



**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 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA ARQUITETÔNICA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS**

**Jonathan Arthur Raiser Tallmann (1); Carolina Rocha Carvalho (2); Marcelo Galafassi (3)**

(1) Graduando em Arquitetura e Urbanismo, jonathan\_art@outlook.com

(2) Professora, Mestre em Arquitetura e Urbanismo, carolina.carvalho@univali.br

(3) Professor, Doutorando em Arquitetura e Urbanismo, galafassi@univali.br

Universidade do Vale do Itajaí, Curso de Arquitetura e Urbanismo, Balneário Camboriú/SC, 88337-300,  
Tel.: (47) 3261-1219

### **RESUMO**

Com a publicação da Lei 10.295 (17 de outubro de 2001), denominada Lei de Eficiência Energética, iniciou-se formalmente a busca por edifícios mais eficientes energeticamente, e surgiram pesquisas que procuraram relacionar a geometria da edificação para formar indicadores para identificar que influenciam no consumo de energia elétrica. Carlo (2008) utiliza para o RTQ-C os indicadores de Fator de Forma ( $FF = A_{env} / V_{tot}$ ) para representar a geometria da edificação e o Fator Altura ( $FA = A_{p cob} / V_{tot}$ ) para caracterizar a verticalização da edificação. Alanzi et. al (2009) considera o índice de compacidade (IC) para analisar a eficiência energética de uma edificação; Enquanto que Barth et. al (2017) apresenta discussões sobre a fragmentação da forma, sobre a compacidade da edificação e como esta interfere no consumo energético de uma edificação. O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência da geometria arquitetônica na eficiência energética de edifícios comerciais. A metodologia adotada para desenvolver a pesquisa segue as etapas: (i) definição de geometrias arquitetônicas; (ii) definição dos parâmetros para simulação dos modelos no software EnergyPlus e, (iii) análise dos resultados da simulação comparando o consumo de energia de edifícios com diferentes geometrias arquitetônicas. Reforçando a literatura estudada, o modelo circular de edificações apresentou a forma mais compacta, com menor Fator de Forma (FF) e maior Índice de Compacidade (IC), resultando em menor consumo total de energia por área construída. No entanto, os demais resultados não permitem fornecer a informação precisa de que o IC ou FF são parâmetros suficientes para definir o consumo de energia do edifício.

Palavras-chave: Geometria. Eficiência Energética em Edificações Comerciais. Simulação Computacional.

### **ABSTRACT**

With the publication of the law 10.295 (October 17, 2001), called the Energy Efficiency Law, the search for more energy-efficient buildings was formally initiated, and research has emerged that attempted to relate building geometry to form indicators in order to identify the influence of building influences its energy consumption. For the RTQ-C, Carlo (2008) uses the Form Factor ( $FF = A_{env} / V_{tot}$ ) indicators to represent the geometry of the building and the Height Factor ( $FA = A_{p cob} / V_{tot}$ ) to characterize the verticality of the building. Alanzi et. al (2009) considers the compactness index (IC) to analyze the energy efficiency of a building; While Barth et. al (2017) discusses the fragmentation of form, the compactness of the building and how it interferes with the energy consumption of a building. The objective of this research is to evaluate the influence of architectural geometry on the energy efficiency of commercial buildings. The methodology adopted to develop the research follows the steps: (i) definition of architectural geometries; (ii) definition of the parameters for simulation of the models in the EnergyPlus software, and finally (iii) analysis of the simulation results by comparing the energy consumption of buildings with different architectural geometries. Reinforcing the studied literature, the circular building model presented the most compact form, with a lower Form Factor (FF) and higher Compaction Index (IC), resulting in a lower total energy consumption per constructed area. However, the other results do not allow to prove the information that the IC or FF are parameters sufficient to define the energy consumption of the building.

Keywords: Geometry. Energy Efficiency in commercial buildings. Computational simulation

## 1. INTRODUÇÃO

O racionamento de energia que ocorreu em 2001 foi um marco que culminou na promulgação da Lei no. 10.295 (17 de outubro de 2001), chamada Lei de Eficiência Energética, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Esta Lei foi regulamentada pelo Decreto no. 4.059 (10 de dezembro de 2001) que determinou que máquinas e aparelhos, assim como as edificações deveriam ser avaliados com base em indicadores técnicos e regulamentação específica definidos por níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de eficiência energética.

No dia 27 de fevereiro de 2009 foi lançado, através da Portaria do INMETRO n. 53, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do INMETRO. Atualmente o PBE possui um setor que responde apenas à Eficiência Energética de Edificações, chamado PBE-Edifica.

Em 2010 foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) que é regido pela Portaria do INMETRO no. 18 de 16 de janeiro de 2012.

O RTQ-C vigente foi promulgado através da Portaria no. 372 publicada no dia 17 de setembro de 2010. Cabe ressaltar que este encontra-se em sua terceira versão completa e possui três Portarias Complementares. Trata-se de um processo evolutivo que se faz necessário em função do aprimoramento e aperfeiçoamento do programa.

A avaliação da eficiência energética segundo o RTQ-C pode ser realizada através de duas metodologias distintas: (i) Método Prescritivo; (ii) Método por Simulação.

A tese de Carlo (2008) contribuiu para a elaboração das equações utilizadas no método prescritivo do RTQ-C para avaliar a eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas. A metodologia apresentada no RTQ-C possui diferentes equações dependendo da Área de Projeção da Edificação (Ape), assim como a Zona Bioclimática que a edificação está inserida, de acordo com a NBR 15220-3.

O método prescritivo apresenta uma avaliação através de equações simplificadas, onde a geometria da edificação é abordada numericamente através do Fator de Forma (FF), que representa a geometria da edificação, e do Fator Altura (FA), que representa a verticalização da edificação. Estes indicadores expressam numericamente as características geométricas da edificação, entretanto pode-se obter edificações de volumetria variada, mas com mesmos valores de indicadores, prejudicando uma análise mais precisa.

De acordo com o estudo de Alanzi et. al (2009), existem três fatores que devem ser considerados para analisar a eficiência energética de uma edificação: o índice de compacidade (IC); percentual de abertura da fachada; e o tipo de vidro utilizado.

Barth et. al (2017) aborda sobre a fragmentação da forma, sobre a edificação possuir forma mais ou menos compacta (índice de Compacidade – IC), considerando que edificações menos compactas possuem maior área de envoltória aumentando, assim, a área das superfícies em contato com o meio externo.

Apesar de estes indicadores não serem os únicos que impactam no desempenho energético de uma edificação, apenas os referentes à geometria foram abordados no presente artigo. Sobre os indicadores citados, três referem-se à geometria da edificação:

- Fator de Forma (FF);
- Fator Altura (FA);
- Índice de Compacidade (IC).

O cuidado ao projetar edificações buscando maior conforto ambiental influencia, de forma direta, a arquitetura, gerando impacto nas características morfológicas das construções, seu formato, dimensões de fachada, altura e relações de proximidade e afastamento. Assim como, o desempenho energético das edificações está diretamente relacionado a seu conforto ambiental: quanto mais confortáveis forem as edificações menor será a necessidade de uso dos sistemas artificiais de iluminação e climatização. Desta forma a geometria da edificação influencia no ganho térmico através da possibilidade de trocar calor com o meio externo. Visando analisar a influência da geometria da edificação no ganho térmico e consequente consumo energético, o presente trabalho foi elaborado.

## 2. OBJETIVO

Analisar a influência de geometrias arquitetônicas distintas de edificações comerciais no seu ganho térmico e seu respectivo consumo energético, através de simulação computacional.

### 3. MÉTODO

A metodologia adotada para desenvolvimento da pesquisa segue as etapas:

1. Definição de geometrias arquitetônicas;
2. Definição dos parâmetros para simulação dos modelos no software EnergyPlus;
3. Análise dos resultados das simulações através de comparação do consumo energético de edificações com diferentes geometrias arquitetônicas.

#### 3.1 Definição das Geometrias Arquitetônicas

Para a definição dos modelos, foi utilizado como base os critérios, como sugerem os autores referenciados, que apresentam a forma mais compacta possível (Modelo Circular), e formas comumente utilizadas e estudadas, resultando em 7 geometrias distintas, conforme apresentado na Figura 1:

1. Modelo Circular;
2. Modelo Quadrado
3. Modelo Retangular
4. Modelo em “L”
5. Modelo em “T”
6. Modelo em “C”
7. Modelo em “X”

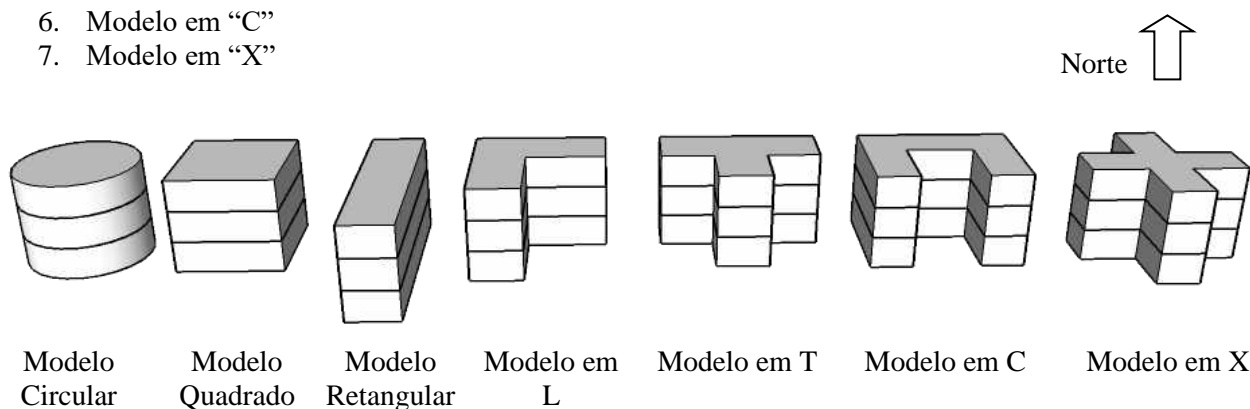


Figura 1: Modelos de edificações com diferentes geometrias.

Foram definidos 7 modelos de edificações comerciais com diferentes geometrias para serem utilizadas nas análises comparativas. Como parâmetros fixos a área total deveria possuir 300 m<sup>2</sup> distribuídos em 3 pavimentos e com pé-direito de 3m, com volume edificado de 900 m<sup>3</sup>. Para cada modelo foi calculado sua Área de Envolvória (Aenv), Fator de Forma (FF) e Fator Altura (FF) e o Índice de Compacidade (IC), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Definição das Geometrias e suas respectivas características numéricas.

MODELO	Apav [m <sup>2</sup> ]	Vol [m <sup>3</sup> ]	A tot [m <sup>2</sup> ]	A fach [m <sup>2</sup> ]	A env [m <sup>2</sup> ]	FF	IC	FA
M-CIRC	100,00	900,00	300,00	319,04	419,04	0,47	2,15	0,33
M-QUAD	100,00	900,00	300,00	360,00	460,00	0,51	1,96	0,33
M-RET	100,00	900,00	300,00	450,00	550,00	0,61	1,64	0,33
M-L	100,00	900,00	300,00	450,00	550,00	0,61	1,64	0,33
M-T	100,00	900,00	300,00	450,00	550,00	0,61	1,64	0,33
M-C	100,00	900,00	300,00	522,00	622,00	0,69	1,45	0,33
M-X	100,00	900,00	300,00	522,00	622,00	0,69	1,45	0,33

A Figura 2 apresenta a planta dos modelos adotados, com dimensões, nomes, identificadores adotados e características numéricas dos modelos.



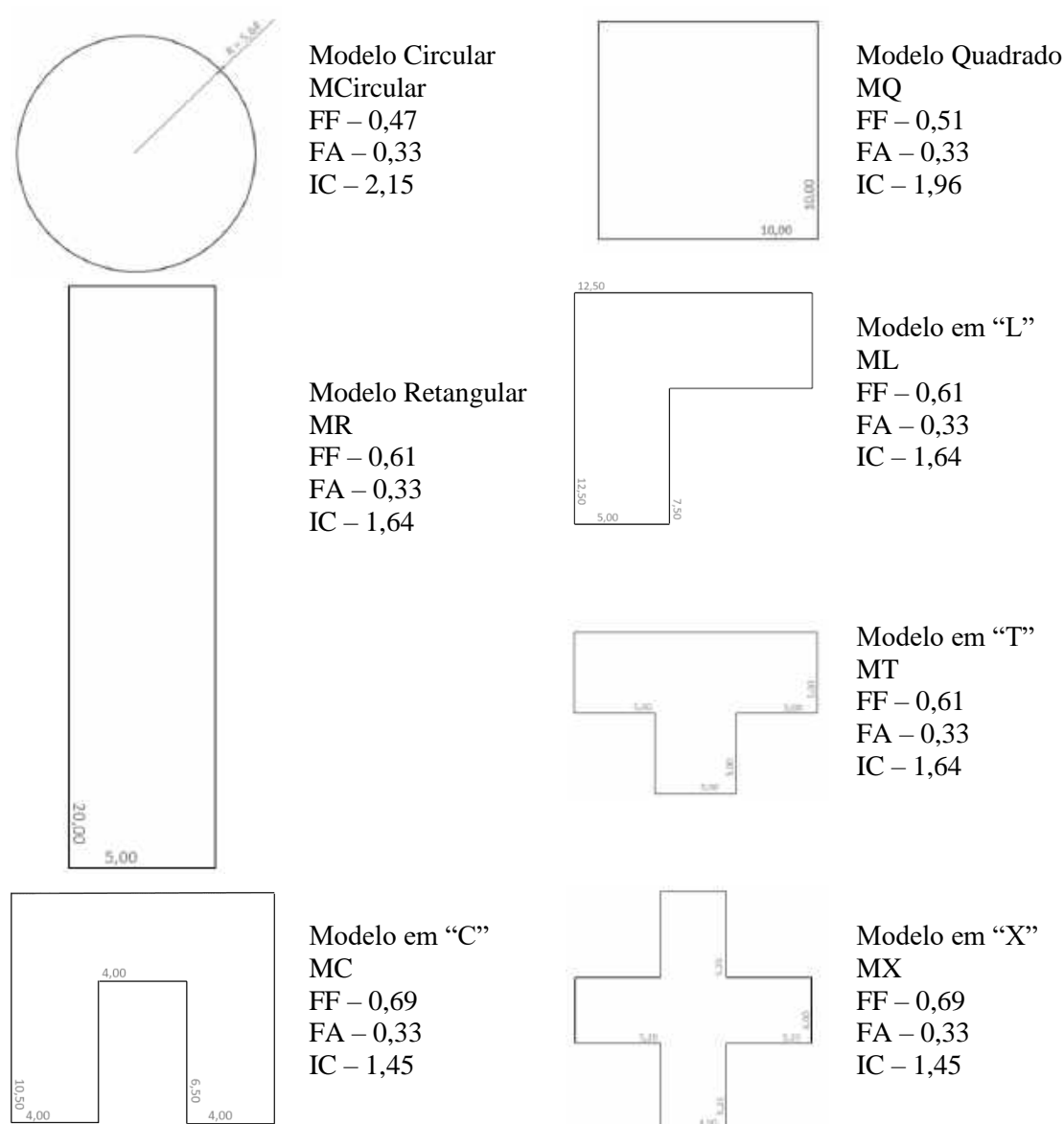


Figura 2: Modelos de edificações com diferentes geometrias, dimensões e características numéricas.

### 3.2 Definição dos Parâmetros de Simulação

Os modelos foram desenhados com o auxílio do software SketchUp utilizando o Plugin OpenStudio e posteriormente simulados no software EnergyPlus com arquivo climático TRY da cidade de Florianópolis disponível no site do LabEEE da UFSC.

Para todos os modelos foram adotadas as mesmas características de composição de componentes verticais (paredes) e horizontais (cobertura), percentual de área envidraçada (PAFt), assim como a distribuição de cargas térmicas internas e mesmo sistema de condicionamento de ar. As características adotadas são apresentadas na Tabela 2.

Os modelos com diferentes geometrias possuem percentual de área envidraçada de 50%, independente da orientação, a área de abertura foi distribuída de forma igualitária em todos os modelos e orientações solares.

Tabela 2: Características dos modelos simulados.

<b>Janelas</b>	PAFT (Percentual de Abertura de Fachada Total)	50%
<b>Paredes</b>	Transmitância Térmica [W/m²K]	2,549
	Absortância solar [adimensional]	0,6
<b>Cobertura</b>	Transmitância Térmica [W/m²K]	1,409

	Absortância solar [adimensional]	0,6
<b>Cargas Internas</b>	Iluminação [W/m <sup>2</sup> ]	9,7
	Pessoas [m <sup>2</sup> /pessoas]	7,14
	Equipamentos [W/m <sup>2</sup> ]	40
<b>Taxa de Infiltração</b>	Índice de renovação de ar através de infiltração [1/h]	0,5

O componente arquitetônico vertical (paredes) utilizado nas simulações computacionais realizadas no EnergyPlus seguiu a configuração:

- Camada 1: Reboco com espessura 25mm ( $\lambda=1,15$  W/m.K;  $c=1000$  kJ/m<sup>2</sup>.K;  $\rho=2000$  kg/m<sup>3</sup>)
- Camada 2: Bloco cerâmico com espessura 7mm ( $\lambda=0,9$  W/m.K;  $c=920$  kJ/m<sup>2</sup>.K;  $\rho=1600$  kg/m<sup>3</sup>)
- Camada 3: Câmara de ar (entre 20mm e 50mm): (Resistência térmica 0,16 m<sup>2</sup>.K/W)
- Camada 4: Bloco cerâmico com espessura 12mm ( $\lambda=0,9$  W/m.K;  $c=920$  kJ/m<sup>2</sup>.K;  $\rho=1600$  kg/m<sup>3</sup>)
- Camada 5: Câmara de ar (entre 20mm e 50mm) : (Resistência térmica 0,16 m<sup>2</sup>.K/W)
- Camada 6: Bloco cerâmico com espessura 7mm ( $\lambda=0,9$  W/m.K;  $c=920$  kJ/m<sup>2</sup>.K;  $\rho=1600$  kg/m<sup>3</sup>)
- Camada 7: Reboco com espessura 25mm ( $\lambda=1,15$  W/m.K;  $c=1000$  kJ/m<sup>2</sup>.K;  $\rho=2000$  kg/m<sup>3</sup>)

O componente arquitetônico horizontal (cobertura) utilizado nas simulações computacionais realizadas no EnergyPlus seguiu a configuração:

- Camada 1: Telha cerâmica com espessura 10mm ( $\lambda=1,05$  W/m.K;  $c=920$  kJ/m<sup>2</sup>.K;  $\rho=2000$  kg/m<sup>3</sup>)
- Camada 2: Câmara de ar (maior que 50mm): (Resistência térmica 0,61 m<sup>2</sup>.K/W)
- Camada 3: Laje mista com espessura 120mm ( $\lambda=1,33$  W/m.K;  $c=920$  kJ/m<sup>2</sup>.K;  $\rho=861$  kg/m<sup>3</sup>)

O sistema de condicionamento de ar foi definido como Ideal Load (Carga Ideal) capaz de definir a carga térmica necessária no ambiente sem que os momentos de pico sejam superiores à capacidade de um sistema estabelecido isoladamente. O setpoint de resfriamento adotado foi de 24°C e o de aquecimento foi de 20°C.

### 3.3 Análise dos resultados das simulações

Após a realização das simulações, foram comparadas as geometrias com diferentes FF e IC, através dos valores de consumo energético total, densidade de consumo, e consumo energético por uso final.

## 4 RESULTADOS

Após a simulação dos modelos pôde-se comparar os consumos energéticos em função dos indicadores de FF, IC e FA, conforme apresentado na Tabela 3.

Observa-se que mesmo contendo a mesma área total (300,00 m<sup>2</sup>) e volume da edificação (900,00 m<sup>3</sup>), os valores de FF e IC apresentaram valores numéricos diferentes. Além disso, observou-se que o modelo retangular, em formato “L” e em “C” apresentaram mesmo FF (0,61) e IC (1,64); E os modelos em formato “X” e em “T” apresentaram 0,69 como FF e 1,45 como IC.

Como resultado relevante destaca-se o modelo com geometria circular, que apresenta a forma mais compacta entre os formatos utilizados. Este possui Fator de Forma de 0,47 e Índice de Compacidade de 2,15 apresentando o consumo energético anual de 335,03 kWh/m<sup>2</sup>. Assim confirmou-se que dentre os modelos estudados, a forma mais compacta apresentou o menor consumo energético, considerando gastos com iluminação artificial, equipamentos, condicionamento do ar tanto para aquecer quanto para resfriar. Dentre as edificações com mesma área e mesmo volume, o modelo circular apresenta menos área de fachada para cada volume interno, diminuindo a influência do ganho térmico pela fachada.

Tabela 3: Consumo anual total de energia por área e indicadores da geometria da edificação.

Modelos	Consumo anual total de energia por área (kWh/m <sup>2</sup> )	FF (Aenv/Vtot)	IC (Vtot/Aenv)	FA (Apav/Atot)
M-CIRC	335,03	0,47	2,15	0,33
M-QUAD	343,11	0,51	1,96	0,33
M-RET	351,72	0,61	1,64	0,33
M-L	356,57	0,61	1,64	0,33
M-C	357,53	0,61	1,64	0,33
M-X	357,33	0,69	1,45	0,33
M-T	349,45	0,69	1,45	0,33

Observou-se nas análises que o consumo energético aumentou gradativamente à medida que aumentava a área de fachada (mantendo mesmo volume interno), entretanto no Modelo “T” apresentou uma discrepância, apresentando um valor incoerente com a hipótese que se esperava confirmar. Além deste resultado, observou-se que nos casos de valores de FF e IC coincidentes, os consumos energéticos apresentaram-se diferentes.

Na Figura 3 observa-se que o IC decresce à medida que os modelos apresentam geometrias mais facetadas, entretanto o consumo energético aumenta gradativamente, excluindo o modelo em formato “T”.

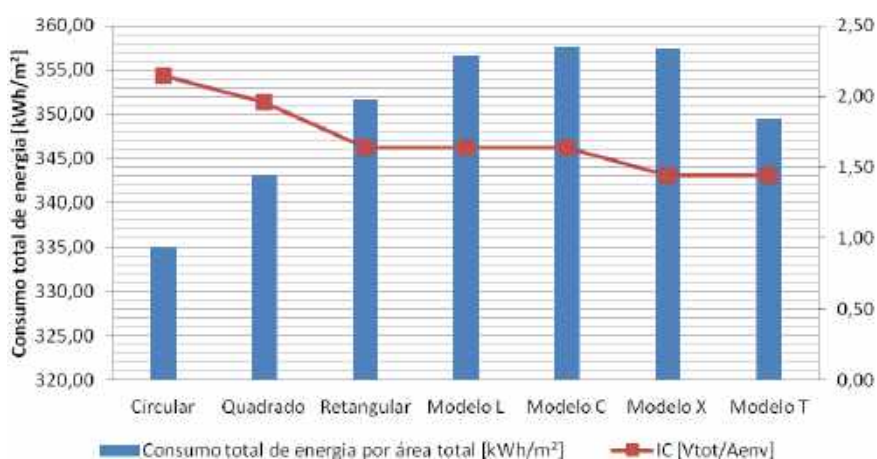


Figura 3: Relação entre o consumo energético total (kWh/m<sup>2</sup>) e o Índice de Compacidade (IC).

No gráfico 2, onde relaciona-se o FF com o consumo, observa-se o comportamento semelhante ao apresentado na Figura 3.

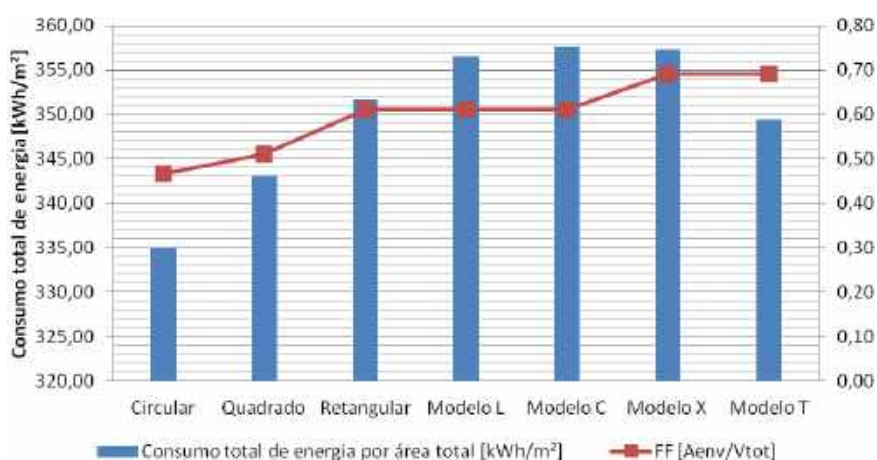


Figura 4: Relação entre o consumo energético total (kWh/m<sup>2</sup>) e o Fator de Forma (FF).

À medida que aumenta a proporção entre a área de envoltória e a área total, aumenta a complexidade da geometria arquitetônica, assim algumas áreas sobressalentes provocam sombreamento em outras fachadas em alguns momentos do dia, diminuindo o impacto da radiação solar direta em alguns momentos do dia.

Para uma análise mais criteriosa, foi necessário observar o consumo por uso final dos sistemas, conforme apresentado na Tabela 4. Os valores referentes ao consumo energético dos sistemas de iluminação artificial e equipamentos manteve-se constante, pois são balizados pela área, e esta manteve-se padrão para todos os modelos analisados.

Tabela 4: Consumo total de energia por uso final.

MODELOS	Aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> ]	Resfriamento [kWh/m <sup>2</sup> ]	Iluminação [kWh/m <sup>2</sup> ]	Equipamento [kWh/m <sup>2</sup> ]
M-CIRC	7,62	198,20	25,22	104,00
M-QUAD	8,48	205,41	25,22	104,00
M-RET	10,97	211,54	25,22	104,00
M-L	10,94	216,41	25,22	104,00
M-C	12,80	215,51	25,22	104,00
M-T	10,97	209,26	25,22	104,00
M-X	12,77	215,34	25,22	104,00

A partir dos dados apresentados na Tabela 4 foram gerados gráficos com o consumo total por uso final a fim de observar o comportamento da energia consumida para sistema de aquecimento (Figura 5) e para o sistema de resfriamento (Figura 6).

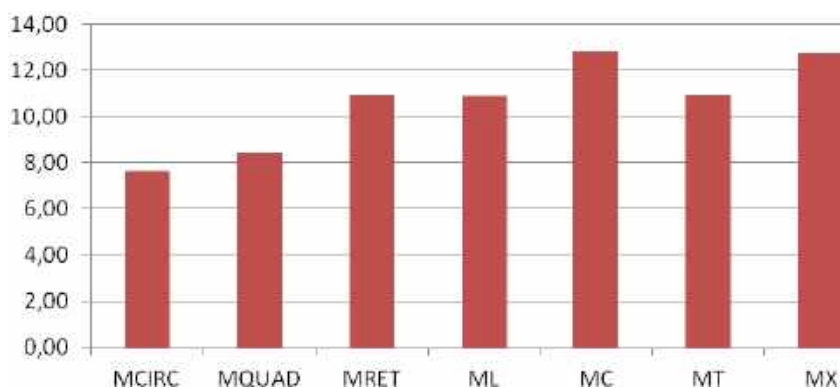


Figura 5: Energia consumida para uso final de aquecimento (kWh/m<sup>2</sup>)

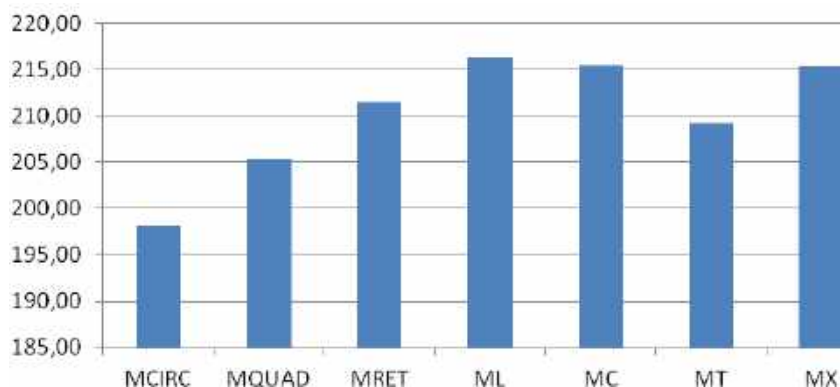


Figura 6: Energia consumida para uso final de resfriamento (kWh/m<sup>2</sup>)

Os modelos Circular, Quadrado e Retangular não apresentam efeitos de sombreamento na própria edificação, então comparando apenas estes três modelos, observou-se que com o aumento da proporção entre área de fachada e área construída, aumenta o consumo energético da edificação.

Entretanto, ao observar todos os modelos, não foi possível, através da análise de consumo por uso final traçar uma relação linear entre o aumento do FF ou redução do IC e o consumo energético para aquecimento ou resfriamento, conforme observado nas Figuras 5 e 6.

O efeito do sombreamento da própria edificação (auto sombreamento) influencia no consumo energético da mesma, sendo assim com as análises realizadas por esta pesquisa não foi possível comprovar

esta relação. Para tanto se faz necessário a análise de outras variações da geometria, assim como dos demais parâmetros de simulação e orientação solar dos modelos. Destaca-se ainda, que seria interessante analisar as edificações com mais números de pavimento e compará-los entre si, de forma a analisar a influência do Fator Altura (FA), que não foi analisado na atual pesquisa.

## 5. CONCLUSÕES

Dentre os modelos analisados, a edificação de formato circular apresentou o menor valor de FF e maior IC resultando em um menor consumo energético, reforçando as afirmações dos autores citados. Ao analisar formato de edificações que não provocam sombreamento sobre si mesmas (modelo circular, quadrado e retangular), observou-se que aumentando o FF ou reduzindo o IC, o consumo energético produziu um crescimento linear que se tornou perceptível nos gráficos. Entretanto, com apenas 3 modelos apresentando tal comportamento não se produz uma sentença verdadeiramente absoluta. Seria interessante elaborar outros modelos com dimensões variadas para comprovar a hipótese.

Ao comparar modelos de mesmo FF e IC, observou-se que há uma variação no consumo energético, mesmo que pequeno, mas não apresentam o mesmo valor de consumo, descartando a influência direta de que com apenas estes indicadores consegue-se estimar o consumo energético de uma edificação. Para tal afirmação se faz necessário o desenvolvimento de mais variações de geometria, considerar a orientação solar nas simulações e variar outros parâmetros das edificações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALANZI, Adnan; SEO Donghyun; KRATI, Moncef. (2009). **Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait**. In: Energy Conversion and Management. V. 50 (2009) p822–828
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- BARTH, Fernando et al. (2017) **Compacidade dos espaços arquitetônicos**. Mix Sustentável - Edição 05/V3.N1. 2017.
- BRASIL (2001). Lei n. 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**. Lex: Diário Oficial da União, Brasília, 2001.
- \_\_\_\_\_. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria 53, de 27 de fevereiro de 2009. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria 372, de 17 de setembro de 2010. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Rio de Janeiro, 2010.
- CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não Residenciais**. 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNIVALI pelos recursos disponibilizados que permitiram o desenvolvimento da pesquisa que originou este artigo.