XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

# ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A ÁREA DE ABERTURA E O FATOR SOLAR FRENTE AO GANHO DE CALOR NO CONTEXTO BRASILEIRO

**Rodolfo Kirch Sampaio Veiga (1); Cristiano A. Teixeira (2); Matheus K. Bracht (3); Leandra C. Boldrini (4); Rayner M. e S. Machado (5); Ana P. Melo (6); Roberto Lamberts (7)**

(1) Engenheiro Civil, Mestrando do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, rodolfoksveiga@gmail.com
(2) Arquiteto, Mestrando do programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, cristiano.andre.teixeira@gmail.com
(3) Engenheiro Civil, Mestrando do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, matheus.bracht@gmail.com
(4) Arquiteta, Mestranda do programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, leandraboldrini@gmail.com
(5) Engenheiro Civil, Doutorando do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, rmauricio.eng@gmail.com
(6) Doutora, Professora do Departamento de Engenharia Civil, apaula_melo@hotmail.com
(7) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, roberto.lamberts@gmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476 - 88040-900, Tel.: (48) 3721 3022.

## RESUMO

A área de abertura dos elementos translúcidos possui uma influência significativa no desempenho térmico das edificações. Observa-se, na literatura, a recomendação do uso de vidros de baixo fator solar, aliado a limites máximos de área de abertura como uma estratégia importante para aumentar a eficiência térmica do envelope. No Brasil, a relação entre a variação da área de abertura e a modificação do fator solar dos vidros, no entanto, ainda é pouco estudada. Este estudo objetivou investigar se é possível aumentar a área de abertura de uma edificação reduzindo o fator solar dos vidros, mantendo o mesmo ganho de calor no ambiente. Foram realizadas simulações com o programa EnergyPlus considerando um modelo base com 9 m² de área útil e pé-direito de 2,5 m. O modelo base foi, então, alimentado com as combinações de percentual de abertura (16% a 30%), de fator solar (0,39 a 0,87) e de orientação (norte, leste, sul e oeste), totalizando 160 modelos, que foram simulados nas cidades de Curitiba, Rio de Janeiro, São Paulo e São Luís. Os resultados demonstraram que é possível estabelecer correlações entre fator solar e percentual de abertura ao se fixar um valor de ganho de calor nas diferentes cidades analisadas, e que essas correlações se comportam de maneira semelhante nas diferentes orientações, considerando a mesma cidade.
Palavras-chave: simulação computacional, desempenho térmico, áreas de abertura, fator solar.

## ABSTRACT

Openings have a major impact in the thermal performance of buildings, and the use of glazing with lower solar factor combined with values of maximum opening area are often recommended in literature as a strategy to improve the thermal performance of the envelope. In Brazil, however, the relation between variations in opening area and changes in the solar factor of the glazing is yet to be studied. This research intends to analyze how much it is possible to increase the opening area of a window with the reduction of the solar factor of the glazing, maintaining the same heat gain through the window. It was conducted a series of simulations with the software EnergyPlus in a base model with a floor area of 9 m² and a ceiling height of 2,5 m. It was added to the base model variations in window-to-floor ratio (16% to 30%), solar factor (0,39 to 0,87) and orientation (north, east, south and west), resulting in 160 models, which were simulated considering the cities of Curitiba, Rio de Janeiro, São Paulo and São Luís. The results show that it is possible to establish a equivalence between solar factor and opening area by fixing a value of heat gain through the window, and that these equivalences have a similar behavior in all orientations, considering the same city.
Keywords: computer simulation, thermal performance, opening area, solar factor.

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação crescente com o aumento do consumo de energia e das emissões de $CO_2$, e seus possíveis impactos no meio ambiente, vem incentivando o estabelecimento de metas de redução do consumo de energia assumidas por diversos países. A União Europeia, por exemplo, estabeleceu um plano de redução de 80% a 90% das emissões de $CO_2$ até 2050, e definiu a eficiência energética como um elemento-chave para que seus estados-membros atinjam a meta mantendo um crescimento sustentável (EUROPEAN UNION, 2012). No Brasil, foi lançado o Plano Nacional de Eficiência Energética, que busca reduzir o consumo de energia elétrica em 10%, comparado com um cenário de referência, a partir de um planejamento a longo prazo do setor energético brasileiro (MME, 2011).

Considerar o consumo de energia das edificações é fundamental para que se possa elaborar políticas de eficiência energética eficazes, uma vez que as edificações consomem grande parte da energia produzida mundialmente, correspondendo a 30% do consumo final de energia (UN environment & IEA, 2019). No Brasil, essa proporção é ainda maior: somados os setores comercial, residencial e de edificações públicas, o consumo de energia elétrica chega a 50,8% no país (MME, 2018).

O envelope é um elemento importante para a eficiência energética das edificações, destacando-se o papel das aberturas. Na pesquisa de Rackes et al. (2016), que analisou as condições de conforto a partir da variação de 55 parâmetros de dois modelos de edificações comerciais brasileiras naturalmente ventiladas, o percentual de abertura da fachada e o SHGC - *Solar Heat Gain Coefficient* - foram dois dos parâmetros que representaram o maior impacto no nível de conforto térmico dos ambientes. Rupp e Ghisi (2017) propuseram o desenvolvimento de um método para analisar a influência da área de abertura de modelos de edificações comerciais em Florianópolis, com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica, manter o conforto térmico e garantir um bom desempenho lumínico. Os resultados mostraram que, para salas mais estreitas e profundas, uma maior área de janela pode ser utilizada para maximizar o ganho com iluminação natural, evitando taxas elevadas de ganho de calor.

A determinação da área de abertura da janela e das características térmicas dos vidros é uma estratégia importante para projetar edificações mais eficientes energeticamente. A ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2013), por exemplo, define valores mínimos de desempenho térmico dos vidros e máximos de áreas de abertura das edificações, de acordo com as zonas bioclimáticas definidas para os Estados Unidos da América. No Brasil, o método prescritivo do RTQ-C (2010) considera que a edificação obterá a pior avaliação prevista pelo regulamento (nível E) se apresentar área de abertura superior a 60% da fachada e fator solar superior a 0,61.

No Brasil, por ser um país de climas predominantemente quentes, com 78,9% do território nacionalinserido nas zonas bioclimáticas 6, 7 e 8 (ABNT, 2003), que são zonas de clima quente e seco; quente e chuvoso no verão e quente e seco no inverno; e quente e úmido, respectivamente, recomenda-se a utilização de estratégias que evitem a entrada de radiação pelas aberturas. No entanto, o método simplificado da Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais - NBR 15575 - (ABNT, 2013), que foi disponibilizada para consulta pública em 2008 e passou por um longo processo de correção e aperfeiçoamento até a sua publicação em 2013 (CAU, 2019), define apenas áreas mínimas de abertura para a ventilação natural, o que possibilita que a área de abertura compreenda toda a extensão da fachada. A NBR 15575 também não considera as vantagens de se utilizar vidros de alta eficiência no desempenho térmico da edificação, fazendo com que as edificações que considerem essa estratégia tenham que ser analisadas apenas pelo método de simulação.

## 2. OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa é analisar a possibilidade de se estabelecer correlações que permitam o aumento do percentual de abertura com a redução do fator solar dos vidros, para um mesmo fluxo de calor pelas aberturas, considerando diferentes orientações e a variedade de climas brasileiros.

## 3. MÉTODO

### 3.1. Elaboração do modelo base

Para identificar a relação entre a área de abertura e o fator solar dos vidros, foi elaborado um modelo base no programa EnergyPlus, versão 9.0, (ENERGYPLUS, 2019), com informações de geometria, materiais e operação do ambiente que se mantêm constantes durante o processo de parametrização.

O modelo base consiste em uma única zona térmica quadrada com 3,0 m de largura e pé-direito de 2,5 m. Há apenas uma área de abertura em uma das paredes, e todas as superfícies do envelope foram classificadas como adiabáticas, com exceção da parede em que se encontra a abertura. As paredes possuem transmitância térmica de 3,65 W/(m².K), capacidade térmica de 158 kJ/(m².K) e coeficiente de absortividade de 0,50, e são compostas de tijolos maciços (com 10 cm de espessura, condutividade térmica de 0.9 W/m.K e calor específico de 920 J/kg.K) e argamassa de assentamento (com 15 mm de espessura, condutividade térmica de 1,15 W/m.K e calor específico de 1000 J/kg.K). Embora este tipo de parede não atenda ao limite de transmitância térmica do método simplificado da NBR 15575 para as zonas bioclimáticas 1 e 2, o parâmetro a ser analisado (ganho de calor pelas aberturas) não computa o ganho de calor pelas paredes. Assim, possíveis variações de transmitância térmica nas paredes não interfeririam no ganho de calor pelas aberturas. A parede de tijolos maciços foi escolhida por possuir materiais de desempenho térmico conhecidos e por já ter sido utilizada em estudos anteriores. A abertura, cuja área foi modificada na parametrização, possui altura fixa de 1,0 m e está posicionada no centro da parede não adiabática. O elemento translúcido da abertura foi elaborado a partir do objeto *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*, e a sua transmitância térmica se manteve constante em 5,70 W/(m².K).

A fim de evitar perturbações nos resultados que pudessem dificultar as análises, o modelo base desconsiderou ganhos internos de calor, bem como o uso da ventilação natural, ou seja, a zona térmica permaneceu constantemente desocupada e a abertura permaneceu fechada. Também não foi considerada a infiltração pelas janelas e ganhos internos de calor, e não foram utilizadas as taxas de renovações de ar descritas no método de simulação da NBR 15575. Além disso, o estudo não utilizou um dia típico, como recomendado no método de simulação da NBR 15575 para avaliação da temperatura interna, porque uma análise anual estaria mais coerente com os objetivos da pesquisa. Entretanto, foi utilizado um sistema de condicionamento de ar através de cargas ideais (objeto *ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem* do EnergyPlus) que tem a função de manter a temperatura da zona térmica dentro dos *setpoints*, definidos em 18°C para aquecimento e em 23°C para resfriamento. O objeto *Ideal Loads* foi utilizado para manter o ambiente em uma faixa amena de temperatura interna, para evitar que possíveis aumentos excessivos interferissem nos ganhos de calor por convecção, que são parte da equação de ganhos de calor pelas aberturas (*Surface Window Heat Gain Energy*) utilizada como parâmetro de saída da simulação, como será apresentado a seguir.

## 3.2. Combinação de variáveis e simulações computacionais

Foram variados a área de abertura, o fator solar do vidro e a orientação do modelo. As cidades escolhidas para a análise foram Curitiba (ZB 1), São Paulo (ZB 3), Rio de Janeiro (ZB 8) e São Luís (ZB 8). A fachada que contém a abertura foi orientada para as direções norte, leste, sul e oeste. Todos os arquivos climáticos selecionados são do tipo INMET (LabEEE, 2019).

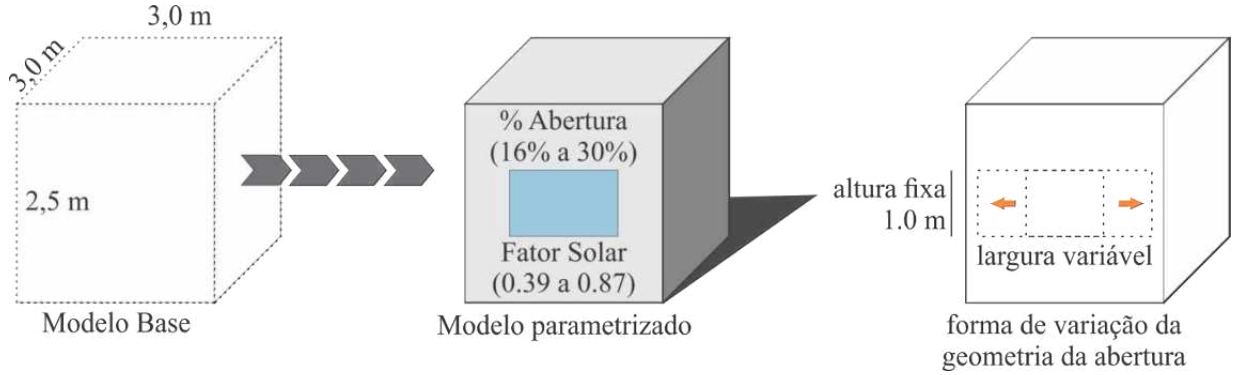



Figura 1 - Processo de variação do percentual de abertura e do fator solar.

Para determinar a área de abertura, foi utilizado o percentual de abertura da fachada em relação à área de piso do ambiente. A NBR 15575 define percentuais de abertura mínima para ventilação distintos, variando de acordo com a zona bioclimática e a região onde a edificação está inserida, sendo 7% para as zonas bioclimáticas de 1 a 7, 12% para as edificações localizadas na região norte e na zona bioclimática 8 e 8% para as edificações localizadas nas regiões sudeste e nordeste e na zona bioclimática 8. Resolveu-se, então, fixar o valor mínimo de percentual de abertura em 16%, que atende ao critério da norma de 8% de percentual de abertura mínima para ventilação para as edificações localizadas nas regiões sudeste e nordeste

e na zona bioclimática 8, ao se considerar um fator de abertura para ventilação de 50%, além de atender ao percentual de abertura mínimo de ventilação de 7% para as zonas biocimáticas 1 a 7. O uso do mesmo percentual de abertura mínimo para as quatro cidades se justifica, pois, diferentes percentuais de abertura mínima poderiam interferir na comparação dos resultados entre as cidades escolhidas.

O percentual de abertura máximo utilizado foi 30%, que é um valor que abrange o percentual de aberturas médias descrito na NBR 15220 sem que a largura da janela seja superior à largura do ambiente. O fator solar dos vidros variou de 0,39, correspondente a um vidro laminado de 8mm, a 0,87, que corresponde a um vidro simples de 3 mm. A Figura 1 demonstra o processo de variação do percentual de abertura e do fator solar a partir do modelo base, e a Tabela 1 indica os valores considerados para cada parâmetro.

Tabela 1 - Valores das variáveis de estudo.

| Orientação da fachadas | Percentual de abertura (%) | Fator solar | Transmitância térmica (W/(m².K)) |
|---|---|---|---|
| Norte, Sul, Leste e Oeste | 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 e 30 | 0,39, 0,51, 0,63, 0,75 e 0,87 | 5,70 |

O modelo base foi, então, alimentado com as combinações de parâmetros mencionados anteriormente a partir da linguagem de programação R, versão 3.5.3 (R PROJECT, 2019), gerando um total de 160 modelos, que correspondem às combinações de percentual de abertura, de fator solar e de orientação escolhidos. Após a elaboração desses modelos foram desenvolvidos grupos de simulações do EnergyPlus para cada uma das quatro cidades e, como parâmetro de saída, foi escolhido o *Surface Window Heat Gain Energy*, para se obter os resultados de ganho de calor pela janela. Ao total, foram realizadas 640 simulações para as quatro cidades analisadas.

## 3.3. Análise da relação entre percentual de área de abertura e fator solar

Para entender as tendências do comportamento do ganho de calor com a variação do percentual de abertura e do fator solar, foram traçados gráficos de ganho de calor anuais para cada orientação e cidade escolhidas, onde cada ponto representa o ganho de calor anual a um percentual de abertura e de fator solar específicos. Foi realizada, então, a regressão linear dos valores, cujo ajuste foi avaliado pelo coeficiente de determinação $R^2$.

A regressão linear dos valores deu origem a equações de linearização, a partir das quais se fixou, em cada uma das retas encontradas, um valor de ganho de calor único, quando se utiliza um percentual de abertura de 17% para cada clima e orientação simulados. Para esta etapa, escolheu-se fixar o valor em 17% para que o ganho de calor não esteja no limite mínimo de percentual de abertura de 16%, que atenderia ao critério de percentual de abertura mínimo de ventilação de 8% para as edificações localizadas nas regiões sudeste e nordeste e na zona bioclimática 8, considerando uma janela com fator de abertura para ventilação de 50%. Por fim, foram plotados gráficos de pontos do fator solar dos vidros pela área das janelas para cada clima e orientação, e foi utilizado um ajuste polinomial de segundo grau para encontrar as melhores curvas que representariam os conjuntos de pontos de cada clima e orientação. A dispersão dos pontos em relação à melhor curva foi expressa através do coeficiente ρ de Spearman (LEG, 2019), definido pela equação do coeficiente de correlação ρ apresentada pela Equação 1. Esses gráficos são válidos apenas para os valores de ganho de calor especificados.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_i d_i^2}{(n^3 - n)} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
n é o número de pares x (fator solar) e y (percentual de abertura) [adimensional];
$d_i$ é a subtração da posição dos pares x e y [adimensional].

## 4. RESULTADOS

Nesta etapa são apresentados os resultados de ganho de calor anual do modelo nas diferentes áreas de abertura e valores de fator solar. As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram os resultados de ganho de calor por percentual de abertura e fator solar nas cidades de Curitiba, São Paulo, Rio de Janeiro e São Luís, respectivamente, nas orientações norte, leste, sul e oeste.

Os gráficos mostram que o aumento do percentual de abertura está diretamente relacionado com o aumento do ganho de calor para dentro da edificação e que essa variação ocorre de forma linear para as quatro cidades

analisadas. O coeficiente R² correspondente para cada reta das Figuras 2, 3, 4, e 5 foi igual a 1, expressando que os pontos se ajustaram perfeitamente à reta de regressão linear resultante do experimento.

Os maiores valores de ganho de calor anuais ocorreram em São Luís, na fachada orientada para oeste e vidros com fator solar de 0,87, que chegou a um valor de 6,23 GJ para o percentual de abertura de 30%. Os menores valores ocorreram em Curitiba e São Paulo, na fachada orientada para o sul e com vidros com fator solar de 0,39 e percentual de abertura de 16%, correspondendo a ganhos de calor de 0,74 GJ e 0,77 GJ, respectivamente. Na maioria das cidades, a orientação norte foi a que obteve os maiores valores de ganho de calor por fator solar, com exceção de São Luís, onde o maior ganho de calor ocorreu na orientação oeste.

O fato de São Luís estar localizado muito próximo à linha do equador (latitude de - 2,5°) pode ter acarretado em um ganho de calor inferior na orientação norte em relação aos ganhos de calor nas orientações leste e oeste, uma vez que, para essa latitude, a inclinação dos raios solares tende a ser menor ao longo da tarde, se comparado com cidades em latitudes maiores como Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro. O aumento do fator solar dos vidros de 0,39 para 0,87 propiciou um aumento do ganho de calor entre 1,00 GJ e 2.66 GJ em todas as orientações e cidades analisadas.

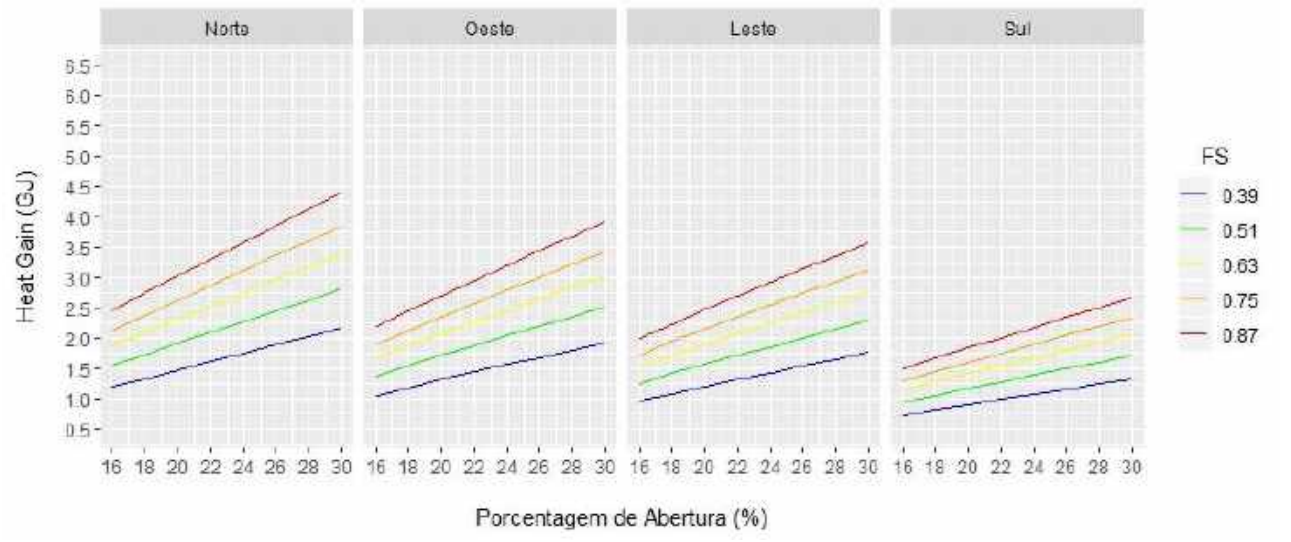



Figura 2 - Ganho de calor nas aberturas em Curitiba (PR).

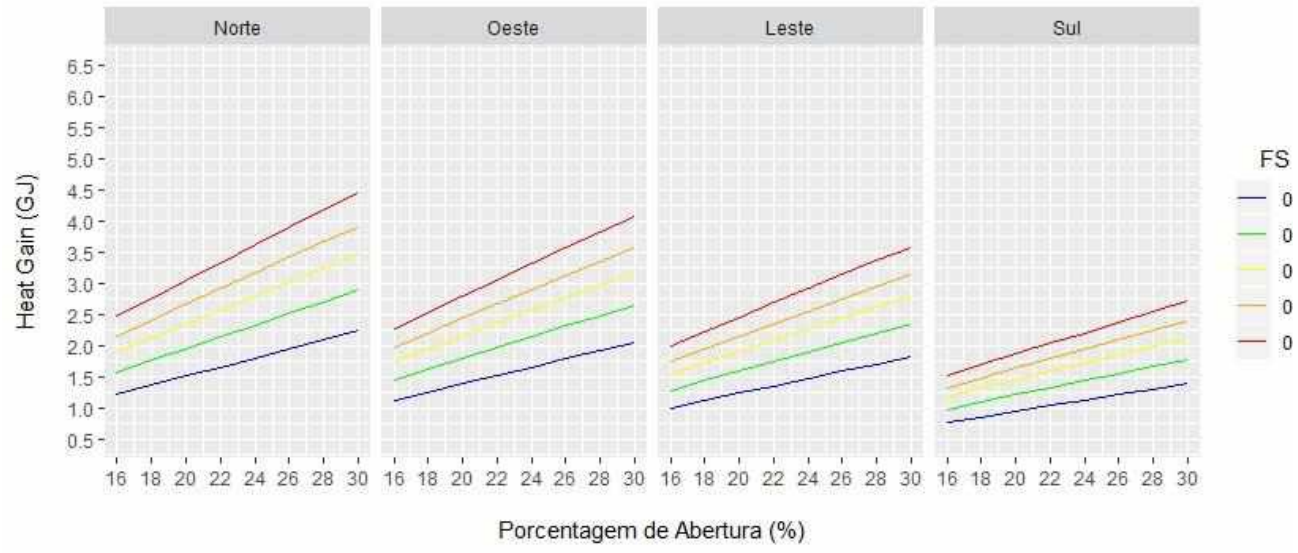



Figura 3 - Ganho de calor na abertura em São Paulo (SP).

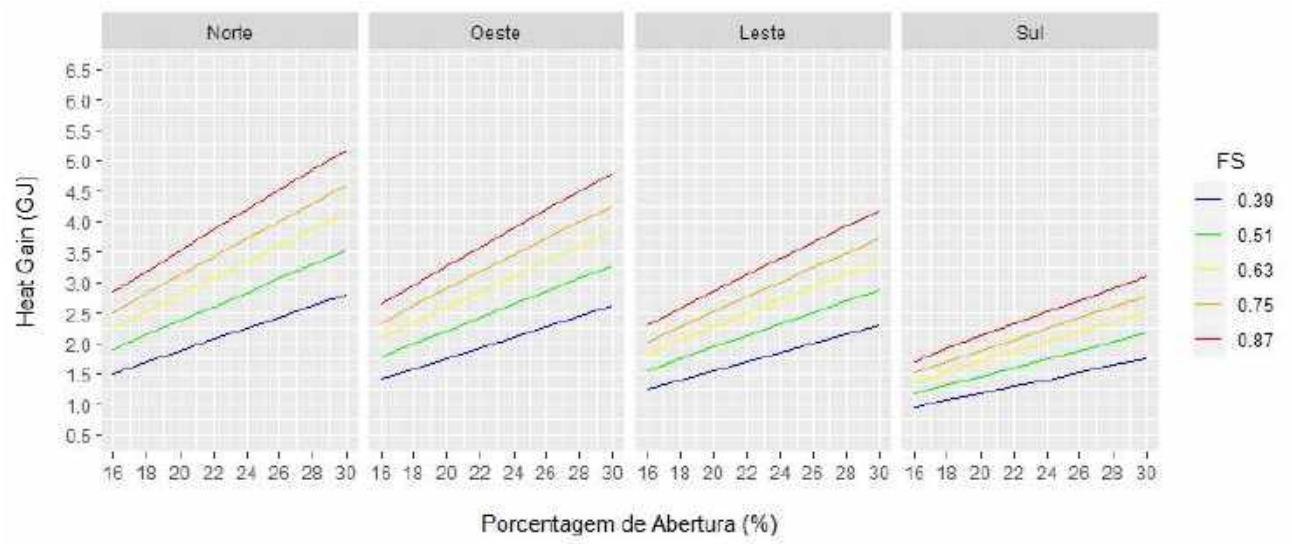



Figura 4 - Ganho de calor nas aberturas no Rio de Janeiro (RJ).

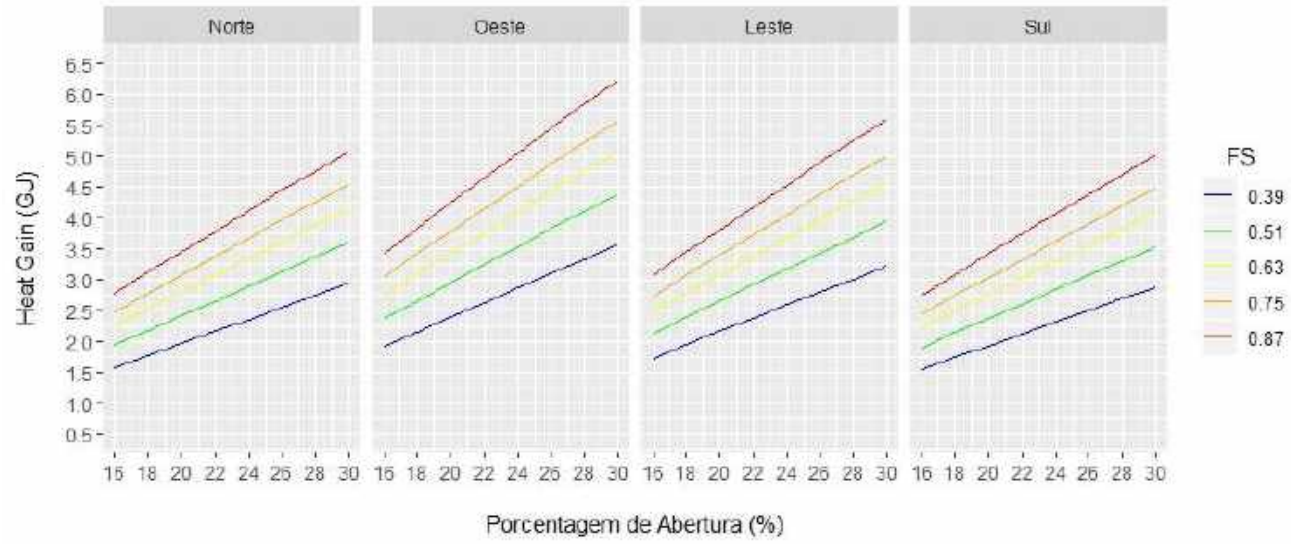



Figura 5 – Ganho de calor na abertura em São Luís (MA).

A Tabela 2 apresenta as equações das retas que determinam os gráficos de ganho de calor apresentados nas Figuras 2, 3, 4 e 5. Os valores descritos na Tabela 2 representam equações lineares de primeiro grau (y = ax + b), onde o variável dependente "y" corresponde ao ganho de calor anual, a variável independente "x" representa o percentual de abertura, "a" corresponde ao coeficiente angular da reta e "b" ao coeficiente linear. Nota-se, através dos coeficientes angulares "a", que, para todas as cidades, as retas aumentaram sua inclinação com o aumento do fator solar, ou seja, para os casos analisados, o aumento do fator solar fez com que o ganho de calor ficasse mais sensível às variações de percentual de abertura. Por exemplo, para as quatro cidades na fachada norte, o coeficiente "a" variou entre 0,070 e 0,097 para o fator solar de 0,39, e, para o fator solar de 0,87, essa variação foi de 0,139 a 0,167.

A Figura 6 mostra os gráficos com o ajuste polinomial de segundo grau das equações lineares para as cidades de Curitiba, São Paulo, Rio de Janeiro e São Luís, que relacionam fator solar e percentual de abertura, considerando um ganho de calor fixo correspondente a um percentual de abertura de 17% para cada cidade.

Tabela 2 – Equação das retas.

| | | Fachada Norte | | Fachada Sul | | Fachada Leste | | Fachada Oeste | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | FS | a | b | a | b | a | b | a | b |
| São Luís (MA) | **0,39** | 0,097 | 0,041 | 0,095 | 0,041 | 0,106 | 0,048 | 0,117 | 0,054 |
| | **0,51** | 0,118 | 0,061 | 0,116 | 0,061 | 0,129 | 0,069 | 0,143 | 0,079 |
| | **0,63** | 0,135 | 0,090 | 0,133 | 0,090 | 0,149 | 0,101 | 0,165 | 0,115 |
| | **0,75** | 0,147 | 0,133 | 0,145 | 0,133 | 0,162 | 0,147 | 0,180 | 0,170 |
| | **0,87** | 0,163 | 0,178 | 0,161 | 0,178 | 0,180 | 0,197 | 0,200 | 0,228 |
| Rio de Janeiro (RJ) | **0,39** | 0,092 | 0,040 | 0,057 | 0,035 | 0,075 | 0,041 | 0,086 | 0,047 |
| | **0,51** | 0,115 | 0,059 | 0,071 | 0,050 | 0,094 | 0,059 | 0,107 | 0,066 |
| | **0,63** | 0,135 | 0,089 | 0,082 | 0,070 | 0,109 | 0,084 | 0,125 | 0,095 |
| | **0,75** | 0,149 | 0,135 | 0,089 | 0,099 | 0,120 | 0,121 | 0,137 | 0,139 |
| | **0,87** | 0,167 | 0,184 | 0,099 | 0,129 | 0,134 | 0,161 | 0,154 | 0,186 |
| São Paulo (SP) | **0,39** | 0,073 | 0,063 | 0,045 | 0,050 | 0,059 | 0,058 | 0,067 | 0,062 |
| | **0,51** | 0,094 | 0,086 | 0,057 | 0,070 | 0,076 | 0,083 | 0,085 | 0,088 |
| | **0,63** | 0,112 | 0,115 | 0,068 | 0,094 | 0,090 | 0,111 | 0,102 | 0,121 |
| | **0,75** | 0,125 | 0,158 | 0,076 | 0,124 | 0,100 | 0,149 | 0,114 | 0,165 |
| | **0,87** | 0,142 | 0,203 | 0,085 | 0,157 | 0,113 | 0,191 | 0,129 | 0,213 |
| Curitiba (PR) | **0,39** | 0,070 | 0,079 | 0,043 | 0,055 | 0,057 | 0,062 | 0,062 | 0,070 |
| | **0,51** | 0,090 | 0,109 | 0,055 | 0,078 | 0,074 | 0,089 | 0,080 | 0,101 |
| | **0,63** | 0,108 | 0,143 | 0,066 | 0,104 | 0,088 | 0,121 | 0,097 | 0,136 |
| | **0,75** | 0,122 | 0,189 | 0,073 | 0,136 | 0,099 | 0,161 | 0,108 | 0,181 |
| | **0,87** | 0,139 | 0,236 | 0,083 | 0,171 | 0,113 | 0,205 | 0,123 | 0,231 |

Percebe-se que, a um ganho de calor correspondente a 17% para cada cidade e orientação, é possível aumentar a área de abertura na medida em que se reduz o fator solar do vidro, e que esse comportamento se assemelha a uma curva polinomial. Os gráficos também exibem uma relação muito próxima para as diferentes fachadas, em todos os climas. Isso indica que, para atingir o mesmo ganho de calor com percentual de abertura em 17% e fator solar de 0,87, a área de abertura deve ser alterada de maneira consideravelmente similar em todas as orientações, com uma variação máxima de 1,33% no Rio de Janeiro, entre as orientações norte e sul e fator solar de 0,39.

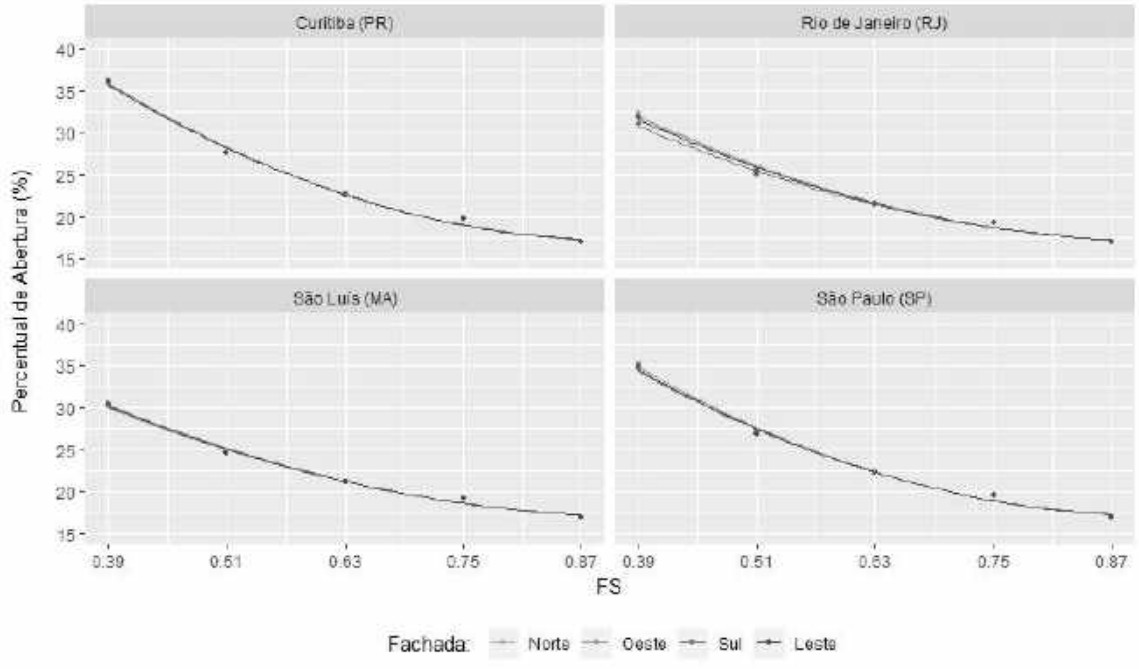



Figura 6 – Relação porcentagem de abertura por fator solar para cada clima e fachada.

As equações polinomiais das melhores curvas encontradas para cada clima e orientação, descritas na Figura 6, estão apresentadas na Tabela 3 na forma de polinômios de segunda ordem ($y= ax^2 + bx +c$), em que a variável dependente "y" corresponde ao percentual de abertura, a variável dependente "x" representa o fator solar e os coeficientes "a", "b" e "c" descrevem o comportamento da curva.

Tabela 3 – Equação das curvas.

| | Fachada Norte | | | Fachada Sul | | | Fachada Leste | | | Fachada Oeste | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | c | a | b | c | a | b | c | a | b | c |
| Curitiba (PR) | 68,15 | - 124,35 | 73,96 | 66,15 | - 121,54 | 73,01 | 67,48 | - 123,34 | 73,59 | 68,75 | - 125,39 | 74,42 |
| São Paulo (SP) | 64,25 | - 117,42 | 70,87 | 60,03 | - 111,00 | 68,45 | 61,89 | - 113,77 | 69,47 | 63,63 | - 116,57 | 70,60 |
| Rio de Janeiro (RJ) | 51,88 | - 96,24 | 61,76 | 44,52 | - 84,29 | 56,89 | 48,82 | - 91,32 | 59,78 | 50,52 | - 94,11 | 60,93 |
| São Luís (MA) | 41,21 | - 78,41 | 54,29 | 42,04 | - 79,98 | 55,03 | 41,39 | - 79,01 | 54,65 | 42,72 | - 81,11 | 55,49 |

As equações não são exatamente as mesmas, mas a dispersão dos respectivos pontos que geram cada curva é bastante aproximada, uma vez que o ρ de Spearman calculado é igual a -1 para todas as curvas. Também se percebe que, analisando cada cidade separadamente, os coeficientes "a", "b" e "c" são semelhantes entre si para todas as quatro orientações. Desta forma, pode-se afirmar que, para os casos analisados, é possível determinar o quanto pode ser aumentada a área de abertura de um ambiente a partir da redução do fator solar dos vidros, mantendo o mesmo ganho de calor que entra pelas janelas, através de uma equação única para cada cidade.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou analisar a relação entre a redução do fator solar e o aumento do percentual de abertura, de modo a investigar a possibilidade de se estabelecer equivalências entre esses dois parâmetros. Foi simulado um modelo base com 3,0 m de largura, 3,0 m de profundidade e pé direito de 2,5 m. O modelo possuía uma abertura vertical cujo percentual de abertura variou de 16% a 30% e o fator solar variou de 0,39 a 0,87. As simulações foram realizadas nas cidades de Curitiba, São Paulo, Rio de Janeiro e São Luís e em quatro orientações: norte, leste, sul e oeste, totalizando 640 simulações.

Para os casos analisados, a diminuição do fator solar de 0,87 para 0,39 provocou uma redução entre 1,00 GJ a 2,66 GJ do ganho de calor anual pelas aberturas. Percebeu-se que a redução do fator solar tende a fazer com que o ganho de calor pelas aberturas ficasse menos sensível ao aumento do percentual de abertura, e que, fixando-se o ganho de calor no valor obtido com o percentual de abertura de 17%, é possível alcançar percentuais de abertura superiores a 30% com a redução do fator solar em todas as cidades analisadas. Os resultados demonstram que a modificação do tipo de vidro pode ser utilizada como uma estratégia para a redução do ganho de calor nas edificações.

Também foi demonstrado que é possível encontrar uma correlação entre o fator solar e o percentual de abertura ao se fixar um valor de ganho de calor constante (de 17%) para as diferentes cidades analisadas. Essa correlação se comporta de maneira similar entre as diferentes orientações, dentro do mesmo clima, tornando possível uma eventual simplificação para que uma única equação determine o comportamento da correlação dentro da mesma cidade.

Observou-se uma similaridade entre as cidades analisadas nas correlações encontradas, o que pode permitir que se estabeleça mais uma simplificação das curvas, considerando climas ou latitudes similares. Para que isso seja feito, entretanto, é preciso que sejam analisados um número maior de cidades e de zonas bioclimáticas. Também é importante aprofundar a pesquisa no sentido de entender o que provoca os diferentes comportamentos das curvas de equivalência entre as cidades analisadas, considerando análises de radiação incidente, latitude ou outros parâmetros climáticos e geográficos. Para um próximo estudo, seria importante analisar o impacto das variações do percentual de abertura e de fator solar na carga térmica do ambiente e no percentual de horas em conforto, considerando o impacto da ventilação natural, uma vez que nesta pesquisa foi analisada apenas a entrada de calor pela abertura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 90.1 – 2013**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Builgings. Atlanta, 2013.

CONSELHO DE ARQUITETURA E URBANISMO - CAU. **Guia para Arquitetos na Aplicação da Norma de Desempenho**. Disponível em: < http://www.caubr.gov.br/wp-content/uploads/2015/09/2_guia_normas_final.pdf> Acesso em: 02 de Maio de 2019.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus**. Disponível em: < https://energyplus.net/> Acesso em: 02 de Maio de 2019.

EUROPEAN UNION. **Directive 2012/27/EU of the european parliment and of the council of 25 October 2012 on energy efficiency**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN> Acesso em: 02 de Maio de 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. Disponível em: < http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001599.pdf> Acesso em: 02 de Maio de 2019.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - LabEEE. **Arquivos climáticos para simulação energética de edificações**. Disponível em: < http://www.labeee.ufsc.br/downloads> Acesso em: 02 de Maio de 2019

LABORATÓRIO DE ESTATÍSTICA E GEOINFORMAÇÃO - LEG. **Coeficiente de correlação de postos de Spearman.** Disponível em: < http://leg.ufpr.br/~silvia/CE701/node80.html> Acesso em: 02 de Maio de 2019

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética – Premissas e diretrizes gerais**. 2011. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/plano-nacional-de-eficiencia-energetica>. Acesso em: 02 de Maio de 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Balanço Energético Nacional 2018**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018> Acesso em: 02 de Maio de 2019.

R PROJECT. **Getting Started**. Disponível em:< https://www.r-project.org/> Acesso em: 02 de Maio de 2019.

RACKES, A.; MELO, A.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, v.174, p 256-274, 2016.

RUPP. R. F, GHISI.E. Assessing window area and potential for electricity savings by using daylighting and hybrid ventilation in office buildings in southern Brazil, **SAGE Journals**, v. 93, p. 11, 2017.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UN ENVIRONMENT; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. 2018 Global Status Report - Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. Disponível em: <https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018%20GlobalABC%20Global%20Status%20Report.pdf> Acesso em: 02 de Maio de 2019.


## AGRADECIMENTOS


Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelos recursos financeiros aplicados no financiamento das bolsas de pós-graduação.