

## **AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA VERSUS CONSUMO DE ELETRICIDADE DE UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

**Marcio José Sorgato (1); Ricardo Rüther (2)**

(1) Arquiteto, Dr. em Engenharia Civil, [sorgatomarcio@gmail.com](mailto:sorgatomarcio@gmail.com)

(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, [ricardo.ruther@ufsc.br](mailto:ricardo.ruther@ufsc.br)

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar Fotovoltaica, Av. Luiz Boiteux Piazza, 1302, Lotes 114/115 - Florianópolis - SC, 88056-000, Tel.: (48) 3721-4598

### **RESUMO**

No Brasil, as edificações residenciais unifamiliares representam 86% do setor residencial; este tipo de edificação possui potencial para instalação de sistema de geração local, devido à razão entre a área de cobertura e a demanda energética da edificação. O objetivo do artigo é avaliar o potencial de geração de eletricidade renovável em uma residência unifamiliar em quatro diferentes contextos climáticos brasileiros, comparando a estimativa de geração fotovoltaica com o consumo de eletricidade da edificação. O estudo está dividido em duas etapas: (1) Dimensionamento do sistema fotovoltaico integrado à cobertura da edificação; simulações para estimar a geração de eletricidade do sistema fotovoltaico proposto, utilizando o programa PVSyst. (2) Avaliação do desempenho térmico e energético da residência unifamiliar, por meio de simulação computacional no programa *EnergyPlus*. Os resultados mostraram que é possível atender a demanda de eletricidade da residência unifamiliar, com um sistema fotovoltaico integrado na cobertura da edificação. O clima da cidade influencia significativamente no consumo de eletricidade da edificação; entretanto, na geração fotovoltaica apresentou pequena variação. A edificação apresentou balanço energético positivo nas quatro cidades analisadas. As edificações residenciais podem ser uma solução para geração distribuída e para a geração de eletricidade renovável, contribuindo para uma matriz energética mais limpa. A energia excedente da edificação pode ser usada para recarregar veículos elétricos, proporcionando a disseminação do uso desta tecnologia emergente.

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica, Integração fotovoltaica à arquitetura, simulação do desempenho térmico e energético.

### **ABSTRACT**

In Brazil, single-family buildings represent 86% of the residential sector, this type of building has the potential for installation of a photovoltaic system. The main objective of this article is to evaluate the potential of renewable energy generation in a single-family building to four different Brazilian climatic contexts, comparing the estimation of photovoltaic generation with the electricity consumption of the building. This study has been divided into two stages: (1) Sizing of the photovoltaic system integrated on the roof of the building. Simulations to estimate the electricity generation of the proposed photovoltaic system using the PVSyst software. (2) Evaluation of the thermal and energetic performance of the single-family building, using the EnergyPlus software. The results showed that it is possible to meet the electricity demand of the single-family building, with a photovoltaic system integrated on the roof of the building. The climate of the city has a significant impact of the consumption of electricity of the building, however, the photovoltaic generation presented small variation. The building presented a positive energy balance in the four cities analyzed. Residential buildings can be a solution for distributed generation and for renewable energy generation, contributing to a cleaner energy matrix. The surplus energy can be used to recharge electric vehicles, providing the dissemination of the use of that emerging technology.

**Keywords:** Photovoltaic Solar Energy, Building-integrated photovoltaic systems, Thermal and energy performance simulation.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, muitos projetos de edificações estão enfatizando a sustentabilidade, explorando estratégias passivas, eficiência energética e geração de energia local. O setor de edificações consumiu 31% da energia primária no mundo (IEA, 2016). As edificações brasileiras (comerciais e residenciais) foram responsáveis por aproximadamente 50% da eletricidade consumida no ano de 2015 (EPE, 2016).

No Brasil, as edificações residenciais unifamiliares representam 86% do setor residencial (IBGE, 2011). As edificações apresentam grande potencial para a geração de energia local. Atualmente, o sistema fotovoltaico é o mais utilizado na geração de eletricidade quando integrados nas edificações. A energia gerada pelo sistema fotovoltaico é considerada uma energia renovável, sendo uma das principais vantagens da geração local. Os sistemas fotovoltaicos integrados nas edificações vêm se tornando uma alternativa promissora para o futuro, podendo contribuir para o desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa.

As Edificações de Energia Zero (EEZ) ou Energia Positiva (EEP) podem contribuir para a matriz energética brasileira, visto que o recurso solar é abundante em todo o território nacional. Outra vantagem é coincidência do pico de geração com o pico de consumo de energia para condicionamento artificial, situações que ocorreram nos últimos anos.

O conceito de edificação de energia zero (EEZ) baseia-se na edificação que produz energia suficiente para suprir o seu consumo anual de energia elétrica (TORCELLINI P *et al.*, 2006). Por definição a geração de energia elétrica deve ser por meio de um sistema próprio de geração renovável. O objetivo é buscar o equilíbrio entre o consumo e a geração de eletricidade na edificação. Alguns autores propõem conceitos mais amplos, como Goldstein *et al.* (2010) sugeriram a adição da energia de transporte dos usuários no balanço energético da edificação. O estudo de Pogharian *et al.* (2008) apresentaram a proposta de incluir a energia consumida na produção dos alimentos e do transporte até a edificação.

A energia fotovoltaica é uma fonte promissora para a integração nas edificações, permitindo a integração na envoltória, como na cobertura ou na fachada (PROBST e ROECKER, 2012). Para aproveitar o potencial da energia fotovoltaica é necessário repensar o processo de concepção das edificações, buscando a melhor solução para integrar os sistemas fotovoltaicos (SCOGNAMIGLIO e RØSTVIK, 2013). Atualmente, há uma grande variedade de módulos fotovoltaicos no mercado, permitindo muitas opções para a integração no edifício. Nos últimos anos, os custos dos sistemas fotovoltaicos reduziram significativamente (SCHMELA *et al.*, 2016). Estudos em climas quentes e ensolarados como o Brasil, mostraram que a tecnologia fotovoltaica pode contribuir para a matriz energética do Brasil (RÜTHER e ZILLES, 2011; MITSCHER e RÜTHER, 2012; SANTOS e RÜTHER, 2012; LACCHINI e RÜTHER, 2015).

De acordo com Crawley (2011) as edificações residenciais apresentam maior facilidade de atingir o balanço de energia zero, visto que os consumos de eletricidade são baixos quando comparados aos outros tipos de edificações. As residenciais unifamiliares demandam sistemas de geração de menor capacidade. As residências unifamiliares apresentam melhor relação entre a área disponível para instalação do sistema (cobertura) e o consumo de eletricidade, estas condições são importantes para atingir o balanço de energia zero.

O consumo de eletricidade nas edificações residenciais é influenciado por vários fatores, como: a eficiência e padrão de uso equipamentos instalados; as políticas energéticas; o custo da energia elétrica; as características da envoltória da edificação; o clima; as condições de conforto térmico dos ambientes; o estilo de vida e o comportamento do usuário.

Pesquisas em climas quentes, como na cidade de Maracaibo (clima equatorial) mostram que o 76% do consumo energia elétrica nas residências são provenientes do uso do sistema de condicionamento artificial para resfriamento (BRAVO e GONZÁLEZ, 2013).

Sorgato (2015) analisou o potencial de operação híbrida (ventilação natural e condicionamento artificial) de edificações residenciais, quantificando o percentual de horas de conforto térmico com base nos modelos adaptativos e na demanda de energia para condicionamento artificial. Os resultados mostraram que é possível ter uma edificação de baixo consumo para o clima da cidade de Florianópolis, garantindo conforto térmico para os usuários em 100% das horas ocupadas.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de geração de energia renovável em uma residência unifamiliar em quatro diferentes contextos climáticos brasileiros, comparando a estimativa de geração fotovoltaica com o consumo de eletricidade da edificação.

### 3. MÉTODO

O potencial de geração de energia renovável da residência unifamiliar versus o consumo energético da edificação foi realizado por meio de simulações computacionais. O método foi dividido em duas etapas: a primeira etapa consiste nas simulações das estimativas de geração de eletricidade do sistema fotovoltaico e a segunda etapa consiste na simulação do desempenho térmico e energético da edificação residencial.

#### 3.1 Modelo da edificação

O modelo da edificação representa uma residência unifamiliar com área de 63 m<sup>2</sup> (com as dimensões 7,0 m x 9,0 m x 2,8 m), possuindo dois dormitórios, sala, cozinha e banheiro. O modelo foi baseado em uma habitação de interesse social (TAVARES, 2006). A Figura 1 apresenta o croqui perspectivo (Figura 1a) e o croqui da planta baixa do modelo residencial (Figura 1b).

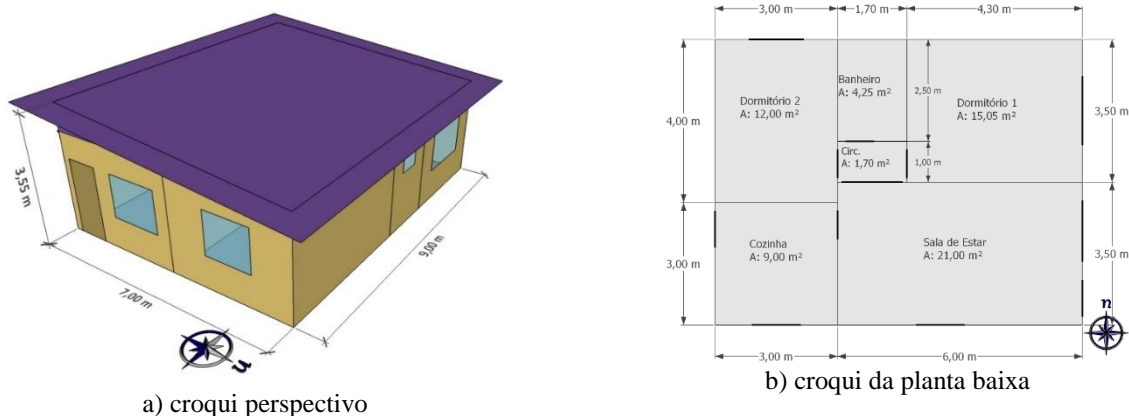


Figura 1 - Croqui perspectivo e croqui da planta baixa do modelo residencial

#### 3.2 Simulações da estimativa de geração

As estimativas de geração de eletricidade do sistema fotovoltaico foram realizadas no programa PVSyst v.6.47 (PVSYST, 2016), com dados sintéticos de irradiação global horizontal e difusa, bem como a temperatura média mensal do ar da base de dados MeteoNorm 7.1 (1991-2010). A Tabela 1 mostra todos esses parâmetros para as quatro cidades avaliadas no estudo.

Tabela 1- Dados mensais de irradiação global horizontal e difusa e temperatura ambiente para as quatro cidades avaliadas neste estudo.

Cidade	Parâmetro	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média Anual
Florianópolis	Irradiação global (kWh/m <sup>2</sup> . dia)	6,48	5,03	4,37	4,48	3,18	2,39	2,68	3,38	3,95	4,63	5,18	5,99	4,31
	Irradiação difusa (kWh/m <sup>2</sup> . dia)	2,16	2,13	1,81	1,40	1,02	0,36	1,03	1,35	1,56	1,79	2,12	2,20	1,58
	Temp. externa do ar (°C)	24,7	23,9	22,0	19,7	17,2	16,6	16,7	17,4	18,8	20,7	22,7	21,3	20,1
Curitiba	Irradiação global (kWh/m <sup>2</sup> . dia)	5,90	5,39	4,99	4,25	3,42	3,06	3,23	4,11	4,18	4,96	5,52	5,97	4,58
	Irradiação difusa (kWh/m <sup>2</sup> . dia)	2,59	2,47	2,12	1,72	1,42	1,16	1,13	1,25	1,89	2,21	2,40	2,52	1,90
	Temp. externa do ar (°C)	21,0	20,4	18,2	16,2	13,4	13,5	14,2	15,3	16,7	18,4	19,8	18,4	17,1
Rio de Janeiro	Irradiação global (kWh/m <sup>2</sup> . dia)	5,85	5,59	5,23	4,06	3,84	3,22	3,79	4,05	4,22	4,87	5,28	5,61	4,63
	Irradiação difusa (kWh/m <sup>2</sup> . dia)	2,77	3,04	2,38	2,13	1,57	1,49	1,37	1,84	2,40	2,90	2,61	3,18	2,30
	Temp. externa do ar (°C)	26,8	26,9	26,1	24,4	22,3	20,7	19,9	21,4	21,9	24,3	25,1	26,5	23,9
Belém	Irradiação global (kWh/m <sup>2</sup> . dia)	4,32	4,17	4,17	4,10	4,89	5,06	5,65	6,02	5,59	5,88	5,61	5,11	5,05
	Irradiação difusa (kWh/m <sup>2</sup> . dia)	2,59	2,78	2,79	2,65	2,29	2,15	1,99	2,15	2,52	2,48	2,51	2,21	2,42
	Temp. externa do ar (°C)	26,6	26,1	26,3	26,1	26,9	26,6	27,0	27,4	26,9	27,5	27,4	27,3	26,9

Na Tabela 2 são apresentados os fatores de perdas adotados nas simulações do sistema fotovoltaico no programa PVSyst.

Tabela 2 – Detalhes das perdas adotadas nas simulações no PVSyst

Detalhe das perdas	Valores
Fator de perda térmica	20 W/m <sup>2</sup> . K
Perda ôhmica na fiação	1,5 %
Perda na qualidade do módulo	2,5 %
Perda mismatch do módulo	0,8 %
Efeito do ângulo de incidência	0,05
Fator de degradação	0,4 %
ISC dispersion RMS	0,4 %
Voc dispersion RMS	0,4 %
Fator de perda por sujeira	3,0 %

### 3.3 Simulação do desempenho térmico e energético

O desempenho térmico e energético da edificação foi simulado no programa *EnergyPlus* v.8.5.0 (ENERGYPLUS, 2016). O *EnergyPlus* é amplamente utilizado em simulações do desempenho térmico e energético de edificações; o programa atende os critérios de teste da ASHRAE Standard 140/2011 (ASHRAE, 2011). A edificação foi simulada com operação híbrida, ventilação natural durante nos períodos em que os ambientes atendem as condições de conforto térmico adaptativo, e condicionamento artificial do ar durante os períodos que as condições não são satisfatórias.

#### 3.3.1 Arquivos climáticos

As simulações foram realizadas com os arquivos climáticos TRY (*Test Reference Year*) para as quatro cidades: Florianópolis (Lat. 27,3° S, Long. 48,3° W), Curitiba (Lat. 25,5° S, Long. 49,18° W), Rio de Janeiro (Lat. 22,8° S, Long. 43,2° W) e Belém (Lat. 1,4° S, Long. 48,5° W). Os arquivos climáticos contêm informações sobre as características de cada cidade e representam um ano típico de uma série de 10 anos (GOULART *et al.*, 1998).

#### 3.3.2 Propriedades térmicas da envoltória

A envoltória da edificação foi definida com base nos limites da NBR-15575 (ABNT, 2013), para as diferentes zonas bioclimáticas (ZB) do estudo, ZB 1 (Curitiba), ZB 3 (Florianópolis) e ZB 8 (Rio de Janeiro e Belém). As paredes são compostas de tijolo cerâmico maciço de 10 cm, a transmitância térmica 3,6 W/(m<sup>2</sup>.K) e a capacidade térmica é de 145,0 kJ/(m<sup>2</sup>.K). A cobertura é composta por telha de fibrocimento (0,8 cm), câmara de ar, forro de madeira (1,0 cm); a transmitância térmica é de 1,93 (W/m<sup>2</sup>.K). Foi considerada a mesma absorptância a radiação solar para cobertura e paredes ( $\alpha$  0,4), para as três zonas bioclimáticas.

Para os ambientes de permanência prolongada foi considerado o percentual da área de janela de 15% da área do piso do ambiente. Nos ambientes de curta permanência a área de janela foi de 10% da área do piso do ambiente. A área de iluminação natural (área de vidro) foi considerada como 100% da área da janela e a área destinada à ventilação natural foi considerada 50% da área da janela, para todos os ambientes. O vidro da abertura é simples (4 mm), com uma transmitância térmica de 5,7 W/(m<sup>2</sup>.K) e o fator solar de 0.87. As aberturas não possuem dispositivos de sombreamento.

#### 3.3.3 Padrão de ocupação e iluminação

O padrão de ocupação representa uma família composta de 4 moradores: um casal e dois filhos. No período das 9h às 18h duas pessoas permanecem na residência. A sala e a cozinha são utilizadas por toda a família e a ocupação máxima dos dormitórios é de duas pessoas. O padrão de iluminação da residência está vinculado ao padrão de ocupação. Considerou-se que os usuários aproveitam a iluminação natural durante parte do período diurno, ligando a iluminação artificial somente em 30% das horas do período diurno (8h às 18h). O banheiro da residência não foi considerado como um ambiente ocupado, devido ser um ambiente de curta permanência dos usuários. A Figura 2 apresenta o padrão de ocupação (a) e de iluminação artificial (b) da residência.

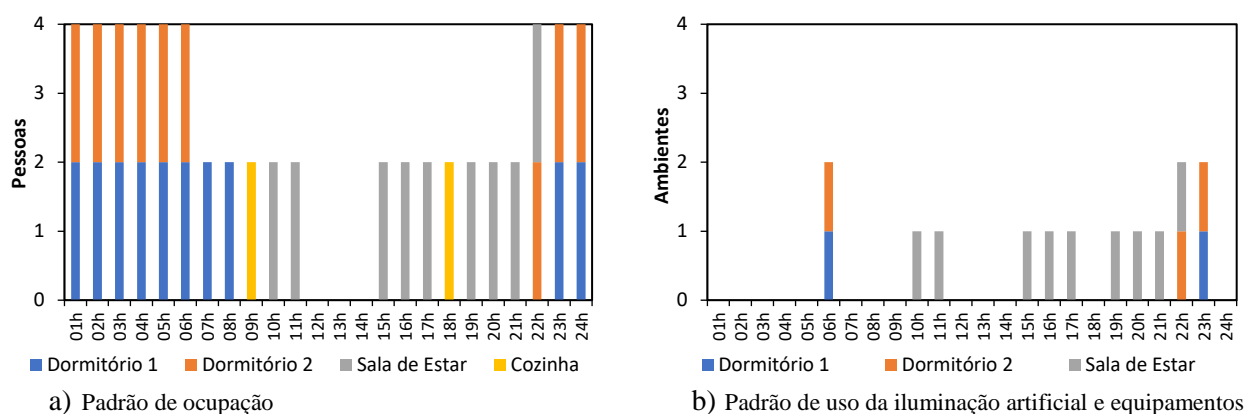


Figura 2 - Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos da residência.

Baseado nas atividades desempenhadas em cada ambiente definiram-se as taxas metabólicas para cada atividade. Os valores das taxas metabólicas foram baseados na ASHRAE (2013); 45W/m<sup>2</sup> no dormitório, 60W/m<sup>2</sup> na sala de estar e 95 W/m<sup>2</sup> na cozinha. Para o cálculo do calor dissipado para cada pessoa foi considerado uma área de pele média de 1,80m<sup>2</sup>; no dormitório foi de 81 W/pessoa, na sala de estar e na cozinha foi de 108 W/pessoa. A fração radiante referente à carga térmica das pessoas considerada foi de 0,3.

Nos dormitórios, sala de estar e cozinha, considerou-se uma densidade de potência de iluminação artificial de 5,0 W/m<sup>2</sup>. A definição da baixa densidade de potência de iluminação artificial é devido ao uso de lâmpadas fluorescentes compactas no contexto residencial brasileiro (SINPHA, 2013).

### 3.3.4 Cargas internas de equipamentos

A Tabela 3 apresenta as cargas internas de equipamentos e o número de horas de uso na sala de estar, cozinha e nos dormitórios.

Tabela 3 – Cargas internas de equipamentos

Ambiente	Período (horas)	Potência (Watts)	Fração radiante
Cozinha	24	85,0	0,5
Sala de estar	9	120,0	0,5
Dormitórios	2	50,0	0,5

### 3.3.5 Modelagem da Ventilação Natural

A modelagem da ventilação natural foi realizada através do módulo *AirFlowNetwork* do *EnergyPlus*, que adota o algoritmo de cálculo do AIRNET (WALTON, 1989). Os coeficientes de pressão foram estimados pelo TNO – *CP Generator*, o coeficiente de descarga foi de 0,60, coeficiente de frestas foi de 0,001 (n=0,65) e o coeficiente de rugosidade do entorno é de 0,33.

### 3.3.6 Modelagem do sistema de condicionamento artificial de ar

A modelagem do sistema de condicionamento artificial de ar foi realizada por meio *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP), que equivalente ao sistema de condicionador de ar split. Os parâmetros da modelagem do sistema de condicionamento foram: termostato de resfriamento 24°C, termostato de aquecimento 21°C, a taxa de fluxo de ar por pessoa de 0.0025 (m<sup>3</sup>/s), a eficiência do ventilador de 0,7, pressão do ventilador de 75 (Pa) e o COP de resfriamento e aquecimento foi de 3,5 W/W. O aquecimento foi simulado somente para as cidades de Curitiba e Florianópolis.

### 3.3.7 Condições de conforto e aceitabilidade dos usuários

O estudo assumiu que os usuários aceitariam as condições de conforto térmico adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2013) para os ambientes condicionados naturalmente da residência. Para o limite superior (desconforto devido ao calor) foi adotado o limite de aceitabilidade de 90%, calculado com base na média aritmética da temperatura externa do ar da semana anterior. Para o limite inferior (desconforto devido ao frio) foi assumida uma temperatura de 18°C para acionamento do sistema de condicionamento artificial. Na faixa até o limite inferior (18°C), considerou-se que o usuário aclimata-se às condições do ambiente, ajustando a vestimenta para evitar o desconforto por frio (DE VECCHI et al., 2014). A Figura 3 apresenta os limites de aceitabilidade da ASHRAE 55/2013, conforme a proposto por De Vecchi et al. (2014) a zona de adaptação do clo.

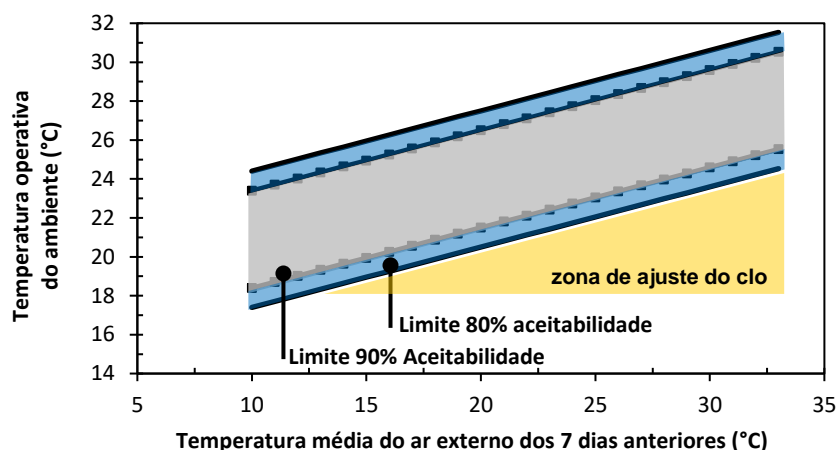


Figura 4 – Limites de aceitabilidade da ASHRAE 55-2013. Adaptado de De Vecchi *et al.* (2014).

### 3.3.8 Controle da ventilação natural e do Sistema de condicionamento de artificial de ar

A estratégia de controle da ventilação natural é seletiva, com base em três condições de controle. Na primeira condição, a temperatura operativa do ambiente deve ser igual ou superior a temperatura de ventilação ( $T_{Amb} \geq T_{Vent}$ ) para permitir a abertura da janela. A temperatura de ventilação assumida é de 23°C. A segunda condição, a temperatura operativa do ambiente deve ser superior a temperatura externa ( $T_{Amb} \geq T_{Ext}$ ). Na última condição, a temperatura operativa do ambiente deve ser menor que a temperatura do limite superior da condição de conforto térmico ( $T_{Amb} < T_{Con}$ ).

O sistema de condicionamento artificial de ar é acionado com base na temperatura operativa do ambiente e nos limites das condições de conforto térmico adaptativo. Quando a temperatura operativa do ambiente é maior que o limite de aceitabilidade superior ou menor que o limite de aceitabilidade inferior, o algoritmo para a simulação de ventilação natural, altera as condições da simulação, continuando a simulação com o sistema de condicionamento artificial de ar ligado. Após o acionamento do sistema de condicionamento artificial é desligado apenas quando o ambiente é desocupado.

A operação híbrida da edificação é realizada por meio dos recursos de controles avançados do *Energy Management System* (EMS), integrando a estratégia de condicionamento passivo com o sistema de condicionamento artificial. O EMS realiza a leitura e a troca de informações durante o processamento da simulação a cada *timestep*. O algoritmo de operação híbrida da edificação (EMS) foi adaptado de Sorgato *et al.* (2016).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

O sistema fotovoltaico da edificação residencial foi proposto na cobertura, com uma inclinação de 10° e orientado a norte (desvio azimutal 0°). Os fabricantes de módulos recomendam a inclinação mínima de 10°, para garantir a autolimpeza dos módulos. Assumiu-se a inclinação de 10° para todas as latitudes, devido à pequena diferença na irradiação solar quando comparado ao módulo inclinado no ângulo da latitude, também foi observado no estudo de (SANTOS e RÜTHER, 2014). Na cobertura da edificação é possível instalar um sistema fotovoltaico com potência de 13,47 kWp, considerando a tecnologia de CdTe. O módulo da tecnologia de CdTe tem potência nominal de 122,5 W e uma eficiência de 17%. A Tabela 4 apresenta as características do sistema fotovoltaico proposto para a edificação residencial.

Tabela 4 – Característica do sistema fotovoltaico da edificação residencial

Sistema	Tecnologia	Potência nominal do módulo	Quantidade de Módulos	Quantidade de strings	Módulos em série	Modelo do inversor	Quantidade de inversores e mppt	Potência do sistema PV (kWp)
Roof	CdTe	122,5 W	110	11	10	TRIO 7,5 kW	2/4	13,47

A Figura 5 apresenta o layout do sistema fotovoltaico para a edificação residencial. O projeto integrou módulos fotovoltaicos na cobertura, considerando uma inclinação de 10°, o sistema com a tecnologia de CdTe é composta por 110 módulos. O layout do sistema da tecnologia de CdTe tem 112 módulos, sendo que o sistema foi dimensionado com 110 módulos, dois módulos são falsos.

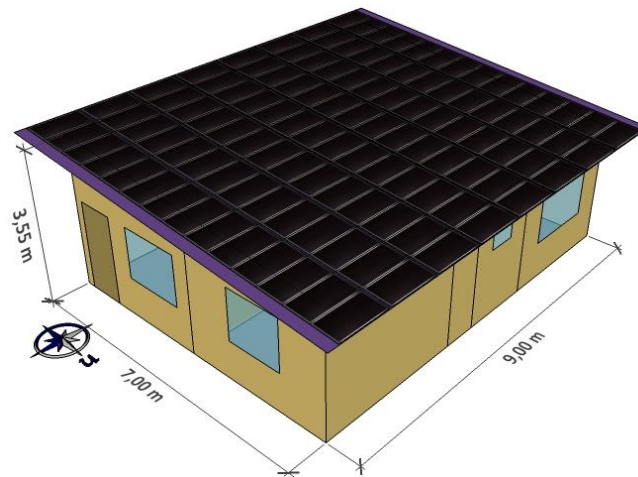


Figura 5 – Layout dos sistemas fotovoltaicos da edificação residencial.

#### 4.2 Uso final de eletricidade da residência

Os usos finais de energia são apresentados na Figura 6, observa-se que a cidade que apresentou o maior consumo de eletricidade foi Belém (4.627 kWh/ano), e a cidade com menor consumo foi Florianópolis (2.748 kWh/ano). Os usos finais de iluminação artificial e equipamentos são iguais para todas as cidades, devido ao mesmo padrão de uso. O consumo de iluminação artificial e equipamentos é equivalente ao consumo médio residencial no ano de 2016, que foi de 160 kWh/mês (EPE, 2017). Em relação ao consumo de energia para condicionamento artificial do ar, observa-se que é predominante o consumo para resfriamento nas cidades de Florianópolis, Rio de Janeiro e Belém, entretanto, na cidade de Curitiba o consumo para aquecimento predomina. A cidade que apresentou o maior consumo de energia para condicionamento artificial do ar foi Belém (2.534 kWh/ano), aproximadamente o dobro do consumo do Rio de Janeiro (1.352 kWh/ano). Em Curitiba o consumo de energia para aquecimento foi de 1.479 kWh/ano. Em Florianópolis o consumo de energia para aquecimento foi de 292,0 kWh/ano e para resfriamento foi de 451,0 kWh/ano.

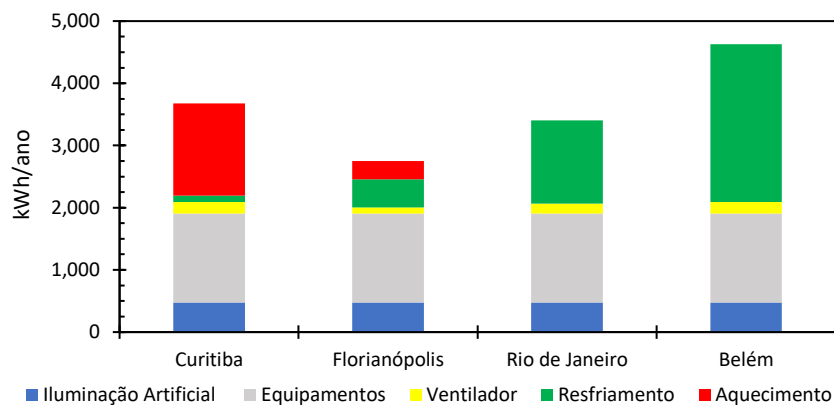


Figura 6 – Uso final de eletricidade da residência

#### 4.3 Estimativas de geração de eletricidade versus consumo de eletricidade

Na Figura 7 são apresentados os resultados da estimativa de geração de eletricidade da edificação residencial versus a estimativa de consumo de eletricidade para Curitiba e Florianópolis. O período de maior geração do sistema fotovoltaico em Curitiba (Figura 7a) ocorre nos meses do verão, e o período de menor geração ocorre na estação do inverno. Entretanto, o período de maior consumo de eletricidade na residência ocorre nos meses do inverno, devido à necessidade de condicionamento artificial para aquecimento dos ambientes. O sistema fotovoltaico tem potencial de geração de eletricidade de cinco vezes a demanda energética da edificação. Para a cidade de Florianópolis (Figura 7b), o período de maior geração de energia em Florianópolis ocorre entre novembro a janeiro, no mês de janeiro a geração foi de 2.129 kWh/mês. Os meses que apresentaram as menores gerações foram junho e julho. A demanda energética de Florianópolis foi 25% menor que a de Curitiba, entretanto, a diferença na geração anual foi de aproximadamente 5%. Em Florianópolis o excedente da geração fotovoltaica foi superior à cidade de Curitiba.

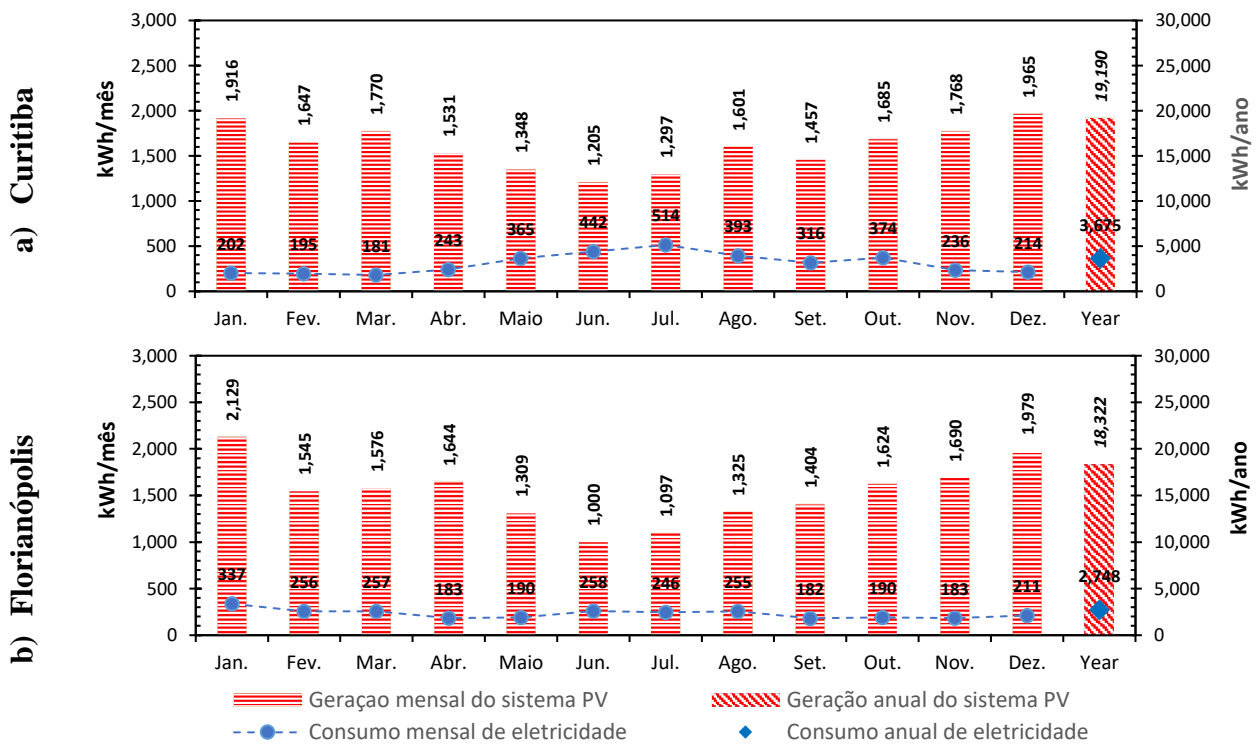


Figura 7 – Estimativa de geração versus estimativa de consumo de eletricidade para Curitiba e Florianópolis.

A geração anual na cidade do Rio de Janeiro (Figura 8a) foi de 18.969 kWh/ano, representa quase seis vezes o consumo energético da residência. O período que apresentou o maior consumo de eletricidade foi de janeiro a março; contudo, no período do inverno os consumos de energia para condicionamento artificial foram baixos, no mês de junho foi praticamente nulo. Belém (Figura 8b) foi a cidade que apresentou a maior demanda de eletricidade (4.627 kWh/ano). A geração anual em Belém foi de 19.837 kWh/ano, 5% superior ao Rio de Janeiro. O período de maior geração do sistema fotovoltaico em Belém (Figura 8b) ocorreu nos meses de junho a outubro, com a maior geração no mês de agosto (2.081 kWh), o mês que apresentou a menor geração foi aproximadamente 42% inferior (1.222 kWh) ao mês e agosto.

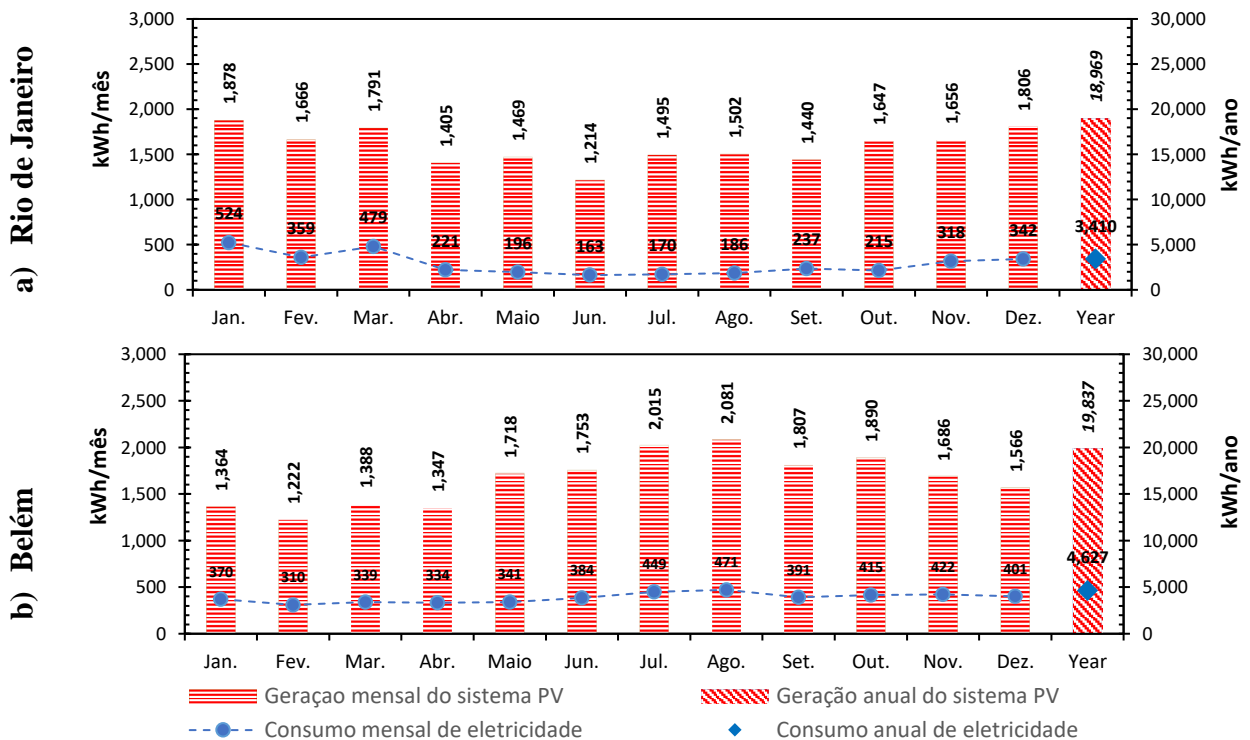


Figura 8 - Estimativa de geração versus estimativa de consumo de eletricidade para Rio de Janeiro e Belém.



## 5. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que é possível atender a demanda de eletricidade da residência unifamiliar, com um sistema BIPV na cobertura da edificação. O clima da cidade impacta significativamente no consumo de energia da edificação para condicionamento artificial. A geração fotovoltaica apresentou pequena (5%) variação nas diferentes condições climáticas. Para as quatro cidades do estudo, o balanço energético anual da edificação foi positivo, apresentando a geração de eletricidade superior ao consumo de eletricidade, em no mínimo cinco vezes o consumo.

Atualmente, o setor residencial contribui significativamente no consumo de eletricidade do Brasil. A edificações residenciais apresentam um potencial de integração de sistemas fotovoltaicos, podendo gerar a sua própria demanda energética, como também contribuindo para a matriz energética brasileira. As edificações residenciais podem ser uma solução para geração distribuída e para a geração de energia renovável, contribuindo para uma matriz energética mais limpa.

Apesar das Resoluções normativas 482 e 687 (ANEEL, 2012; 2015) não permitem a comercialização da energia excedente, uma forma de viabilizar sistemas fotovoltaicos que geram mais que a demanda da edificação seria por meio de consórcios ou condomínios. Em um futuro próximo, a energia excedente da edificação também poderia ser usada para recarregar veículos elétricos, proporcionando a disseminação do uso desta tecnologia emergente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 15575-1: Edifícios habitacionais - Desempenho: Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas 2013.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, de 17 de abril de 2012**. ELÉTRICA, A. N. D. E. Brasil: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA 2012.

\_\_\_\_\_. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, de 24 de novembro de 2015**. ELÉTRICA, A. N. D. E. Brasil: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA 2015.

ASHRAE. **ASHRAE 140-2011: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2011.

\_\_\_\_\_. **ANSI/ASHRAE 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2013.

BRAVO, G.; GONZÁLEZ, E. Thermal comfort in naturally ventilated spaces and under indirect evaporative passive cooling conditions in hot-humid climate. **Energy and Buildings**, v. 63, p. 79-86, 8// 2013.

CRAWLEY, D. Getting from AEDGs to Zero-Energy Buildings. 2011. Cedar Valley.

DE VECCHI, R. et al. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: the Brazilian case. **Architectural Science Review**, v. 58, n. 1, p. 93-101, 2015/01/02 2014.

ENERGYPLUS. v. 8.5. Energy Simulation Software.2016.

EPE. **Brazilian Energy Balance 2016 Year 2015**. ENERGIA, M. D. M. E. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética: 292 p. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética Rio de Janeiro. 2017

GOLDSTEIN, D. B. et al. **Zeroing in on Net-Zero Buildings: Can We Get There? How Will We Know When We Have Arrived?** ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Pacific Grove, CA 2010.

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Núcleo de Pesquisa em Construção Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1998

IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 31 2011.

- IEA. **Key World Energy Trends. Excerpt from: World energy balances.** Paris, France: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2016.
- LACCHINI, C.; RÜTHER, R. The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. **Renewable Energy**, v. 83, p. 786-798, 11// 2015.
- MITSCHER, M.; RÜTHER, R. Economic performance and policies for grid-connected residential solar photovoltaic systems in Brazil. **Energy Policy**, v. 49, p. 688-694, 10// 2012.
- POGHARIAN, S. et al. **Getting to a Net Zero Energy Lifestyle in Canada: The Alstonvale Net Zero Energy House.** 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Valencia, Spain 2008.
- PROBST, M.; ROECKER, C. **Solar energy systems in architecture integration criteria and guidelines.** International Energy Agency. 2012
- PVSYST. v. Software for the Study and Simulation of Photovoltaic Systems.2016.
- RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1027-1030, 3// 2011.
- SANTOS, I. P.; RÜTHER, R. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. **Renewable Energy**, v. 63, p. 116-124, 3// 2014.
- SANTOS, Í. P. D.; RÜTHER, R. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 290-297, 7// 2012.
- SCHMELA, M.; MASSON, G.; NGO, T. M. N. **GLOBAL MARKET OUTLOOK FOR SOLAR POWER 2016-2020.** European Photovoltaic Industry Association. Brussels, Belgium. 2016
- SCOGNAMIGLIO, A.; RØSTVIK, H. N. Photovoltaics and zero energy buildings: A new opportunity and challenge for design. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 21, n. 6, p. 1319-1336, 2013.
- SINPHA. Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo. Disponível em: < <http://www.eletronbras.com/pci/sinpha/Home.asp> >. Acesso em: 05 Mai 2013.
- SORGATO, M. J. **A INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO NO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS.** 2015. (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1-13, 12/1/ 2016.
- TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** 2006. (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- TORCELLINI P, A. et al. **Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition.** 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Pacific Grove, CA, USA, 2006.
- WALTON, G. N. AIRNET - A Computer Program for Building Airflow Network Modeling. 1989.