico utilizado, já que uma amostra com baixa qualidade poderá refletir em erros nas interpretações e, conseqüentemente, na tomada de decisão. Há, portanto, técnicas adequadas para cada tipo de situação (MELO et al., 2012). Em análises sensibilidade paramétricas, as mais frequentemente utilizadas são as “Não Aleatórias”, onde ocorre a variação de apenas um parâmetro em cada novo caso selecionado, e este é variado de forma controlada (TIAN, 2013). Esta técnica permite que seja avaliada a influência de cada parâmetro isoladamente na variável dependente, porém não permite que seja avaliada a influência da interação de dois parâmetros nos resultados (MELO et al., 2012).

Os métodos mais qualificados referem-se às análises globais, que trabalham de forma estratificada e aleatória, associando o processo a determinadas distribuições de probabilidade ou incertezas, definidas de acordo com cada variável de entrada (TIAN, 2013). Entre eles, o método Hipercubo Latino se destaca por utilizar intervalos de distribuição elaborados mais detalhadamente. Uma de suas vantagens é a confiabilidade elevada com uso de menor número de amostras, mas que mantém a abrangência por todos os limites da amostra (MELO et al., 2012). Como exemplo, a probabilidade de áreas envidraçadas é triangular (Figura 1), enquanto a de pés direitos de ambientes residenciais é uniforme (Figura 2).

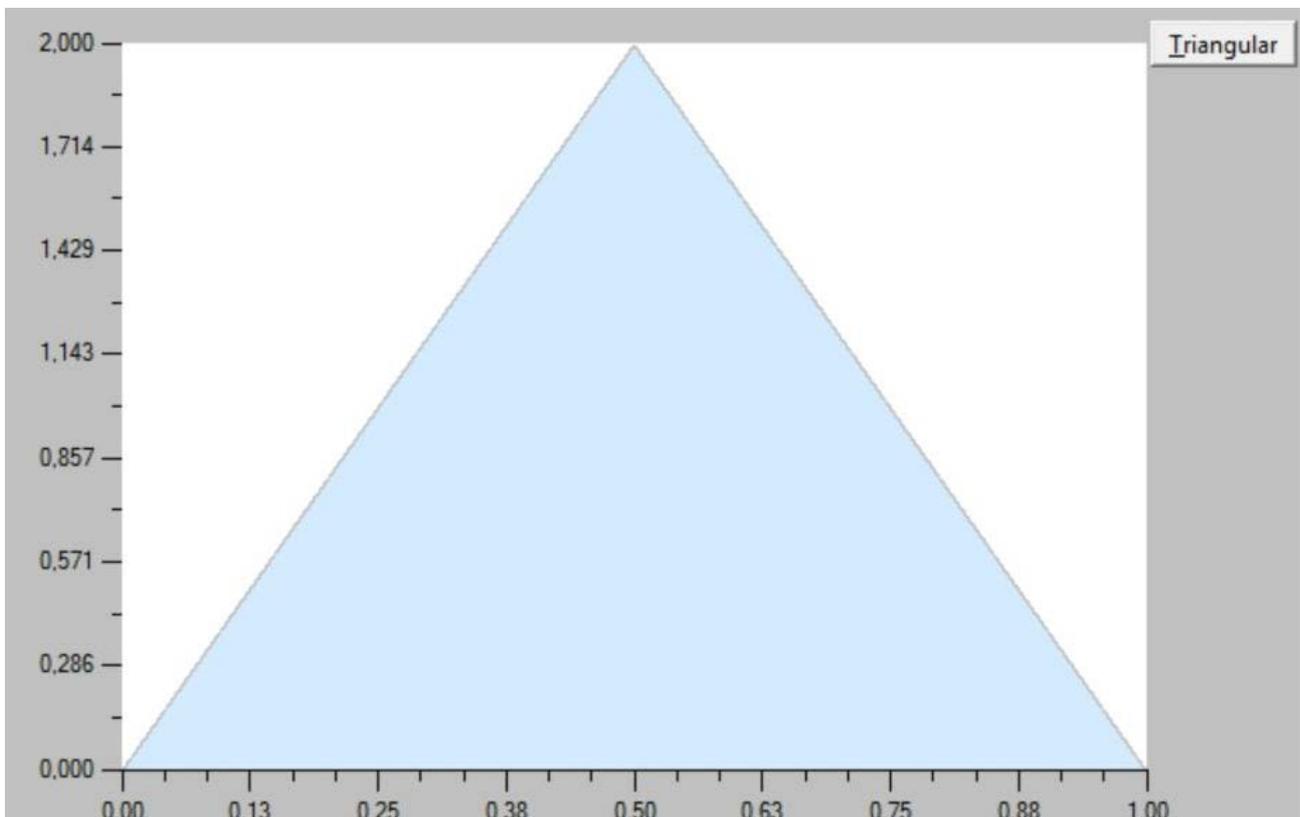


Figura 1: Distribuição triangular da probabilidade de ocorrência de áreas envidraçadas em fachad edificações comerciais, obtidas no programa SimLab. Fonte: autores.

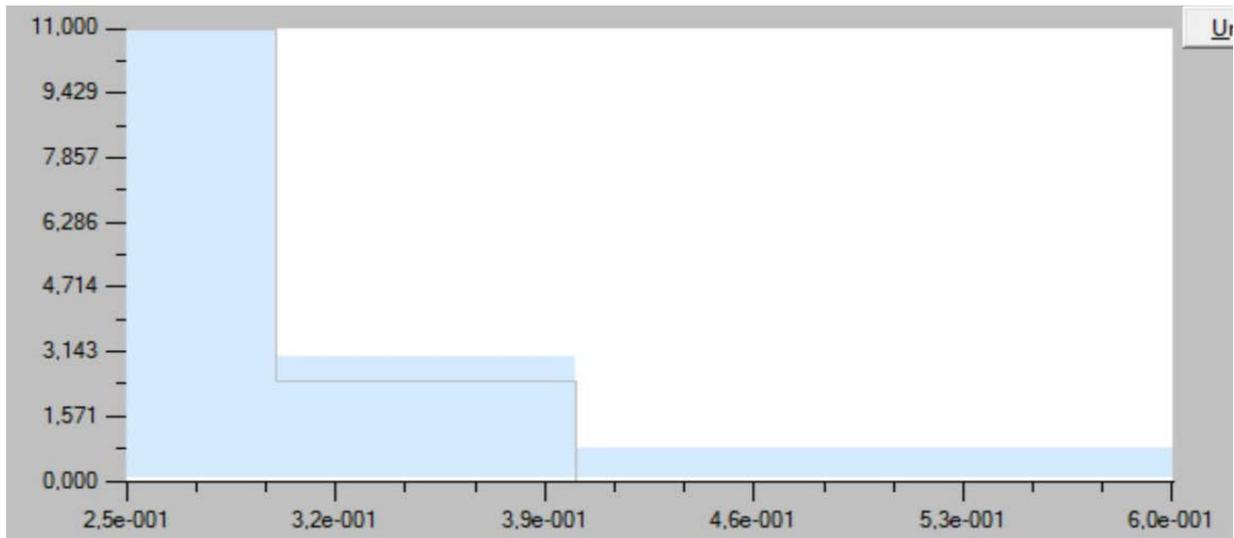


Figura 2: Distribuição uniforme estratificada da probabilidade de ocorrência de pés direitos em ambientes residenciais, obtidas no programa SimLab. Fonte: autores.

2.3. Redes neurais

As redes neurais artificiais (RNA) são um método de análise de sensibilidade global que é capaz de realizar o aprendizado baseado no reconhecimento de padrões, por meio de modelos computacionais inspirados na rede de neurônios animal.

RNA geralmente são apresentadas como sistemas de neurônios artificiais interconectados, que podem calcular valores de entradas e transmitir valores de saída entre si, e a programação das conexões entre neurônios determina quando e quanto um nó influenciará o outro. Como um cérebro, as redes neurais possuem ainda a capacidade de aprender por meio de exemplos e usam as conclusões obtidas desse treinamento para aprimorar o desempenho das suas funções. As vantagens da utilização das RNA como método de análise de sensibilidade são: o menor índice de incertezas nas previsões obtidas; respostas rápidas; dispensa da linearidade entre as variáveis de entrada e saída, como alguns modelos de regressão, e a facilidade de manuseio pelo usuário final após comprovada sua confiabilidade.

2.4. Otimização

Todas as questões abordadas anteriormente tendem a alimentar o processo de otimização em um projeto. O Método de Simulação Paramétrico pode ser a base para análises de sensibilidade ou redes neurais, ambas criadas usando diferentes métodos de amostragem ou dados históricos assim como as próprias simulações, para resolver problemas relacionados ao desempenho de um edifício.

São métodos iterativos, com progressivas melhoras no modelo até a aproximação de uma 'solução', ou seja, um ponto no espaço de busca que satisfaz uma condição de otimização criada por parâmetros variáveis e outros constantes. O Método de Simulação Paramétrico alimenta a Otimização Baseada em Simulação (OBS) (NGUYEN et al., 2014), cujo objetivo final é encontrar a melhor solução para o projeto.

As etapas da OBS foram definidas por Nguyen et al. (2014) como Pré-processamento, execução da otimização e pós-processamento, que envolvem formulação do problema, controle dos critérios de término do processo e interpretação dos resultados, respectivamente.

3. MODELOS DE REGRESSÃO DO PBE EDIFICA

Os processos mencionados anteriormente lidam com uma série de parâmetros que podem gerar milhares de casos, cada qual com seus métodos de análise. Eles constituem a pesquisa de base de parametrização na eficiência energética que deve gerar produtos para análises paramétricas simplificadas que, por sua vez, são geralmente baseadas em dados estatísticos levantados referentes ao parque edificado.

No Brasil, as análises simplificadas surgiram por regressão multivariada de parâmetros de desempenho energético de edificações. Estão presentes nos regulamentos do Programa Brasileiro de Etiquetagem do Inmetro, que quantifica o nível de eficiência energética de equipamentos e, desde 2009, também de edificações (Figura 3). As equações de regressão indicam os níveis de eficiência energética com uso de uma escala alfanumérica (Quadro 1) (BRASIL, 2010, 2012).



Figura 3: A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia para unidades habitacionais, cujo método prescritivo f estabelecido por análise paramétrica, indica o nível de eficiência energética de uma casa ou apartamento. Fonte BRASIL, 2013.

Pontuação	Nível de Eficiência
≥4,5 a 5 A	A
≥3,5 a <4,5 B	B
≥2,5 a <3,5 C	C
≥1,5 a <2,5 D	D
<1,5 E	E

Quadro 1: Escala do nível de eficiência energética de uma UH. Fonte: BRASIL, 2012.

Tais equações permitem a tomada de decisões que impactam materiais, sistemas de ventilação, composição da fachada e forma da edificação.

Este trabalho visa analisar a influência dos parâmetros da forma de unidades habitacionais no nível de eficiência energética da envoltória através do método prescritivo do PBE Edifica residencial, com uso de duas equações de regressão paramétrica. Os parâmetros avaliados foram a profundidade e a largura de ambientes internos de permanência prolongada. Considerando uma habitação com 4 ambientes, havia 8 parâmetros para variação individual. Por sua vez, cada um desses 8 parâmetros impactaram diretamente 10 parâmetros e, indiretamente, outros 8 parâmetros da equação.

4. MÉTODO

O método de análise paramétrica foi desenvolvido com três modelos: dois modelos numéricos de análise energética aplicados a um modelo gráfico que representa uma unidade habitacional. Os parâmetros avaliados são a forma dos ambientes da unidade habitacional (UH), que impactam os parâmetros dos modelos numéricos.

4.1. Modelos numéricos de avaliação do nível de eficiência energética

Os modelos numéricos constam de duas equações de regressão linear que foram gerados por simulação paramétrica para o PBE Edifica residencial: uma para caracterizar o desempenho da UH para o verão (Equação 1) e outra para o inverno. A equação de desempenho para o inverno tem constituição semelhante à apresentada para o verão, com os mesmos parâmetros. As equações foram utilizadas para avaliar o nível de eficiência energética de unidades habitacionais com diferentes disposições volumétricas da unidade habitacional (UH), de acordo com o método prescritivo do RTQ-R (BRASIL, 2012) para a Zona Bioclimática 3¹ (ABNT, 2005).

$$G_{Hr} = (836,4188) + (1002,2853 \cdot CT_{baixa}) + (1248,7615 \cdot acob) + (-1042,8507 \cdot somb) + (-7,9675 \cdot solo \cdot AU_{amb}) +$$

¹ Análise bioclimáticas em arquitetura costumam adotar os parâmetros da NBR 15220 (ABNT, 2005), que divide o território brasileiro em 8 zonas bioclimáticas, que são regiões geográficas homogêneas “quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano”.

VIRUS 11

É parametrização, baby!

revista do nomads.usp | nomads.usp jornal
issn 2175-974x | CC BY-NC
www.nomads.usp.br/virus | vnomads@sc.usp.br

$$(1007,6786 \cdot apar) + (2324,8467 \cdot PD/AUamb) + (-0,3032 \cdot CTcob) + (-77,7838 \cdot AbS) + (26,3363 \cdot APambL \cdot Upar \cdot apar) + (-0,0016 \cdot AparInt \cdot CTpar) + (-605,5557 \cdot solo) + (25,1879 \cdot Ucob \cdot acob \cdot cob \cdot AUamb) + (-830,6742 \cdot Fvent) + (34,1620 \cdot AUamb) + (-3,3292 \cdot SomApar) + (16,9856 \cdot AAbO \cdot (1-somb)) + (70,1758 \cdot AAbL \cdot Fvent) + (-0,0426 \cdot CTpar) + (-54,1796 \cdot AAbS \cdot (1-somb)) + (14,1195 \cdot APambN \cdot Upar \cdot apar) + (-114,4985 \cdot pil) + (399,0021 \cdot PambO) + (2,4466 \cdot AAbN \cdot somb) + (-379,5777 \cdot AbN) + (738,1763 \cdot PambN) + (-4,2304 \cdot APambN) + [5,5988 \cdot (Ucob \cdot acob/CTcob) \cdot AUamb] + (-6,1829 \cdot cob \cdot AUamb) + (-200,9447 \cdot CTalta) + (-103,1092 \cdot Ucob) + (3,8400 \cdot APambS \cdot Upar \cdot apar) + (3,8400 \cdot PambL) + (16,2740 \cdot AparInt) + (-20,4181 \cdot PD \cdot AUamb) + (126,6339 \cdot PambS) + (51,1530 \cdot AAbS \cdot Fvent) + (55,4249 \cdot AAbO \cdot Fvent) + (79,2095 \cdot AAbN \cdot Fvent) + (15,3351 \cdot APambO \cdot Upar \cdot apar) + (26,0925 \cdot APambS) + (-34,7777 \cdot AAbN \cdot (1-somb))$$

Equação 1

Onde,

Parâmetros da forma da edificação:

$Ab_{L,N,O,S}$: indica a existência de abertura voltada para uma das 4 orientações cardinais;

$AAb_{L,N,O,S}$ (m²): área de abertura, voltada para uma das 4 orientações cardinais;

$APamb_{L,N,O,S}$ (m²): área de parede externa do ambiente, voltada para uma das 4 orientações cardinais;

$AparInt$ (m²): área das paredes internas;

$AUamb$ (m²): área útil do ambiente analisado;

$Caltura$: razão entre o pé-direito e a área útil do ambiente;

PD (m): pé-direito do ambiente;

$Pamb_{L,N,O,S}$ (m²): indica a existência de parede externa do ambiente voltada para uma das 4 orientações cardinais;

$SomAparext$: somatório das áreas de parede externa do ambiente;

$volume$ (m³): volume do ambiente.

Parâmetros das propriedades térmicas dos materiais:

$CTalta$ [kJ/(m²K)]: define se os fechamentos dos ambientes possuem capacidade térmica alta;

$CTbaixa$ [kJ/(m²K)]: define se os fechamentos dos ambientes possuem capacidade térmica baixa;

$CTcob$ [kJ/(m²K)]: capacidade térmica da cobertura;

CTpar [kJ/(m²K)]: capacidade térmica das paredes externas e internas do ambiente;

Ucob [W/(m²K)]: transmitância térmica da cobertura;

Upar [W/(m²K)]: transmitância térmica das paredes externas;

Uvid [W/(m²K)]: transmitância térmica do vidro;

acob (adimensional): absortância da superfície externa da cobertura;

apar (adimensional): absortância externa das paredes externas.

Outros parâmetros:

Fvent (adimensional): razão da abertura de ventilação e da abertura do vão;

cob: define se o ambiente possui fechamento superior voltada para o exterior (cobertura).

isol: define a existência de isolamento nas paredes externas e coberturas;

pil: define o contato externo do piso do ambiente com o exterior (pilotis).

solo: define o contato do piso do ambiente com o solo.

somb: define a presença de dispositivos de proteção solar.

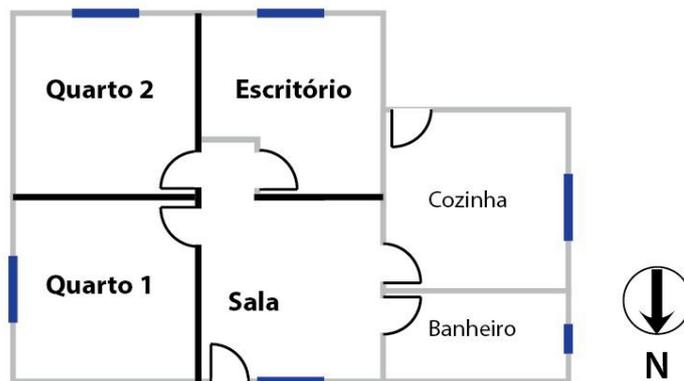
vid: indica a existência de vidro duplo.

Como visto, a Equação 1 apresenta diversos parâmetros. Aqueles de maior relevância para a avaliação paramétrica foram comentados, entretanto, essa discussão requer a apresentação anterior do modelo da UH.

4.2 Modelo da unidade habitacional

A unidade habitacional autônoma (UH) foi baseada nos padrões estabelecidos por Tavares (2006) para renda média. A equação utilizada refere-se à Zona Bioclimática 3 (ZB3), que incorpora climas com necessidades construtivas comuns a São Paulo, Florianópolis, Porto Alegre, Belo Horizonte e Viçosa - MG. Embora algumas restrições foram incluídas pelo Código de Obras do Município de Viçosa – MG, o restante pode ser válido para as demais cidades citadas.

A UH é formada por um pavimento térreo constituída por: sala, dois dormitórios, escritório, banheiro, cozinha e corredor. A planta base do modelo é mostrada na Figura 4.



Consideram-se portas de 2,10m x 0,8 m

Figura 4: Planta base do objeto de estudo. Fonte: autores.

Trata-se de um modelo padrão, comumente encontrado em habitações, cujas características são suficientes para descrever os parâmetros energéticos intrínsecos à forma: as áreas de superfícies expostas ao ambiente externo e ao ambiente interno adjacente, bem como das aberturas (portas e janelas). Tais relações dependem ainda dos materiais que constituem os fechamentos, bem como das condições internas do ambiente (horas de ocupação, número de pessoas, metabolismo e equipamentos) que podem gerar calor e alterar as trocas com os ambientes vizinhos. As condições internas de uso e os materiais construtivos foram mantidos constantes para alterar a forma e, conseqüentemente, suas relações com exterior de acordo com os níveis de eficiência da ZB3.

4.3 PARÂMETROS DOS MODELOS

Os parâmetros variáveis e constantes são comentados de acordo com as restrições existentes nos regulamentos RTQ-R (BRASIL, 2012).

4.3.1. Constantes

Os parâmetros que são pré-requisitos no RTQ-R foram considerados restrições ao modelo. O não atendimento de qualquer dos pré-requisitos implica em um nível de eficiência da envoltória para condições de verão de, no máximo, nível C.

- **Aberturas**

Ambientes de permanência prolongada devem possuir percentual de áreas mínimas de aberturas para ventilação de 8% para a ZB3. No modelo proposto, foi fixada a orientação das aberturas, cuja área é 17% da área do piso do ambiente para atender simultaneamente ao mínimo do Código de Obras do Município de Viçosa – MG (VIÇOSA, 2004) e do RTQ-R (BRASIL, 2012). Esse percentual também atendeu ao pré-requisito de iluminação natural, cujo limite mínimo era 12,5%. Além disso, foi mantido $somb = 0,2$ constante, devido a beirais na UH. A UH também atendeu ao pré-requisito de ventilação cruzada que exige sistema de aberturas externas e internas para promover o escoamento de ar em, pelo menos duas, diferentes fachadas.

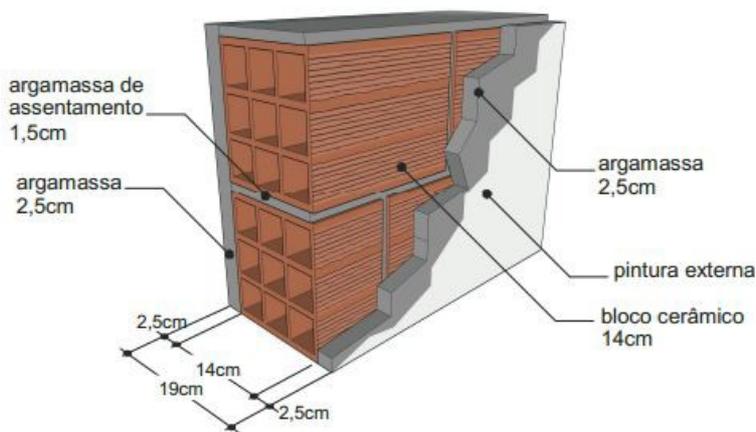
- **Dimensões dos ambientes**

As áreas dos ambientes de permanência transitória da UH foram mantidas constantes, pois o desempenho não está incluído na classificação, embora afete requisitos adicionais ao nível de eficiência da envoltória. Como cozinha e o banheiro se inserem nesta categoria para o RTQ-R (BRASIL, 2012), foram mantidas as dimensões 3m x 3,5m para a cozinha e 3m x 1,5m para o

banheiro. Outros parâmetros foram: pé-direito de 3m, porta externa da UH, e todos os ambientes locados em contato com o solo.

• Materiais

Há pré-requisitos para as propriedades térmicas de materiais e componentes de paredes e coberturas da UH. Materiais típicos da cultura construtiva brasileira foram selecionados (Figuras 5 e 6) dentre aqueles que atendiam aos pré-requisitos para nível A da Tabela 1. As absorptâncias solares selecionadas, 0,2 para paredes e 0,4 para coberturas são correspondentes às cores branca e de cerâmica.

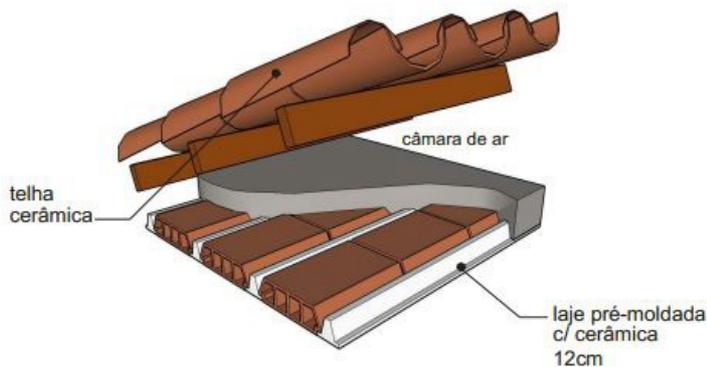


Descrição:

Argamassa interna (2,5cm)
 Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0cm)
 Argamassa externa (2,5cm)
 Pintura externa (α)

U [W/(m ² K)]	C _T [kJ/m ² K]	α [-]	FCS [-]
1,85	161	0,2	1,5
		0,4	3,3
		0,8	5,9

Figura 5: Materiais das paredes e suas propriedades térmicas. Fonte: LabEEE, 2011.



Descrição:

Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm +
 lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm)
 Câmara de ar (> 5,0 cm)
 Telha cerâmica

U [W/(m ² K)]	C _T [kJ/m ² K]	α [-]	FCS [-]
1,79	185	0,2	1,4
		0,4	2,9
		0,8	5,7

Figura 6: Materiais da cobertura e suas propriedades térmicas. Fonte: LabEEE, 2011.

Zona Bioclimática	Componente	Absortância solar (adimensional)	Transmitância térmica [(W/m²K)]	Capacidade térmica [kJ/(m²K)]
ZB3 a ZB6	Parede	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,70$	$CT \geq 130$
		$\alpha > 0,6$	$U \leq 2,50$	$CT \geq 130$
	Cobertura	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 2,30$	-
		$\alpha > 0,6$	$U \leq 1,50$	-

Tabela 1: Pré-requisitos de paredes e coberturas para níveis de eficiência A e B. Fonte: adaptado de BRASIL, 2012.

4.3.2. Variáveis

- **Dimensões dos ambientes**

Os parâmetros avaliados foram aqueles relacionados à forma dos ambientes de permanência prolongada² (APP). Vale ressaltar que o Código de Obras de Viçosa impõe as áreas mínimas dos compartimentos de edifícios residenciais segundo a destinação ou atividade: 6,00 m² para a função dormir ou repousar; 9,00 m² para a função estar ou lazer; 4,00 m² para a função preparo de alimentos.

Foram usados dois parâmetros da forma – dimensões em planta em dois eixos ortogonais – que implicam na alteração de diversas variáveis da equação de avaliação da eficiência energética. Tais parâmetros não alteram a sintaxe espacial da UH, cuja origem está fixada em dois eixos pelos quais os quatro ambientes de permanência prolongada estão locados, conforme ilustrado na Figura 7.

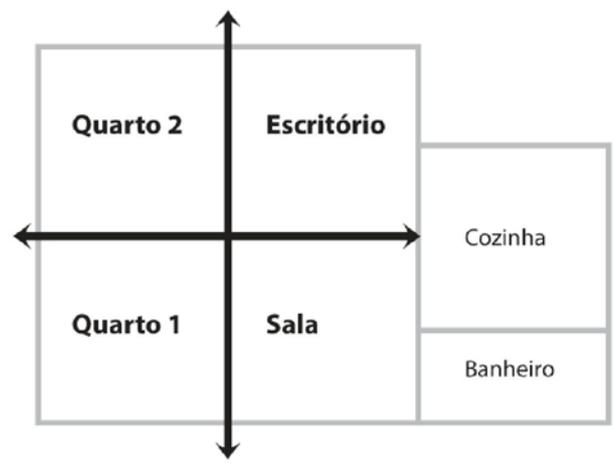


Figura 7: Planta do projeto padrão com eixos de expansão das dimensões. Fonte: autores.

Em seguida, determinou-se como tais parâmetros se posicionariam e se relacionariam na planta da UH. Foi realizada uma primeira hipótese representada pela Figura 8, em que se fixou

² De acordo com o RTQ-R (BRASIL, 2012), APP's são os ambientes que apresentam ocupação contínua por um ou mais indivíduos, como sala de estar, sala de jantar, sala íntima, dormitórios, escritório ou sala de TV.

V!RUS 11

É parametrização, baby!

revista do nomads.usp | nomads.usp jornal
issn 2175-974x | CC BY-NC
www.nomads.usp.br/virus | vnomads@sc.usp.br

um norte arbitrário, perpendicular a um dos eixos cardinais para efeitos de simplificação dos cálculos, e variação das dimensões dos APPs ao longo dos eixos de expansão da forma.

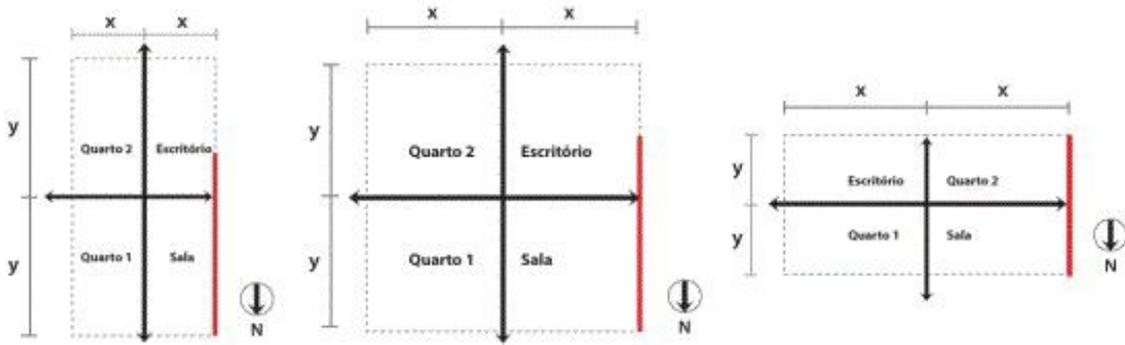


Figura 8: Possibilidades de expansão das dimensões dos ambientes, cuja linha vermelha representa a superfície de contato com o banheiro e com a cozinha. Fonte: autores.

Pode-se observar que, nas situações em que são aumentadas ou reduzidas as proporções entre X e Y, há a criação de uma forma resultante longilínea em um dos eixos. Neste sentido, preferiu-se trabalhar com uma forma que equilibrasse melhor as duas variáveis espacialmente. Foi determinada então a disposição final demonstrada na Figura 9. Para simplificar a automatização dos dados e para cumprir requisitos geométricos da planta, foram estabelecidas restrições para os valores de x e de y: $x \geq y$; $x \geq 2,5$ e $y \geq 1$.

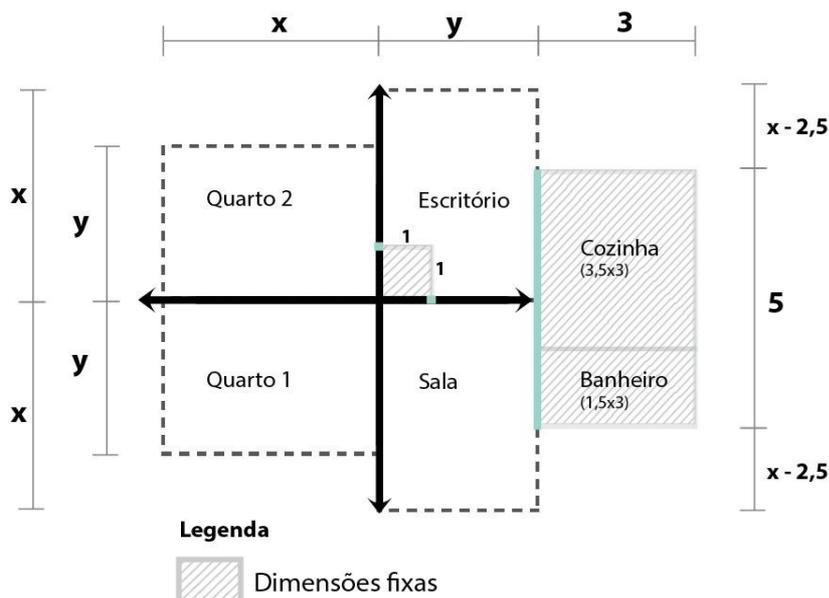


Figura 9: Definição do posicionamento das variáveis. Fonte: autores.

O Código de Obras de Viçosa determina que, para ambientes de permanência prolongada para a função de dormir ou repousar a menor dimensão aceita é 6 m^2 , portanto foi determinado como dimensões mínimas: $x \geq 2,5\text{m}$ e $y \geq 2,5\text{m}$. As dimensões máximas se basearam nas áreas de sala de estar + jantar para média renda pré-estabelecida por Tavares (2006): $x \leq$

6,1m e $y \leq 6,1m$. Foram fixados 10 intervalos entre o maior valor e o menor valor, o que resulta em um total de 55 unidades habitacionais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 10 representa proporcionalmente o resultado da forma (em planta) da projeção dos ambientes de permanência prolongada da UH – notar que os ambientes de permanência transitória foram excluídos da imagem – de acordo com o encontro das dimensões x e y, gerando diferentes áreas de piso e de exposição da edificação ao ambiente exterior.

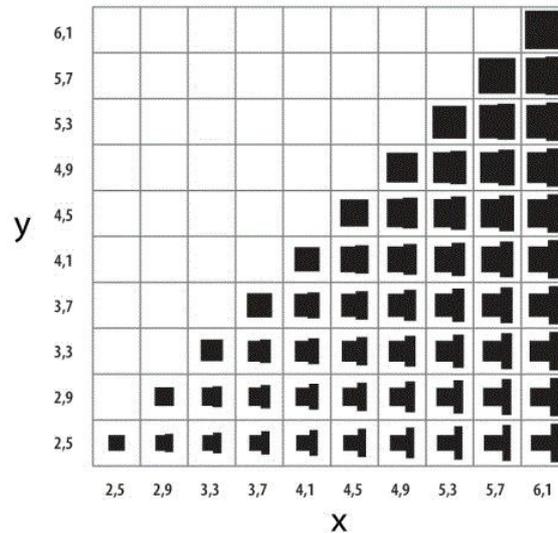


Figura 10: Evolução proporcional das formas. Fonte: autores.

O resultado da aplicação de tais características na equação de avaliação do nível de eficiência energética foi 9% dos modelos com nível de eficiência A, 87% nível B e 4% nível C para 55 casos. Na Figura 11 tem-se a eficiência energética relativa das unidades habitacionais em relação à média da eficiência energética para o verão (Ghr) e na Figura 12 a média do desempenho para o inverno (CA).

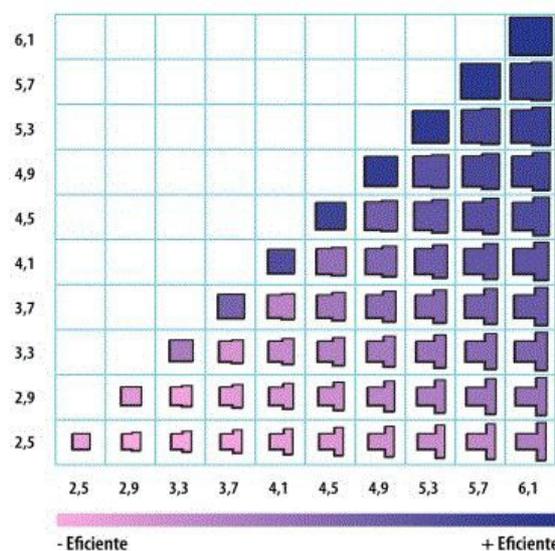


Figura 11: Escala dos graus-hora (Ghr) em decorrência das dimensões da UH. Fonte: autores.

V!RUS 11

É parametrização, baby!

revista do nomads.usp | nomads.usp jornal
issn 2175-974x | CC BY-NC
www.nomads.usp.br/virus | vnomads@sc.usp.br

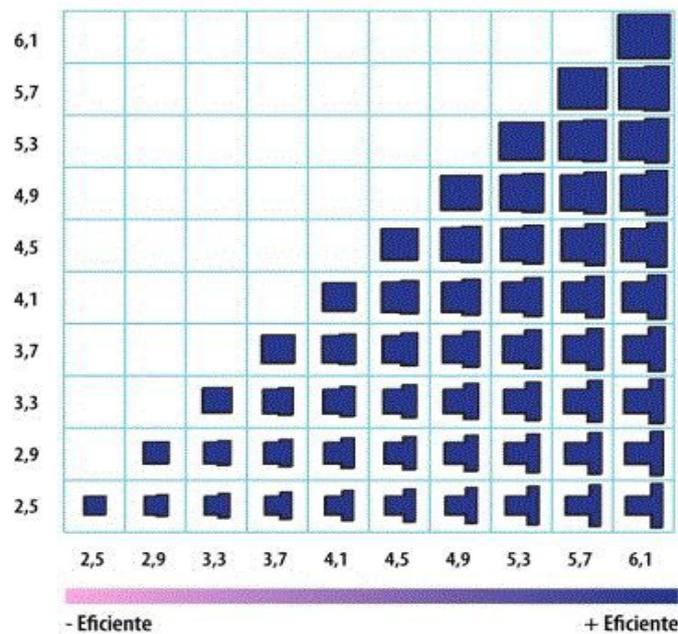


Figura 12: Escala do consumo relativo (CA) em decorrência das dimensões da UH. Fonte: autores.

Pode-se observar que o indicador que determina a eficiência para o inverno – consumo relativo para aquecimento – não se alterou com as mudanças volumétricas, possibilitando o nível de eficiência A em todos os modelos. Em relação ao indicador que determina a eficiência para o verão - Graus-hora de resfriamento (GHR) da Equação 1 –, a eficiência da envoltória aumentou com o aumento da área. Mas a eficiência não foi modificada apenas por este fator, pois, as UH's com razão 1 ($x=y$), apresentaram eficiência energética superior relativamente a outras UH's de mesma área útil. O cálculo do índice de compacidade das 55 unidades não apresentou relação direta notável em relação à eficiência da envoltória, apenas nos citados ($x=y$). Embora o limitado número de modelos da pesquisa reduziu as possibilidades de se encontrar alguma relação da compacidade com a eficiência, acredita-se que a área de aberturas – considerada fixa neste estudo – seja uma variável que altere a correlação do índice de compacidade com a eficiência.

Tais resultados indicam a sensibilidade da equação da Zona Bioclimática 3 à forma da edificação. Embora a forma tenha impactos tanto no desempenho para verão quanto para o inverno na literatura internacional, faz sentido que a sensibilidade à forma na equação seja maior no verão, visto que o inverno brasileiro não é rigoroso e o condicionamento é, em geral, natural. Deve-se notar que o modelo básico da UH seguiu os princípios bioclimáticos de setorização de ambientes, com as áreas molhadas a oeste, o que ainda ajudou a proteger os APPs no verão. Como a equação de regressão foi gerada considerando uma ocupação básica de 2 habitantes por dormitório (SORGATO, 2009; VERSAGE, 2009), acredita-se que a geração térmica interna tenha auxiliado a estabilização do desempenho no inverno, o que elimina a sensibilidade da eficiência à forma nessa estação. Em contraste, o desempenho no verão depende das aberturas da UH para dissipação do calor interno. Maiores ambientes geraram maiores áreas de aberturas e, por conseguinte, maior potencial de ventilação. Além disso, a estratificação da planta – ou baixa compacidade – apresentou piores resultados para verão devido à exposição de maior quantidade de paredes ao ambiente exterior.

A vantagem do uso das equações de regressão para análise da forma foi a rapidez e a simplicidade de aplicação do método para investigação de tendências, cuja simulação computacional onera a pesquisa em tempo e em custos. A simulação paramétrica na área de eficiência energética vê-se em um momento de análise de um grande número de variáveis cuja geração de resultados é direcionada às abordagens estatísticas discutidas anteriormente.

As equações de regressão do RTQ-R (BRASIL, 2012) foram geradas por simulação paramétrica – baseado na arquitetura habitacional do país – e aplicadas aos climas brasileiros, o que garante a representatividade e confiabilidade dos resultados. O seu uso se justifica para agilizar a verificação das tendências de desempenho de poucos parâmetros e ainda possibilitar a criação de uma gramática da forma voltada à eficiência energética. Em um segundo momento, simulações em programas termo-energéticos podem ser utilizadas para a aplicação e confirmação de uma gramática previamente construída com uso da regressão.

6. CONCLUSÃO

O estudo da volumetria pode acarretar diferenças significativas na eficiência energética para condições de verão ao realizar simulações paramétricas da forma de unidades habitacionais com modelos de regressão linear multivariada. Entretanto, para as condições de inverno, não houve alteração significativa da eficiência. Viu-se que a sensibilidade da eficiência energética à forma da planta de habitações é maior para as condições de verão do que para as de inverno na Zona Bioclimática 3, com variações de níveis de eficiência de C a A para verão, e nenhuma variação para inverno. Entretanto, a ampliação da volumetria da UH para a 3ª dimensão, incluindo o pé direito e a variação da inclinação da cobertura como parâmetros passíveis de variação, é também desejável.

A arquitetura brasileira já dispõe de ferramentas simplificadas, como as equações de regressão do PBE Edifica, e outras mais complexas, como simulações, para a criação e exploração das características construtivas e formais das habitações.

Tais métodos tendem a direcionar os estudos de desempenho energético e, conseqüentemente, de concepção do projeto para um patamar mais complexo, porém rápido e ainda confiável. Tais estudos deverão gerar produtos cujas soluções envolvam, por exemplo, arranjos espaciais de ambientes internos ou parâmetros climáticos que interferem no desempenho energético, além de diretrizes de ocupação do entorno da edificação.

Neste estudo, a ferramenta simplificada do RTQ-R, referente ao seu método prescritivo, foi utilizada para explorar tendências de desempenho em decorrência da forma, que mostrou a necessidade de uma maior atenção às condições de verão. O desempenho para essa condição climática deve ser priorizado, desde que os demais parâmetros, como propriedades de materiais, garantam as condições básicas para o inverno. Uma linguagem inicial para criação de uma gramática da forma foi observada, o que reduziu o tempo de investigação em relação a simulações computacionais completas. Por fim, observa-se que a simples estratificação de ambientes não determina necessariamente um bom desempenho para habitações naturalmente ventiladas, o que é um alerta para os usuários do RTQ-R.

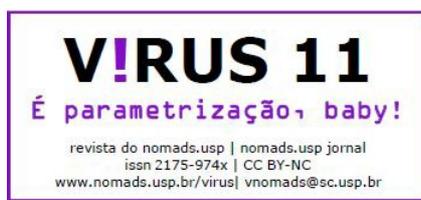
AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, financiador da pesquisa e Capes e Fapemig, de bolsas de mestrado.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, C.V., PEDRINI, A., TINÔCO, M.B.M. Influência de condicionantes ambientais no projeto de um edifício de ensino de arquitetura e urbanismo localizado em clima quente e úmido. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento. Portaria nº 018, de 16 de janeiro de 2012. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Legislação Inmetro:** Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/residencial/downloads/regulamentos>>. Acesso em: 25 Nov. 2013.



BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento; Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. **Legislação Inmetro:** Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/node/38>>. Acesso em: 19 Out. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento; Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria nº 050, de 01 de fevereiro de 2013. **Legislação Inmetro:** Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações (RAC), Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/residencial/downloads/regulamentos>>. Acesso em: 20 Fev. 2013.

CARLO, J.C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais.** 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARLO, J.C., LAMBERTS, R. O papel da volumetria no desempenho energético da edificação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ANTAC, 2007. p. 310-319.

CARLO, J.C., PEREIRA, F.O.R., LAMBERTS, R. Iluminação natural para redução do consumo de energia de edificações de escritório aplicando propostas de eficiência energética para o código de obras do Recife. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2004. p. 370-380

CÓRDOBA, J., MACÍAS, M., ESPINOSA, J.M. Study of the potential savings on energy demand and HVAC energy consumption by using coated glazing for office buildings in Madrid. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 27, p. 13-19, 1998.

EISENHOWER, B., O'NEILL, Z., NARAYANAN, S., FONOBEROV, V.A., MEZÍC, I.A. Methodology for meta-model based optimization in building energy models. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 47, p. 292-301, 2012.

HOPFE, C., HENSEN, J. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 43, p. 2798-2805, 2011.

LABEEE. **Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes e Coberturas.** v. 5. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações; Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), outubro de 2011.

LAMBERTS, R. **Eficiência Energética em Edificações.** Palestra proferida no XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Maceió - AL, (12 nov. 2014).

MARTINAITIS, V., ROGOZZA, A. BIKMANIENE, I. Criterion to evaluate the "twofold benefit" of the renovation of buildings and their elements. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 36, p 3-8, 2004.

MELO, A.P.; CÓSTOLA, D.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. Assessing the accuracy of a simplified building energy simulation model using BESTEST: The case study of Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 45, p. 219-228, 2012.

MELO, A. P., LAMBERTS, R., CÓSTOLA, D., HENSEN, J. L. M. Development of a method to predict building energy consumption through an artificial neural network approach. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 13., 2013, Chambéry. **Proceedings...** Chambéry: IBPSA, 2013. p. 644-651

NGUYEN, A.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, Oxford, v. 113, p. 1043–1058, 2014.

ROSENFELD, A. Energy efficiency US commercial successful and emerging strategies. In: ENERGY EFFICIENCY WORKSHOP, 1996, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: CEPTEL, 1996.

SILVA, A.S., GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 213-230, 2014.

SILVA, A.S.; GHISI, E. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 135-148, 2013.

SORGATO, M.J. **Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente**. 2009. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SORGATO, M.J.; MELO, A.P.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R. Análise comparativa entre os resultados de simulações termoenergéticas de edificações sob diferentes condições de entrada das propriedades dos vidros. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2014. p. 23-32.

TAVARES, S.F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil -PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC, Florianópolis, 2006.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 20, p. 411-419, 2013.

VIÇOSA. Prefeitura Municipal de Viçosa. Lei nº 1.633, de 20 de dezembro de 2004. **Código de Obras e Edificações do Município de Viçosa**. Viçosa, 2004. Disponível em: <http://www.netgov.com.br/spm-net-php/doc_pmvicosa/LEGISLACAO/codigo_de_obras_municipal.pdf?1424713308>. Acesso em: 23 Set. 2013.

VERSAGE, R. S. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS**. 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2009.