

ANÁLISE DO USO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM SISTEMA DE  
AR CONDICIONADO PARA CLIMAS BRASILEIROS

**Felipe Rodolfo Schmitt Gabbardo** – felipersgabbardo@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
http://www.ufrgs.br/promec/

**Cirilo Seppi Bresolin** – cirilo.bresolin@ufrgs.br

**Leticia Jenisch Rodrigues** – leticia.jenisch@mecanica.ufrgs.br

Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, http://www.ufrgs.br/ufrgs/inicial

F3 – Cálculo, Projeto e Simulação Termo Energética

**Resumo.** *O uso de energia solar mostra-se um grande aliado para reduzir o consumo de energia elétrica não renovável, ganhando cada vez mais espaço no mercado mundial. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento de um sistema autônomo de ar condicionado que utiliza, como fonte de eletricidade, módulos fotovoltaicos. Buscando avaliar a autonomia desse sistema, escolhe-se uma edificação padrão e simula-se o seu comportamento através do software TRNSYS. As simulações são realizadas para dez cidades brasileiras, nas condições climáticas correspondentes aos períodos do ano de maior irradiância e menor irradiância. A carga térmica de resfriamento é utilizada para dimensionar a potência de operação do gerador fotovoltaico autônomo. Cidades com clima frio apresentam menor carga térmica de resfriamento, fazendo uso do ar condicionado com menor frequência, consequentemente, carregando completamente as baterias. Em cidades próximas ao Equador, não se consegue carregar plenamente as baterias do sistema, entretanto o ar condicionado recebe a energia necessária para seu funcionamento.*

**Palavras-chave:** Energia solar, Ar condicionado, Sistema autônomo, TRNSYS.

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores que irá aumentar a demanda de energia é o aquecimento global. O uso mais intenso de sistemas de ar condicionado devido à elevação da temperatura terá um impacto no aumento dessa demanda, principalmente em países com clima quente, segundo Arent et al., 2014.

O uso de energia renovável é uma das maneiras de suprir a crescente demanda, com menor impacto no meio ambiente. Segundo Braga, 2008, pesquisa e diversificação de energias renováveis têm crescido desde a década de 70, e seu uso, principalmente a energia solar, teve um aumento significativo nos últimos anos. No Brasil, o uso da energia solar na matriz energética é muito baixo comparado a outras fontes, participando com 56,9 MW de capacidade instalada (EPE, 2017).

O uso de sistemas fotovoltaicos tem crescido rapidamente em âmbito mundial. Entre 2000 e 2015, o seu uso aumentou em 41%, sendo que a partir de 2006, China e Taiwan têm aumentado sua indústria fotovoltaica a altas taxas (Sampaio e González, 2017). Fatores que impulsionam o uso são a política climática, a redução de impostos, a pesquisa e desenvolvimento de melhores tecnologias e os subsídios.

O consumo residencial de energia no Brasil usa cerca de 46% de eletricidade, (BEN, 2017). Em períodos mais quentes ao longo do ano, uma quantidade considerável dessa eletricidade é usada em aparelhos de ar condicionados.

Durante o dia, momento de maior carga térmica e maior incidência solar, os habitantes de uma residência saem da mesma para realizar atividades de estudo ou sustento. Durante esse tempo, não se utiliza o ar condicionado, e o uso de um sistema de módulos fotovoltaicos com baterias poderia ser utilizado para armazenamento de energia. A energia armazenada durante o dia poderia ser utilizada durante a noite, quando a carga térmica é menor, fazendo com que um banco de baterias pudesse suprir a demanda elétrica de resfriamento da edificação.

Deste modo este trabalho se propõe a avaliar a viabilidade do uso de energia solar em um sistema autônomo de ar condicionado conectado a painéis fotovoltaicos e conjunto de baterias, para buscar conforto climático em uma construção padrão, através do software TRNSYS 17.

Para isso, serão determinadas e comparadas cargas térmicas de resfriamento para diferentes cidades brasileiras em uma edificação padrão. Com esse resultado, irá se dimensionar o sistema de energia solar, quantificando o número de baterias e painéis fotovoltaicos necessários para que o aparelho de ar condicionado não necessite de energia elétrica da rede, operando de forma autônoma.

Avaliar viabilidade do sistema para diferentes climas, e em diferentes cidades brasileiras. Realizando, finalmente, a comparação entre as cidades escolhidas.

## 2. SISTEMAS DE AR CONDICIONADO COM ENERGIA SOLAR

Li et al., (2015) avaliam o desempenho de um ar condicionado com painel fotovoltaico solar no verão e no inverno. No estudo foram considerados quatro modos de funcionamento, resfriamento em dia de verão, resfriamento em noite de verão, aquecimento em dia de inverno e aquecimento em noite de inverno. No sistema proposto, a principal fonte de

energia é o sistema composto por bateria e painel fotovoltaico. A rede elétrica supre a necessidade de energia quando essa não é fornecida pelo sistema proposto. O cálculo do desempenho é feito analiticamente, e os resultados obtidos demonstram que o sistema pode funcionar estavelmente para resfriamento/aquecimento, que o mesmo é sensível às condições climáticas, e que ligar a rede elétrica ao sistema de painéis fotovoltaicos e ar condicionado pode reduzir flutuações e picos de carga na rede.

Goldworthy, 2017, avalia o projeto térmico de uma edificação para ar condicionado com painéis fotovoltaicos em climas australianos. O trabalho propõe a busca do conforto térmico da edificação através de um pequeno sistema autônomo de painéis fotovoltaicos e baterias, avaliando alguns parâmetros térmicos dessa edificação. Criando modelos matemáticos para simulação, o autor valida o modelo da edificação através do TRNSYS, obtendo valores de temperatura e umidade relativa para o modelo matemático próximos dos valores fornecidos pelo programa. Foi concluído que foi possível obter 100% de conforto usando um sistema autônomo de ar condicionado, com um sistema fotovoltaico relativamente pequeno.

Huang et al., (2016) avaliam experimentalmente seis sistemas de ar condicionado utilizando energia solar com diferentes tamanhos de equipamentos e painéis fotovoltaicos. Foi construída uma sala de reunião para doze pessoas, e nela foram instalados os diferentes sistemas, utilizando três tipos de ar condicionado diferentes entre si, usando cinco tamanhos diferentes de painel fotovoltaico, variando a máxima potência gerada entre 430 e 1380 W pico, e quatro tamanhos de banco de baterias, entre 202 e 576 Wh. A probabilidade de operação é maior que 98% para uma irradiação maior que 600 W/m<sup>2</sup> no sistema em que a energia produzida pelos painéis é quase duas vezes a demanda de energia do ar condicionado. Em dias nublados a irradiação atinge cerca de 200 W/m<sup>2</sup>, o que representa três vezes a energia consumida pelo ar condicionado. Com isso a probabilidade de operação fica em 80%.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Energia solar

As principais características de um módulo fotovoltaico são a corrente de curto-circuito, a tensão de circuito aberto, a potência de pico ou máxima potência, a tensão de máxima potência, a corrente de máxima potência e a eficiência do módulo. A corrente de curto-circuito, ISC, é a corrente fornecida pelos terminais em curto-circuito. A tensão de circuito aberto, VOC, é a tensão que o painel fornece quando seus terminais se encontram abertos. A potência produzida nas condições STC é a potência de pico, PMP, em W. A tensão de máxima potência é a tensão nos terminais da placa quando esta fornece máxima potência, sendo análogo para a corrente de máxima potência.

Dois métodos são utilizados para avaliar as características de um módulo fotovoltaico, o STC e o NOCT. O STC usa condições padronizadas para o teste do módulo, com valores de 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância e temperatura do ar 25 °C. O NOTC usa outro conjunto de condições para o teste com 800 W/m<sup>2</sup> de irradiância, temperatura do ar 20 °C, temperatura da célula de 45 °C. Para ambos os métodos a massa de ar é de 1,5.

#### 3.2 Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico Autônomo

Foram considerados para os cálculos, baterias com 240 Ah, por ser a mais usual no mercado, e o módulo fotovoltaico produzido pela CanadianSolar, modelo CS6U-315P, cujos dados estão na Tab. 1. Para os módulos, foram usados os valores em STC. A metodologia para dimensionamento do sistema fotovoltaico foi seguida segundo Villalva, 2012.

Tabela 1. Dados do módulo CS6U-315P. Fonte: CanadianSolar Website. Adaptado.

CS6U-315P	STC	NOTC
Máxima Potência nominal ( $P_{MÁX}$ )	315 W	228 W
Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ )	9,18 A	7,44 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ )	45,1 V	41,5 V
Corrente de máxima potência ( $I_{MP}$ )	8,61 A	6,84 A
Tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ )	36,6 V	33,4 V
Eficiência do módulo	16,20 %	16,20 %

#### 3.3 Avaliação da edificação

A edificação modelada no *software* SketchUp 2015, é apresentada na Fig. 1. Ela consiste em um cômodo, gerando uma zona térmica. A janela sem sombreamento externo e interno fica no lado norte da edificação, possuindo 2,5 m<sup>2</sup> de área, 3 mm de espessura de vidro normal e esquadria de madeira. Demais informações sobre a edificação são fornecidas na Tab. 2. Dentro da casa foram consideradas três pessoas realizando tarefas de pouca exigência, equipamentos somando no total 500 W de potência, além da iluminação.

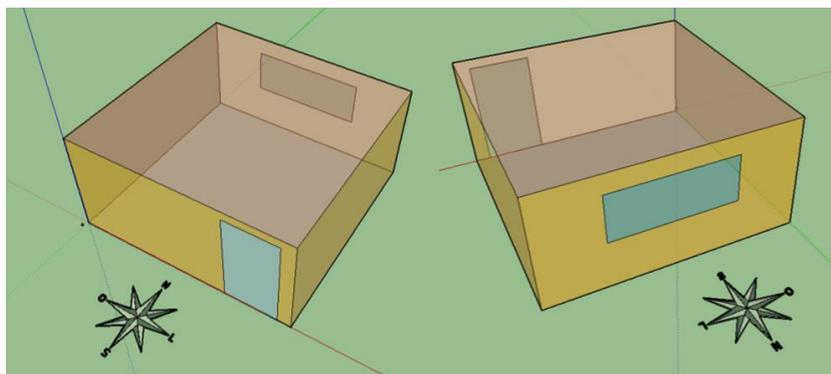


Figura 1. Edificação para simulação modelada no programa SheckUp.

Tabela 2. Dados de materiais para a edificação padrão.

	Material (espessura)	Absortância (cor média)	Dimensões	Janelas
Parede	Tijolo (200 mm)	0,75	5 x 2,5 m	1
Laje	Concreto Leve (150 mm)	0,83	5 x 5 m	-

### 3.4 TRNSYS

O TRNSYS é um *software* com ambiente gráfico flexível usado para simular sistemas transientes. Ele está dividido em duas partes: a primeira é o *solver* que lê e processa as entradas, resolve os sistemas iterativamente, determina a convergência e gera gráficos com variáveis do sistema. A segunda é a extensa biblioteca de componentes, chamados de *type*, os quais são os componentes do sistema a ser simulado.

#### Modelo no TRNSYS

Os principais componentes do sistema simulado foram a edificação (type 56), dados climáticos (type 15-3), módulos fotovoltaicos (type 94a), baterias (type 47b) e controlador das baterias (type 48b).

Os dados climáticos utilizados fornecem valores para temperatura, umidade relativa, características de vento, ângulo de azimute, ângulo zenite, irradiância total.

O conjunto de painéis fotovoltaicos é simulado como um módulo de células de silício policristalino. Os dados deste componente foram alterados para simular um módulo fotovoltaico da *CanadianSolar*, modelo CS6U-315P, com dados apresentados na Tab. 1. O TRNSYS posiciona virtualmente os painéis de acordo com o ângulo de incidência da irradiância.

O regulador das baterias, tem dupla função, a primeira é regular a carga em corrente contínua que vem do módulo fotovoltaico para as baterias ou que sai das baterias para o ar condicionado. Assim, se as baterias estiverem totalmente carregadas, o regulador rejeita a energia elétrica excedente. A segunda função é a de inversor de frequência que transforma a corrente de contínua em alternada. O controle é feito pelo método MPPT, ajusta a corrente e potencial elétrico para o ponto de máxima potência dos painéis, garantindo maior eficiência.

O comportamento térmico da edificação, modelado pelo type 56, permite definir as características da construção como as orientações geográficas das paredes, materiais construtivos, os tipos de processos térmicos que a casa terá e rotinas para controle das variáveis.

O modelo gerado no TRNSYS é apresentado na Fig. 2. A carga demandada pelo sistema de ar condicionado ao regulador passa pela função Carga Sensível. Essa função recebe o valor da potência instantânea do ar condicionado e divide pelo coeficiente de desempenho (COP) do mesmo, estipulado em 3.

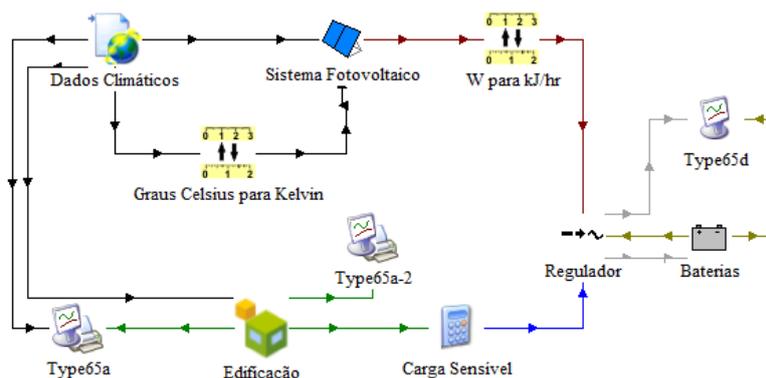


Figura 2. Sistema autônomo de ar condicionado com energia solar simulado no TRNSYS.

Os mesmos materiais, propriedades e valores considerados no cálculo analítico da carga de resfriamento foram inseridos no componente, para garantir a validação do modelo. O ar condicionado do sistema foi determinado, dentro do TRNBuild, com carga máxima de 12661,2 kJ/h, equivalente a 3517 W. A infiltração natural foi determinada como duas trocas de ar por hora.

O uso do ar condicionado foi programado para funcionar com temperatura de conforto térmico de 25 °C, entre as 18:00 e as 08:00 horas do dia seguinte, nos dias de semana. Nos sábados, o funcionamento considerado é das 10:00 às 22:00 horas do mesmo dia e, no domingo, das 22:00 às 08:00 horas do dia seguinte. Para determinar a potência do aparelho de ar condicionado, deve-se primeiro determinar a carga térmica da edificação. Com a potência do aparelho, as informações para o dimensionamento do sistema de painéis fotovoltaicos e bateria são obtidas. Os dados da potência e quantidade de painéis e baterias serão utilizados no modelo gerado no TRNSYS.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de carga de resfriamento de ar condicionado para dez cidades brasileiras são apresentados na Tab. 2, necessários para dimensionar o sistema fotovoltaico autônomo.

Tabela 3. Carga de resfriamento de ar condicionado para as cidades escolhidas.

Cidade	Carga Térmica de Resfriamento	
	W	BTU/h
Aracaju	3858,70	13165,88
Campo Grande	3979,34	13577,51
Curitiba	3175,11	10833,46
Fortaleza	3689,45	12588,39
Goiânia	3605,70	12302,65
Manaus	3931,77	13415,20
Porto Alegre	3809,27	12997,22
Rio de Janeiro	4279,74	14602,48
Salvador	3773,57	12875,40
São Paulo	3486,48	11895,86

Em sua maioria, as cidades apresentam uma carga térmica média de resfriamento de 3758,91 W para a edificação padrão descrita. Discrepâncias foram encontradas nos resultados correspondentes às cidades de Campo Grande e Rio de Janeiro, onde as cargas foram superiores às demais, e Curitiba por apresentar menor carga, devido a sua característica climática.

O valor médio da carga térmica de resfriamento foi utilizado para o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Para proceder com os cálculos do sistema, foi considerado que ele funcionaria por três horas na máxima demanda de energia, tempo com o qual o sistema ficou dimensionado com dois conjuntos de baterias ligados em série, sendo cada conjunto composto de três baterias ligadas em paralelo, totalizando seis baterias no sistema, cada uma com capacidade de 240 Ah, fornecendo uma capacidade de 1440 Ah para o sistema. O sistema resultante é composto por quatro painéis fotovoltaicos, dois conjunto de painéis ligados em série e, cada conjunto contendo dois painéis em paralelo, gerando um total de 3571,2 Wh. Como foi determinado o sistema fotovoltaico. Mencionar na metodologia.

Para avaliar o sistema autônomo de ar condicionado com sistema fotovoltaico, foram obtidos dados climáticos para as cidades, utilizados na simulação do TRNSYS. A Fig. 3 demonstra uma rodada de 8760 horas, que representa um ano para a cidade de Porto Alegre.

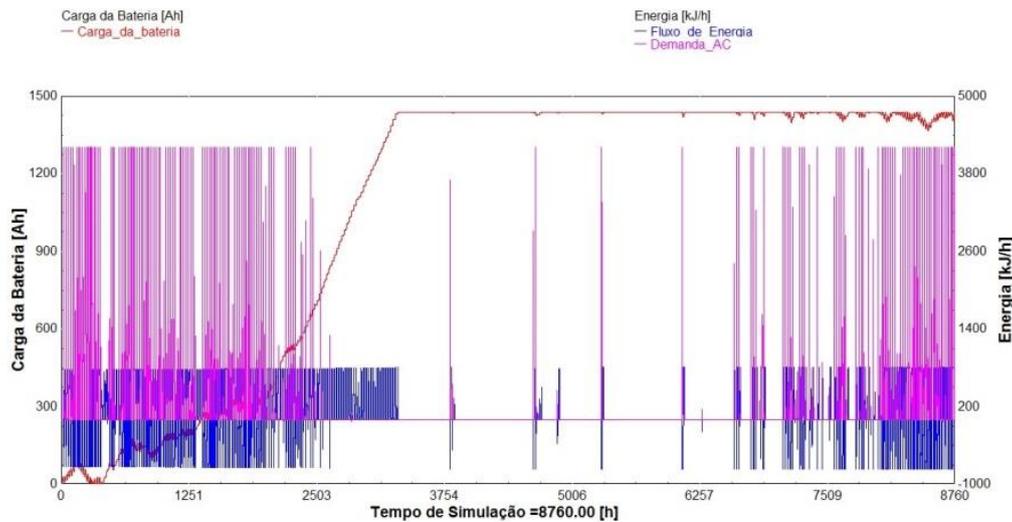


Figura 3. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias ao longo de um ano para a cidade de Porto Alegre.

Na figura 3 são monitorados três parâmetros do sistema da simulação. A quantidade de carga da bateria, em Amperes-hora (Ah), tem seus valores mostrados pelo eixo vertical esquerdo do gráfico. Tanto a potência chegando ou saindo da bateria, em azul, proveniente dos painéis, quanto à carga térmica de resfriamento da edificação, em rosa, ambos em kJ/h, têm seus valores observados no eixo vertical direito do gráfico.

Ao se analisar a fig. 3, observa-se que nos primeiros meses do ano que o carregamento das baterias não ocorre devido à demanda de energia elétrica do sistema de ar-condicionado. Entretanto, ao longo do verão a mediada que o sistema de ar-condicionado exibe um menor consumo as baterias são carregadas completamente. O inverno é o período em que o carregamento completo das baterias acontece, pois a carga térmica da edificação é baixa, e assim a bateria terá carga completa para o próximo verão.

Para demonstração, o controlador teve seu controle de carga da bateria desativado, mas para as demais simulações o controle foi feito em 75% de carga. Se a carga da bateria baixar desse valor, o controlador desativa a carga e passa a carregar a bateria.

Para simplificar a análise, serão destacados dois períodos críticos: o solstício de verão e o solstício de inverno, sendo considerados três dias antes e três depois de cada solstício. O intervalo que envolve o solstício de inverno fica compreendido entre 4032 e 4200 horas do tempo de simulação e representa o período de menor insolação no ano. Para o solstício de verão, o intervalo fica entre 8424 e 8592 horas, correspondendo à maior insolação do ano.

As cidades de Porto Alegre, São Paulo e Curitiba possuem clima subtropical, caracterizado por grandes variações anuais de temperatura. Por terem uma temperatura média mais baixa, característica deste clima, a carga térmica da edificação deve demandar menos energia para manter a temperatura de conforto.

A cidade de Porto Alegre, com latitude 30° S, apresentou as simulações ilustradas na Figura 4 e na Figura 5. Analisando-se a Fig. 4, se nota que as baterias possuem carga máxima de 1440 Ah ao longo de toda semana, visto que a carga térmica de resfriamento da casa não necessita que o aparelho de ar condicionado fique ligado. Isso porque a temperatura nessa região geralmente está abaixo de 25 °C. Sendo assim, a energia produzida pelos painéis não carrega as baterias, sendo que esse excesso não é utilizado pelo sistema. O comportamento apresentado corresponde ao esperado, pois a baixa carga térmica da edificação, devido ao inverno, acaba não gerando consumo de carga através do ar condicionado.

O comportamento do sistema difere na Fig. 5. É perceptível um aumento da carga térmica de resfriamento, fazendo o nível de carga das baterias diminuir devido ao uso do ar condicionado. Ao longo do dia, as baterias são carregadas, recuperando a totalidade da carga sempre que a insolação for suficiente, o que gera a flutuação observada na simulação.

Analizando esses casos críticos, é possível que para a cidade de Porto Alegre, o sistema autônomo de ar condicionado com painéis fotovoltaicos seja viável, pois as baterias permanecem com grande carga nos períodos críticos.

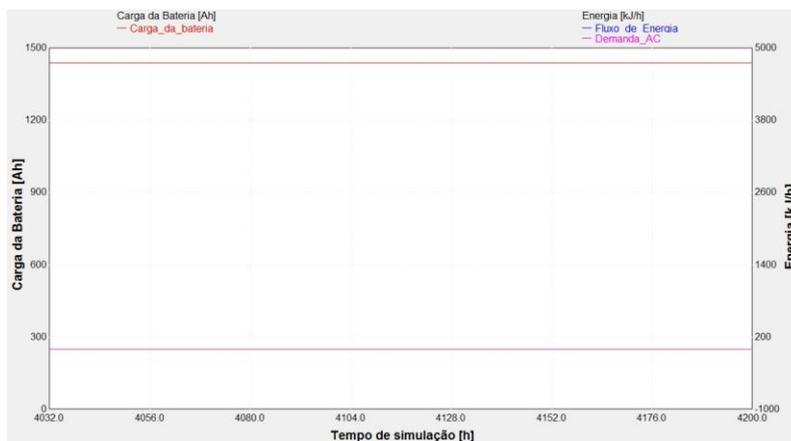


Figura 4. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de inverno para as cidades de Porto Alegre, Curitiba e São Paulo.

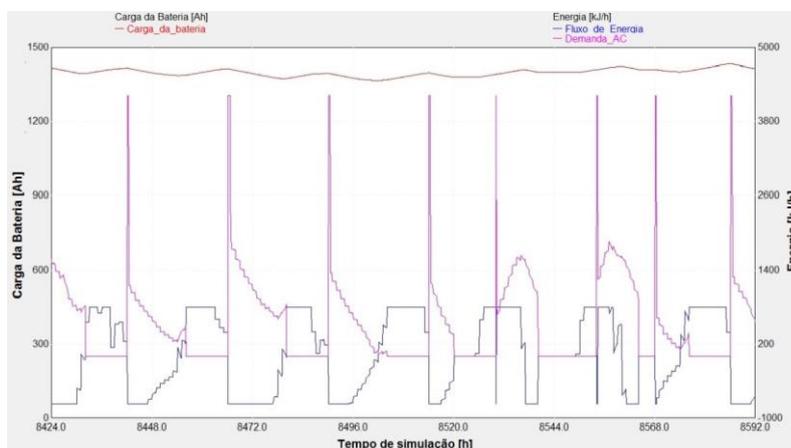


Figura 5. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para a cidade de Porto Alegre.

O resultado para a cidade de Curitiba, com latitude de 25° S, apresentou mesmo comportamento que o de Porto Alegre no solstício de inverno. No entanto, conforme a Fig. 6, o comportamento do sistema para o solstício de verão teve uma demanda diferente do caso da cidade de Porto Alegre. Por não ter uma carga térmica de resfriamento elevada nessa época, o ar condicionado não possui grandes demandas, o que não causa grandes descargas das baterias. Deste modo, o sistema autônomo também atende essa cidade de modo a não ter grandes demandas de energia.

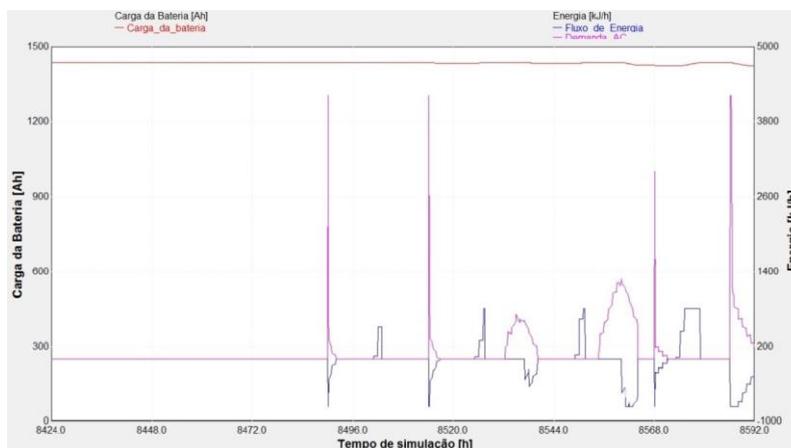


Fig. 6. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para a cidade de Curitiba.

Para a cidade de São Paulo, de latitude 23° S, a simulação para o solstício de inverno apresentou comportamento semelhante ao das cidades previamente citadas. A Fig. 7 apresenta a simulação para o solstício de verão considerando a edificação padrão na cidade de São Paulo.

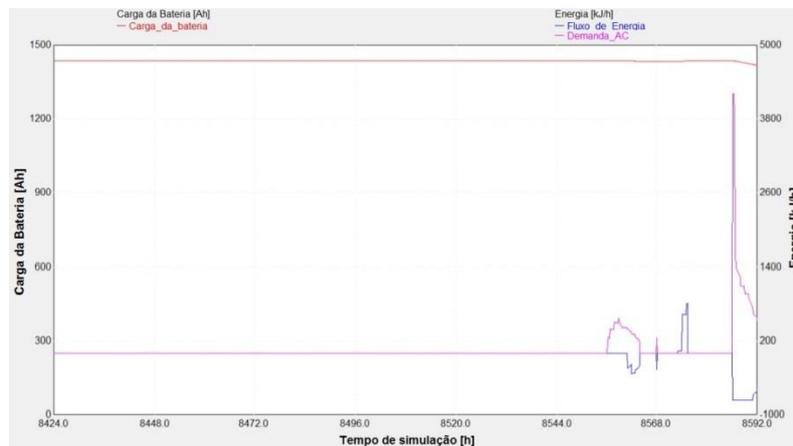


Figura 7. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para cidade de São Paulo.

Apesar de o comportamento ser muito semelhante ao do solstício de inverno, a edificação apresenta baixa demanda do ar condicionado devido a sua carga térmica, além de outros picos menores. Quando comparada com as outras cidades, todas demonstram viabilidade do sistema por conta do clima que elas apresentam serem parecidos.

O Rio de Janeiro é uma cidade de clima tropical, com temperatura média anual mais elevada que a temperatura do clima subtropical. Por ser um clima mais quente, o uso de ar condicionado deve ser maior nessa cidade. Nas próximas figuras temos as simulações para a cidade do Rio de Janeiro, de latitude 22° S.

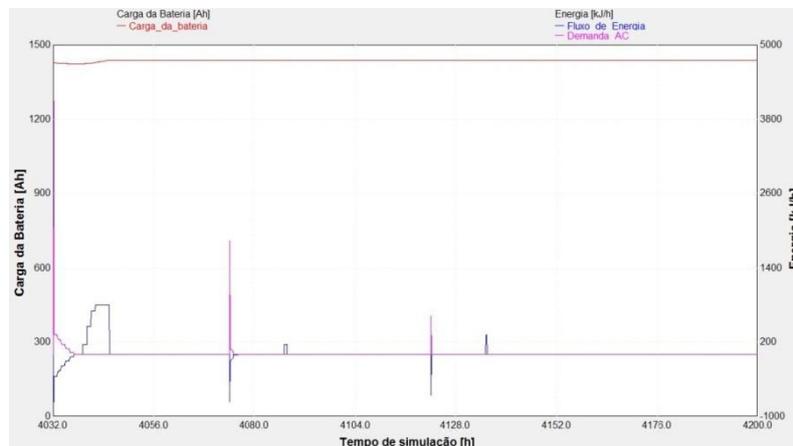


Figura 8. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de inverno para a cidade do Rio de Janeiro.

O solstício de inverno para essa cidade apresenta diferença quando comparado com as cidades anteriores. Na Fig. 8 são notadas pequenas zonas de demanda de carga para o ar condicionado, que é baixa quando comparada à demanda de carga no verão, Fig. 9. Não obstante, a carga das baterias continua elevada, o que faz o sistema autônomo de ar condicionado viável também nessa cidade.

As cidades de Manaus e Fortaleza, ambas de latitude 3° S, Aracaju, latitude 10° S e Salvador, latitude de 12° S, também possuem clima tropical, mas estão mais próximas ao eixo de Equador. Assim, possuem temperatura mais elevada e baixa amplitude térmica, elevando a carga térmica da casa e, conseqüentemente, a energia despendida para o ar condicionado.

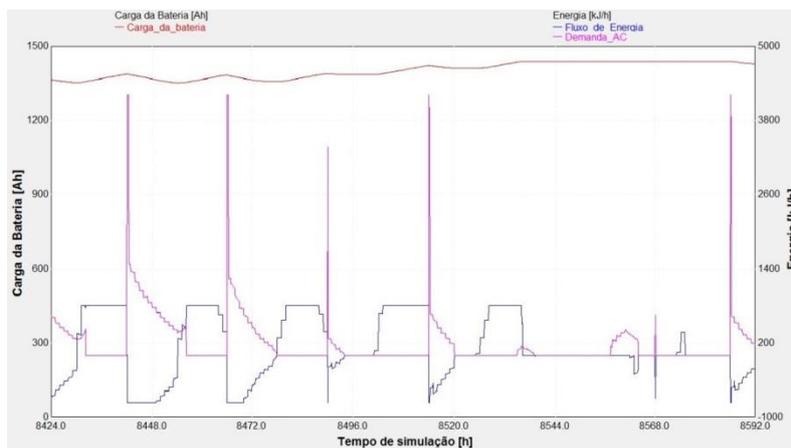


Figura 9. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para a cidade do Rio de Janeiro.

Essas cidades apresentaram simulações de grande semelhança. É possível aproximar as simulações dos distintos solstícios. As demandas do aparelho de ar condicionado são visíveis nessa simulação, conforme Fig. 10. Seus valores são constantes e altos ao longo dos dias, consumindo muita energia das baterias. O alto consumo não permite o carregamento pleno das baterias, deixando-as com o mínimo de carga possível, que é 75%, determinado pelo controlador.

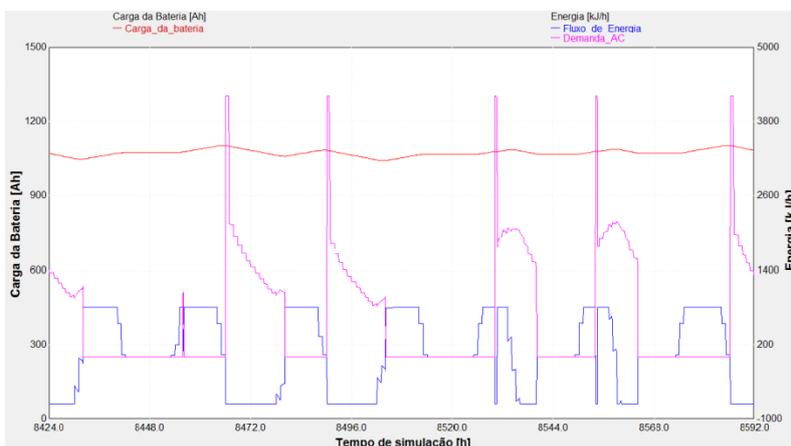


Figura 10. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para as cidades de Manaus, Fortaleza, Aracaju e Salvador.

O ar condicionado não é desligado, cumprindo a função de refrigeração, mas não há excedente de energia para armazenamento, sugerindo uma necessidade de adequação do sistema, como um maior número de módulos fotovoltaicos. As Fig. 11 e 12 apresentam as simulações para Campo Grande e Goiânia.

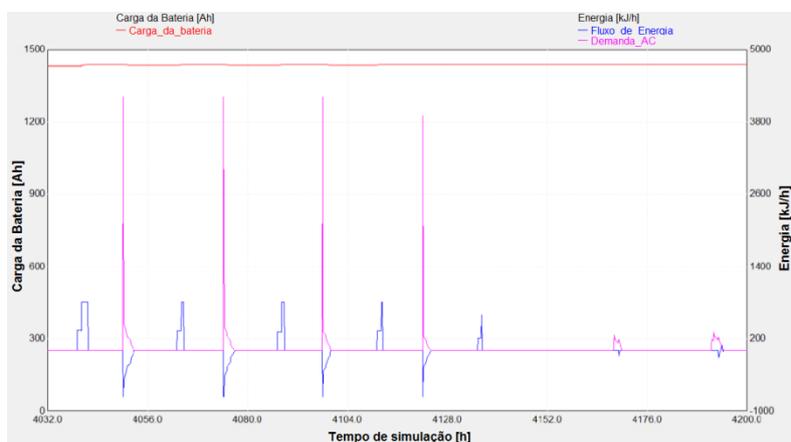


Figura 11. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de inverno para as cidades de Goiânia e Campo Grande.

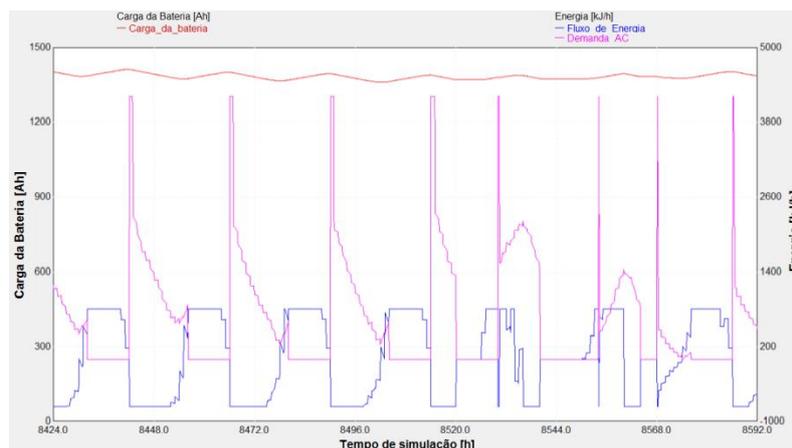


Figura 12. Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para as cidades de Goiânia e Campo Grande.

Por estarem em uma latitude próxima à do Rio de Janeiro, é semelhante o comportamento do clima tropical das cidades de Campo Grande, latitude 20° S, e Goiânia, latitude 16° S, caracterizado por uma temperatura menos elevada e maior amplitude térmica quando comparado com o clima das cidades de Manaus, Fortaleza, Aracaju e Salvador.

Pela Fig. 11, é possível ver que a carga das baterias é alta, devido a pouca exigência da edificação. O mesmo vale para a Fig. 12, onde a carga térmica é maior, mas o sistema de baterias consegue suprir a demanda de energia do ar condicionado, e carregar as baterias durante o dia. O sistema teve comportamento semelhante ao da cidade do Rio de Janeiro, sendo viável para essas cidades também.

As cidades com clima subtropical demonstraram um comportamento de baixa demanda de energia, pois a carga térmica de resfriamento foi menor comparado com os outros climas. O comportamento do sistema fotovoltaico foi adequado, fornecendo energia para o ar condicionado sempre que necessário.

Para as cidades com climas tropicais afastadas do eixo do Equador, a temperatura é mais elevada quando comparada ao clima subtropical. Com isso, a carga térmica de resfriamento também aumentou, sendo menor no inverno, motivando o uso de ar condicionado nos dois solstícios. Contudo, o sistema fotovoltaico forneceu energia suficiente para carregar plenamente as baterias e para o funcionamento do ar condicionado.

As cidades com climas tropicais próximas ao eixo do Equador possuem menor amplitude térmica e temperatura mais elevada. A carga de resfriamento foi a mesma em ambos os solstícios. Isto demandou muita energia do sistema, não carregando completamente o conjunto de baterias, mas o ar condicionado manteve a temperatura de conforto dentro da edificação.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho busca analisar o uso de energia solar em ar condicionado para diferentes climas brasileiros.

Para o clima de Porto Alegre foi visto que o sistema recarrega mais no inverno devido à baixa demanda de resfriamento da casa, armazenando uma boa quantidade de carga das baterias para o verão, quando ocorre um consumo maior. Mesmo no verão o carregamento das baterias continua acontecendo, em conjunto com o uso do sistema.

O mesmo comportamento aconteceu para o clima de Curitiba. A diferença dos climas ocasionou uma demanda menor do sistema durante o verão, exigindo menos carga das baterias. O clima de São Paulo apresentou comportamento semelhante aos anteriores nos solstícios de inverno e de verão.

Para o clima do Rio de Janeiro, o sistema teve maior demanda considerando o solstício de verão. Para o solstício de inverno, apresentou pequena demanda na carga térmica em alguns pontos. Mas o sistema fotovoltaico suportou toda a demanda da edificação.

Observou-se que para as cidades próximas ao eixo do equador os comportamentos para ambos os solstícios foram semelhantes. As cidades de Manaus, Fortaleza, Aracaju e Salvador apresentam elevada carga térmica na simulação, não havendo excedente de energia para carregar as baterias. Um melhor dimensionamento para o sistema autônomo de ar condicionado deve ser realizado, aumentando o número de painéis.

As cidades de Campo Grande e Goiânia também apresentaram comportamento semelhante entre si, e ao do Rio de Janeiro. A carga das baterias é suficiente para a energia exigida no verão, período de maior demanda energética, enquanto é beneficiada de carregamento maior no inverno.

Depois de realizadas as análises, se pode concluir que a energia solar é capaz de aportar a energia despendida de um sistema de ar condicionado, tornando o sistema autônomo. Sugere-se que seja realizado o correto dimensionamento do sistema fotovoltaico com baterias, para garantir a disponibilidade de energia de que o sistema necessita.

## 6. REFERÊNCIAS

Arent, D.J., R.S.J. Tol, E. Faust, J.P. Hella, S. Kumar; K.M. Strzepek, F.L. Tóth, and D. Yan. 2014. *Key economic sectors and services*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 659-708.

ASHRAE. 2001. *ASHRAE Handbook – Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.

ASHRAE. 2013. *ASHRAE Handbook – Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.

Braga, R. P. 2008. *Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações*. Dissertação (Graduação) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

EPE. 2017. *Balanco Energético Nacional 2017: ano base 2016*. Rio de Janeiro.

Goldworthy, M. J. 2017. *Building thermal design for solar photovoltaic air-conditioning in Australian climates*. Energy and Buildings: 176-186.

Huang B. J., Hou T. F., Hsu P. C., Lin T. H., Chen Y. T., Chen C. W., Li K., Lee K. Y. 2016. *Design of direct solar PV driven air conditioner*. Renewable Energy: 95-101.

Li Y., Zhang G., Lv, G. Z., Zhang, A. N., Wang, R. Z. 2015. *Performance study of a solar photovoltaic air conditioner in the hot summer and cold winter zone*. Solar Energy: 167-179.

Sampaio, P. G V., González, M. O. A. 2017. *Photovoltaic solar energy: Conceptual framework*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 76: 590-601.

TRNSYS. 2014. *TRNSYS 17 Documentation*.

Villalva, M. G., Gazoli, J. R. 2012. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. Editora Érica, 1ª edição.

## USAGE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY IN AIR CONDITIONING ANALYSIS FOR BRAZILIAN CLIMATES

**Abstract.** *The present work studies the behavior of an autonomous air conditioning system that uses solar energy. The usage of air conditioning in residences will have a considerable increase, due the climate changes which will raise the temperature of many places in the planet. The use of renewable energy, like the solar energy, shows a great ally to reduce the consumption of electrical energy, gaining more and more space in the global market, avoiding the necessity to resort so often from non-renewable energy. With the intention to evaluate the autonomy of this system, simulations were performed with TRNSYS software, for a standard building, in ten Brazilian cities. For this evaluation, the cooling load was estimated for some chosen cities to size the power of the photovoltaic system. The data from the sizing were used in the autonomous system inserted in TRNSYS, and simulations were carried out corresponding to the periods of the year with the highest irradiance and the lowest irradiance: in the summer solstice and in the winter solstice, respectively. Cities with colder climates presented lower cooling load, having less use of air conditioning and fully charging the batteries. Cities close to the Ecuador axis didn't fully charge the batteries of the system, but the air conditioner received enough energy for its operation. The proposed system provides the energy demanded from the cooling load, requiring some adjustments in the sizing in the photovoltaic system to adapt them to the climate of each city.*

**Keywords:** Solar Energy, Air Conditioning, Autonomous System, TRNSYS.