

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

por

Felipe Rodolfo Schmitt Gabbardo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2017.

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

por

Felipe Rodolfo Schmitt Gabbardo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Comissão de Avaliação:

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Pedro Barbosa Mello

Prof^a. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 19 de julho de 2017.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, João Batista Gabbardo (*in memoriam*) e Rose Marie Schmitt Gabbardo, pelo amor e apoio incondicional em todas as horas de alegrias e dificuldades.

A minha noiva Bruna Krindges Ribeiro, amor de minha vida e companheira em todas as situações, pela compreensão.

Ao professor e mestre Cirilo Seppi Bresolin, pela orientação e amizade.

Aos meus irmãos, Elisa Maria Schmitt Gabbardo, Daniel Roberto Becker e Thiago Rafael Becker.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica, que tiveram participação na minha formação acadêmica e profissional.

Aos amigos.

GABBARDO, F. R. S. **Análise do uso de energia solar fotovoltaica em sistema de ar condicionado para climas brasileiros**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Este trabalho estuda o comportamento de um sistema autônomo de ar condicionado que utiliza energia solar. O uso de ar condicionado em residências terá considerável aumento, devido às mudanças climáticas que elevarão a temperatura de diversos locais no planeta. O uso de energia renovável, como a energia solar, mostra-se um grande aliado para reduzir o consumo de energia elétrica, ganhando cada vez mais espaço no mercado mundial, evitando a necessidade de recorrer tão frequentemente a fontes não renováveis. Com intenção de avaliar a autonomia desse sistema, simulações foram realizadas no programa TRNSYS, para uma edificação padrão, em dez cidades brasileiras. Para tal, estimou-se a carga térmica para algumas cidades escolhidas a fim de dimensionar a potência do sistema fotovoltaico. Os dados do dimensionamento foram utilizados no sistema autônomo gerado no TRNSYS, e realizaram-se simulações correspondentes aos períodos do ano de maior irradiância e menor irradiância: no solstício de verão e no solstício de inverno, respectivamente. Cidades com climas mais frios apresentaram menor carga térmica de resfriamento, tendo menor uso de ar condicionado e carregando completamente as baterias. Cidades próximas ao eixo Equador não conseguiram carregar plenamente as baterias do sistema, mas o ar condicionado recebeu suficiente energia para seu funcionamento. O sistema proposto aporta a demanda de energia para a carga térmica de resfriamento, sendo necessários ajustes no dimensionamento do sistema fotovoltaico para adequá-los ao clima de cada cidade.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar, Ar condicionado, Sistema autônomo.

GABBARDO, F. R. S. **Usage of photovoltaic solar energy in air conditioning analysis for Brazilian Climates.** 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

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.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Zonas de conforto para verão e inverno. Fonte: Fundamentals, ASHRAE Handbook, 2013. Adaptado.....	2
Figura 4.2 – Edificação para simulação modelada no programa SheckUp.	6
Figura 4.3 – Sistema autônomo de ar condicionado com energia solar simulado no TRNSYS. .	8
Figura 5.1 – 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.	9
Figura 5.2 – 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.	10
Figura 5.3 – 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.	10
Figura 5.4 – 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 verão para a cidade de Curitiba.	11
Figura 5.5 – 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 cidade de São Paulo.	11
Figura 5.6 – 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 inverno para a cidade do Rio de Janeiro.	12
Figura 5.7 – 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 a cidade do Rio de Janeiro.	12
Figura 5.8 – 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 verão para as cidades de Manaus, Fortaleza, Aracaju e Salvador.	13
Figura 5.9 – 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 inverno para as cidades de Goiânia e Campo Grande.	13
Figura 5.10 – 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 Goiânia e Campo Grande.	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados do módulo CS6U-315P. Fonte: CanadianSolar Website. Adaptado.....	6
Tabela 5.1 – Carga de resfriamento de ar condicionado para as cidades escolhidas.	8

ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
ÍNDICE	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
4. METODOLOGIA.....	2
4.1 Condições de conforto	2
4.2 Carga de resfriamento de ar condicionado	3
4.3 Energia Solar.....	4
4.4 Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico Autônomo.....	5
4.5 Avaliação da edificação.....	6
4.6 TRNSYS.....	6
4.7 Modelo no TRNSYS.....	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	8
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15

1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores que irá aumentar a demanda de energia a nível mundial é a mudança climática gerada pelo aquecimento global. O uso mais intenso de ar condicionado devido à elevação da temperatura terá um papel primordial 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. 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, segundo 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, segundo o BEN, Balanço Energético Nacional 2017. Em períodos mais quentes ao longo do ano, uma quantidade considerável dessa eletricidade é usada em aparelhos de ar condicionados para a carga térmica de edificação.

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 analisar o comportamento autônomo de um ar condicionado, sendo a energia fornecida por um sistema fotovoltaico e o armazenamento da mesma feita em conjunto de baterias.

2. OBJETIVOS

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.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar e comparar cargas térmicas de resfriamento de diferentes cidades para uma edificação padrão. E, posteriormente, 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, sistema dito autônomo.

Desenvolver um sistema no programa TRNSYS para o conjunto com painel fotovoltaico, baterias e ar condicionado. Avaliar viabilidade do sistema para diferentes climas, e em diferentes cidades brasileiras. Realizando, finalmente, a comparação entre as cidades escolhidas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma pesquisa foi realizada visando encontrar artigos sobre estudos realizados em aparelhos de ar condicionado utilizando energia solar fotovoltaica, na qual foram encontrados os artigos apresentados a seguir.

Um estudo de desempenho de um ar condicionado com painel fotovoltaico solar no verão e no inverno foi realizado por Li *et al.*, 2015. 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, que afeta o perfil de demanda consideravelmente e que ligar a rede elétrica ao sistema de painéis fotovoltaicos e ar condicionado pode ser uma maneira de reduzir flutuações de carga da rede, assim como picos de demanda nessa rede.

Outro estudo feito por Goldworthy, 2017, avalia o design 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 sistema fotovoltaico relativamente pequeno.

No estudo realizado por Huang *et al.*, 2016, são avaliados 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/m² 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/m², o que representa três vezes a energia consumida pelo ar condicionado. Com isso a probabilidade de operação fica em 80%.

4. METODOLOGIA

4.1 Condições de conforto

Segundo a ASHRAE, 2013, as condições de conforto térmico devem respeitar os limites da Figura 4.1. A medida clo é uma unidade de resistência térmica de vestimentas, equivalendo uma unidade a 0,155 m² °C/W. Valores típicos são 1 clo para vestimentas no inverno e 0,5 clo para vestimentas no verão em ambientes internos, sendo criadas duas zonas de conforto.

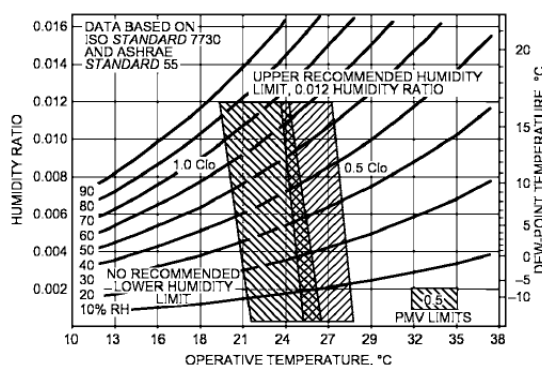


Figura 4.1 – Zonas de conforto para verão e inverno. Fonte: *Handbook Fundamentals, ASHRAE, 2013*. Adaptado.

A figura acima se trata de uma carta psicrométrica, na qual se substituiu a temperatura de bulbo seco pela temperatura operativa, que pode ser aproximada com a média ponderada entre a temperatura de bulbo seco e a temperatura média radiante do ambiente. A umidade relativa, também presente na figura, não possui recomendação mínima, mas não deve exceder 60%. A temperatura de conforto para o verão é de 25 °C, para o inverno 23 °C.

4.2 Carga de resfriamento de ar condicionado

O *Handbook Fundamentals*, ASHRAE, 2001, detalha bem o método de Diferença de Temperatura de Carga de Resfriamento (DTCR), para proceder com o cálculo de carga de resfriamento. Nesse método, devemos considerar dois grupos de fluxos de calor, sendo eles os calores externos e os calores internos. Os calores externos podem ultrapassar as barreiras do ambiente na forma de energia térmica sensível ou latente, podendo ser classificadas em quatro diferentes tipos descritos a seguir.

O primeiro tipo é relativo às superfícies opacas externas. Nelas são consideradas as coberturas, calculada pela equação abaixo

$$\dot{Q} = UA\Delta T = UA[(DTCR + LM)K_f + CTIE]f \quad (4.1)$$

onde \dot{Q} é o fluxo de calor em W, U é o coeficiente global de transferência de calor em $W/m^2\text{°C}$, A é a área do forro com insolação, em m^2 , e ΔT é a diferença de temperatura entre os lados do forro, em °C. Essa diferença é calculada através dos seguintes fatores: Diferencial de Temperatura da Carga de Resfriamento (DTCR), em °C; Latitude e Mês (LM), em °C; o fator K_f , dependente da cor das telhas; o fator f , de correção conforme a ventilação do forro; e a Correção para Temperaturas Internas e Externas (CTIE), em °C e dada pela equação

$$CTIE = (25,5 - T_{conforto}) + \left(\left(TBS_{m\acute{a}x} - \frac{VD}{2} \right) - 29,5 \right) \quad (4.2)$$

onde $T_{conforto}$ é a temperatura na qual se deseja manter o ambiente, em °C, $TBS_{m\acute{a}x}$ é a temperatura de projeto de verão, em °C, e VD é a variação diária da temperatura para a cidade considerada, em °C. Todos os fatores citados possuem valores fornecidos por tabelas.

O fluxo de calor, \dot{Q} , em W, para as paredes é fornecido pela seguinte equação

$$\dot{Q} = UA[(DTCR + LM)K_p + CTIE] \quad (4.3)$$

onde K_p é a correção da cor das paredes. Os demais termos da equação são os mesmos apresentados na Equação 4.1.

O segundo tipo de calor externo é relativo às superfícies translúcidas externas, no qual o fluxo de calor se divide em condução e radiação. A condução é ocasionada pelo fato de a temperatura externa ser maior que a interna, e é calculada por

$$\dot{Q}_c = UA \left((TBS_{m\acute{a}x} - PVD \cdot VD) - T_{conforto} \right) \quad (4.4)$$

onde PVD é o percentual da variação diária da temperatura externa, com valores tabelados, A é a área da janela, em m^2 , e U o coeficiente global de transferência de calor, em $W/m^2\text{°C}$, depende do vento da região em que se encontra a construção, das proteções externas e internas, da quantidade de vidros e do tipo de esquadria.

Já a parcela de radiação é calculada por

$$\dot{Q}_R = FGCS \cdot A \cdot CS \cdot FCR \quad (4.5)$$

onde FGCS é o fator de ganho de calor solar dado, em W/m^2 , A é a área da janela, em m^2 , CS é o coeficiente de sombra e FCR é o fator de carga de resfriamento.

O terceiro tipo de calor externo é o consequente do ar de renovação, que circula no ambiente. Ele apresenta um calor sensível calculado por

$$\dot{Q}_{ES} = 1,2\dot{V} \left((TBS_{m\acute{a}x} - PVD \cdot VD) - T_{conforto} \right) \quad (4.6)$$

onde \dot{V} é a vazão de ar exterior, em L/s, e que tem valor de 4,7 para ambientes populosos e 7,5 para ambientes normais. O ar de renovação também apresenta calor latente, que é dado pela seguinte equação

$$\dot{Q}_{EL} = 3\dot{V}(F_E - F_I) \quad (4.7)$$

onde F_E é o fator de umidade, ou umidade absoluta, em gw/kg, podendo ser encontrado na carta psicrométrica e F_I é o fator de umidade interno, encontrado na Figura 1.

O quarto tipo de calor externo é relativo às paredes internas, que serão desprezadas neste trabalho. Os calores internos são liberados dentro do ambiente, principalmente por pessoas, lâmpadas, equipamentos e o motor do ventilador interno do ar condicionado. O calor das pessoas depende da quantidade de pessoas e dos calores sensíveis e latentes da atividade que as pessoas estão realizando, que possuem valores determinados e tabelados. Tanto para as lâmpadas, quanto para os equipamentos, o calor vem da potência que estes dissipam. Na falta de dados sobre as lâmpadas, uma estimativa de $15 W/m^2$ de piso pode ser utilizada. Já o calor dissipado pelo motor do ventilador é calculado considerando-se uma vazão de $5,2 \times 10^{-6} m^3/s/W$, uma pressão de 400 Pa e uma eficiência de 50% aplicadas à pela Equação 4.8

$$\dot{Q}_{MV} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p \cdot \dot{Q}_{ST}}{\eta} \quad (4.8)$$

onde \dot{Q}_{MV} é o calor dissipado pelo motor do ventilador, em W, \dot{Q}_{ST} é a soma de todos os calores calculados anteriormente, \dot{V} é a vazão volumétrica, em m^3/s , Δp é a diferença de pressão gerada pelo ventilador, em Pa, e η é a eficiência do ventilador.

4.3 Energia Solar

A irradiância é uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar, Villalva, 2012. Segundo Duffie e Beckman, 2013, irradiância é a taxa na qual a energia radiante incide em uma superfície, por unidade de área. Essa grandeza é expressa em W/m^2 , sendo uma unidade de potência por área, e quanto maior a potência, maior é a energia transportada. A importância da irradiância reside na avaliação da eficiência de módulos fotovoltaicos, juntamente com a massa de ar, AM, que corresponde à espessura de ar atravessada pelos raios solares até o solo. Valores típicos para avaliação são $1000 W/m^2$ de irradiância e 1,5 AM.

Dois métodos são utilizados para avaliar as características de um módulo fotovoltaico, o STC e o NOCT. A sigla STC significa condições padronizadas de teste do módulo, com valores de $1000 W/m^2$ de irradiância, temperatura de $25^\circ C$. A temperatura normal de operação da célula, NOTC, apresenta irradiância de $800 W/m^2$ e temperatura de $20^\circ C$, sendo que a célula opera a $45^\circ C$. Para ambas condições a massa de ar AM é de 1.5.

Segundo Villalva, 2012, a insolação é a grandeza utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma determinada área de superfície plana ao longo de um determinado intervalo de tempo, tendo sua unidade em Wh/m^2 , que expressa a densidade de energia por área.

As principais características determinadas através da avaliação de módulos fotovoltaicos 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, I_{SC} , medida em A, é a corrente fornecida pelos terminais em curto-circuito. A tensão de circuito aberto, V_{OC} , medida em V, é a tensão que o painel fornece quando seus terminais se encontram abertos. A potência produzida nas condições STC é a potência de pico, P_{MP} , 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.

4.4 Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico Autônomo

As baterias são as primeiras a serem dimensionadas. É necessário calcular a energia consumida, E_c , em Wh, pela seguinte equação

$$E_c = P \cdot t \quad (4.9)$$

onde P é a potência, em W, e t é o tempo de uso, em h. Comumente se projeta o banco de baterias para ter energia durante um ou dois dias, assim a energia consumida deve ser multiplicada pela quantidade de dias.

Para se determinar quantas baterias devem ser ligadas em série, usa-se a fórmula

$$N_{BS} = \frac{V_{BANCO}}{V_{BAT}} \quad (4.10)$$

onde N_{BS} é o número de baterias ligadas em série, V_{BANCO} é a tensão do banco de baterias, em V, e V_{BAT} é a tensão da bateria utilizada, também em V. Para se determinar a capacidade que o banco de baterias terá, C_{BANCO} , em Ah, a equação utilizada é

$$C_{BANCO} = \frac{\frac{E_c}{P_D}}{V_{BANCO}} \quad (4.11)$$

onde P_D é a profundidade de descarga permitida para a bateria. Para finalizar o dimensionamento do banco de baterias, é necessário determinar o número de baterias ligadas em paralelo, N_{BP} , o que é feito através da equação que segue

$$N_{BP} = \frac{C_{BANCO}}{C_{BAT}} \quad (4.12)$$

onde C_{BAT} é a capacidade de cada bateria, em Ah.

A determinação da quantidade de módulos fotovoltaicos é feita a partir da quantidade de energia elétrica gerada por cada módulo, que é determinado pelo método da insolação, segundo Villalva (2012). Por este método, a energia gerada por módulo fotovoltaico diariamente, E_p , dada em Wh, é calculada da seguinte forma

$$E_p = E_S \cdot A_M \cdot \eta_M \quad (4.13)$$

onde E_S é a Insolação diária, em Wh/m²/dia, A_M é a área da superfície do módulo, em m², e η_M é a eficiência do módulo.

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 Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – 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 %

4.5 Avaliação da edificação

A edificação foi modelada no *software* SketchUp 2015, conforme Figura 4.3. Para simplificar, o modelo consiste em um cômodo, gerando uma zona térmica. Esse programa possui um *plug-in* que permite importação pelo TRNSYS.

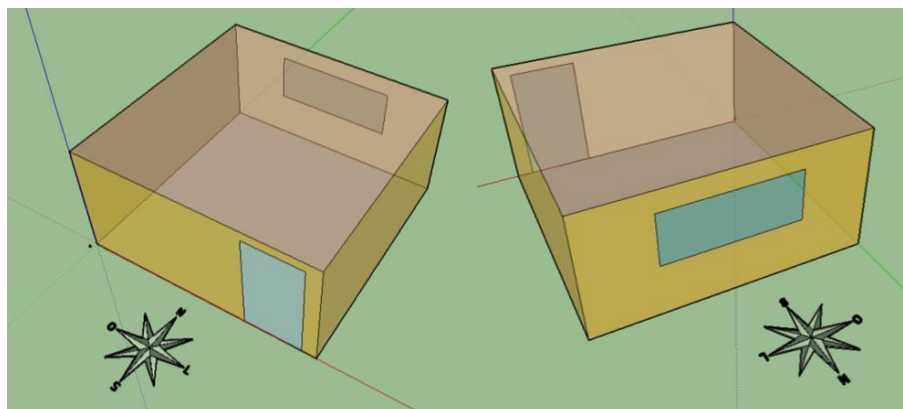


Figura 4.2 – Edificação para simulação modelada no programa SheckUp.

A janela sem sombreamento externo e interno fica no lado norte da edificação, possuindo $2,5 \text{ m}^2$ de área, 3 mm de espessura de vidro normal e esquadria de madeira. Com dimensões de comprimento, largura e altura de 5 m, 5 m e 2,5 m respectivamente. A casa possui paredes de tijolos com 200 mm de espessura e laje de concreto leve de 150 mm sem rebaixamento. Com uma cor média, a parede possui absorvância de 0,75 e a laje apresenta absorvância de 0,83.

Dentro da casa foram consideradas três pessoas realizando tarefas de pouca exigência, equipamentos somando no total 500 W de potência, além da iluminação.

4.6 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, os quais cada um desenvolve uma parte do sistema. Muitos desses componentes fazem parte de sistemas térmicos, que permitem ao usuário realizar as ligações entre esses componentes, assim como escolher quais componentes formam o sistema. Dentro do *software* existem componentes que compõem o sistema, denominado “type”. Cada “type” possui um conjunto de equações matemáticas que descrevem o funcionamento do componente que ele representa.

4.7 Modelo no TRNSYS

Para gerar o modelo foram necessários os componentes de dados climáticos, dos módulos fotovoltaicos, do controlador, das baterias e da edificação, sendo os demais componentes rotinas de cálculos servindo funções específicas.

Para os dados climáticos, o “type” 15-3 foi utilizado. Esse componente serve para ler dados de um arquivo externo e fornecer esses dados para os outros componentes do sistema. Os dados fornecidos ao sistema são arquivos do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, que fornece dados como temperatura, umidade relativa, características de vento, ângulo de azimute, ângulo zenite, irradiância total, entre outros vários parâmetros. Suas referências matemáticas se encontram no item 4.13.1 do Volume 4, na documentação do TRNSYS 17.

O conjunto de painéis fotovoltaicos é simulado através do “type” 94a, um componente cuja finalidade é assemelhar 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 Tabela 4.1. Com dados externos fornecidos a este componente, o TRNSYS posiciona virtualmente os painéis de acordo com o ângulo de incidência da irradiância. No item 4.2.5 do Volume 4 da documentação do TRNSYS 17, são apresentados os fundamentos matemáticos desse componente.

O “type” 48b simula o regulador, que 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. O inversor que transforma a corrente de contínua em alternada é a segunda função do componente. Esse componente, ao regular a carga, também faz o controle do ponto de máxima potência dos painéis, garantindo maior eficiência destes. Na documentação do TRNSYS, se encontra a fundamentação desse componente no item 4.2.2 do quarto volume.

O conjunto de baterias do sistema é modelado pelo “type” 47b, um componente que simula baterias estacionárias de ácido, e que especifica como o estado de carga da mesma varia com o tempo. A fundamentação matemática é encontrada no item 4.2.1 do quarto volume da documentação do TRNSYS 17.

A edificação representada é concebida pelo “type” 56. Esse componente modela o comportamento térmico de uma edificação através de suas zonas térmicas. No entanto, a modelagem passa pelo programa TRNBuild, um subprograma do TRNSYS. Nesse subprograma é necessário definir a orientação do hemisfério no qual a edificação vai ser simulada, nesse caso hemisfério sul, se determinando as orientações geográficas das paredes. Dentro desse subprograma são definidos ainda o material das paredes, os tipos de processos térmicos que a casa terá e rotinas para controle das variáveis.

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.

O modelo gerado no TRNSYS é apresentado na Figura 4.3. A carga demandada pelo 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.

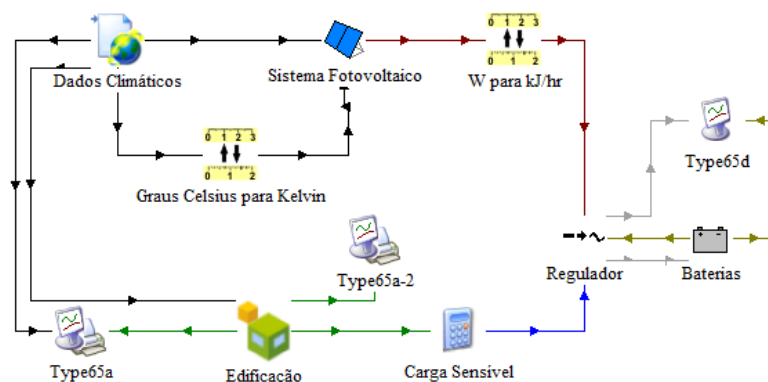


Figura 4.3 – Sistema autônomo de ar condicionado com energia solar simulado no TRNSYS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de carga de resfriamento de ar condicionado para dez cidades brasileiras são apresentados na Tabela 5.1, necessários para dimensionar o sistema fotovoltaico autônomo.

Tabela 5.1 – Carga de resfriamento de ar condicionado para as cidades escolhidas.

Cidade	Carga Térmica de Resfriamento	
	W	BTU
Aracaju	3739,71	12759,90
Campo Grande	4044,92	13801,25
Curitiba	3266,32	11144,68
Fortaleza	3631,57	12390,92
Goiânia	3743,71	12773,52
Manaus	3856,69	13159,02
Porto Alegre	3786,73	12920,31
Rio de Janeiro	4253,09	14511,56
Salvador	3655,73	12473,34
São Paulo	3547,36	12103,58

Em sua maioria, as cidades apresentam uma carga térmica média de resfriamento de 3751,5 W para a edificação padrão demonstrada. 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 questões climáticas.

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 baterias ligadas 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 a finalidade do trabalho é avaliar o sistema autônomo de ar condicionado com sistema fotovoltaico, foram obtidos dados climáticos para as cidades, utilizados na simulação do TRNSYS. A Figura 5.1 demonstra uma rodada de 8760 horas, que representa um ano.

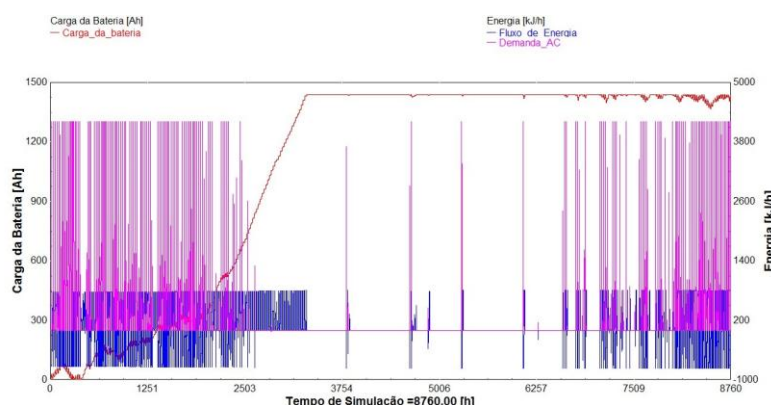


Figura 5.1 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias ao longo de um ano para a cidade de Porto Alegre.

Na figura são monitorados três parâmetros do sistema da simulação. A quantidade de carga da bateria, em vermelho, em 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 a carga térmica de resfriamento da edificação, em rosa, ambos em kJ/h, tem seus valores observados no eixo vertical direito do gráfico.

Ao se analisar o gráfico, vemos que o carregamento das baterias, no início da simulação, não ocorre, devido à demanda energética exigida pelo sistema. Além disso, ao longo do verão, porém, o carregamento ocorre, mesmo que a baixa taxa. É o inverno, porém, o período em que o carregamento efetivo 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 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: um que engloba o solstício de verão e outro do 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 5.2 e na Figura 5.3. Analisando-se a Figura 5.2, 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 Figura 5.3. É perceptível um aumento da carga térmica de resfriamento, fazendo o nível de carga das baterias diminuir devido ao uso do ar condicionado, que funciona para manter a temperatura de conforto. 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.

Analisando 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.

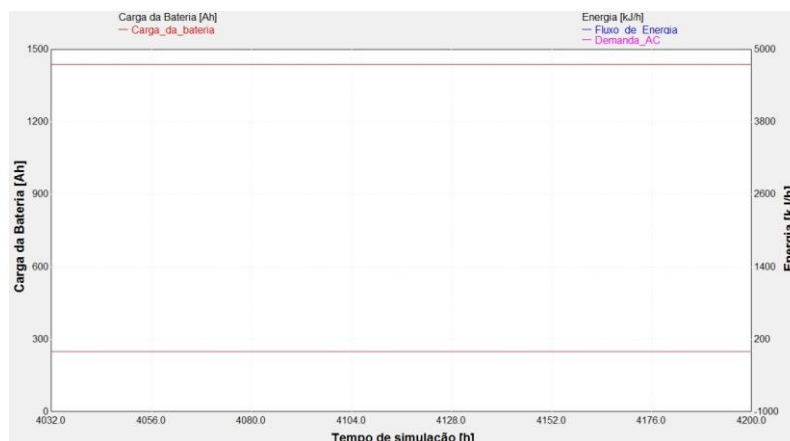


Figura 5.2 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de inverno para as cidades de Porto Alegre, Curitiba e São Paulo.

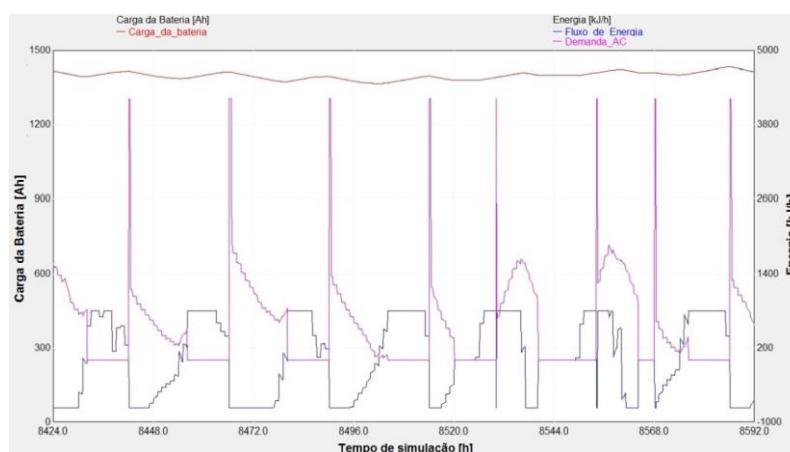


Figura 5.3 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para a cidade de Porto Alegre.

O resultado para a cidade de Curitiba, com latitude de 25° S, apresentou mesmo comportamento que o de Porto Alegre frente à simulação para o solstício de inverno, de onde se espera a mesma análise. No entanto, conforme a Figura 5.4, 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.

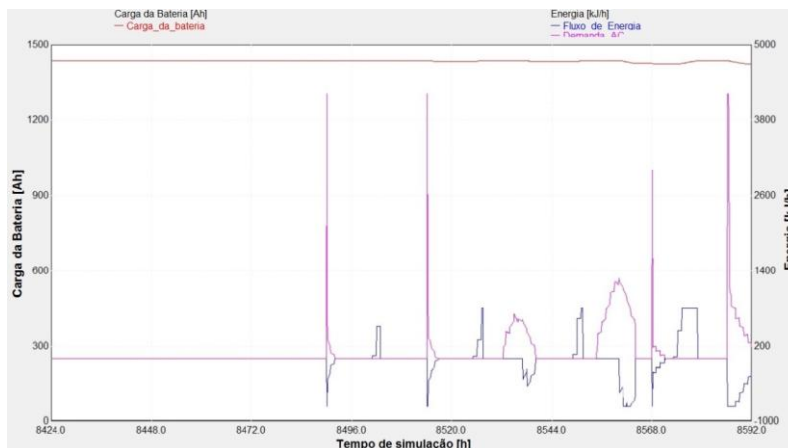


Figura 5.4 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para a cidade de Curitiba.

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 Figura 5.5 apresenta a simulação para o solstício de verão considerando a edificação padrão na cidade de São Paulo.

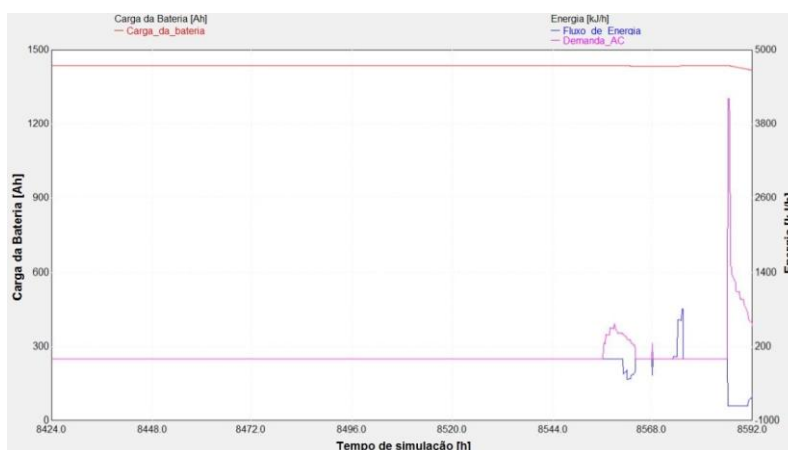


Figura 5.5 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para cidade de São Paulo.

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 da mesma, além de outros picos menores. Outras ocasiões de mesma intensidade devem ocorrer, mas não devem prejudicar o funcionamento do sistema, fazendo o mesmo suprir a demanda nessa cidade também. 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.

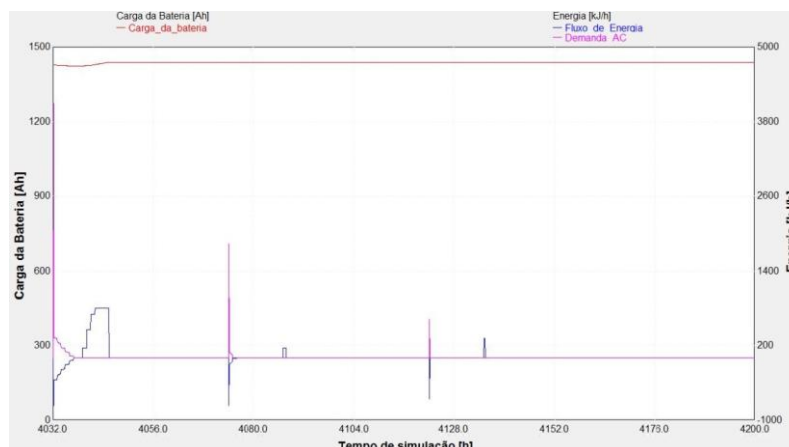


Figura 5.6 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de inverno para a cidade do Rio de Janeiro.

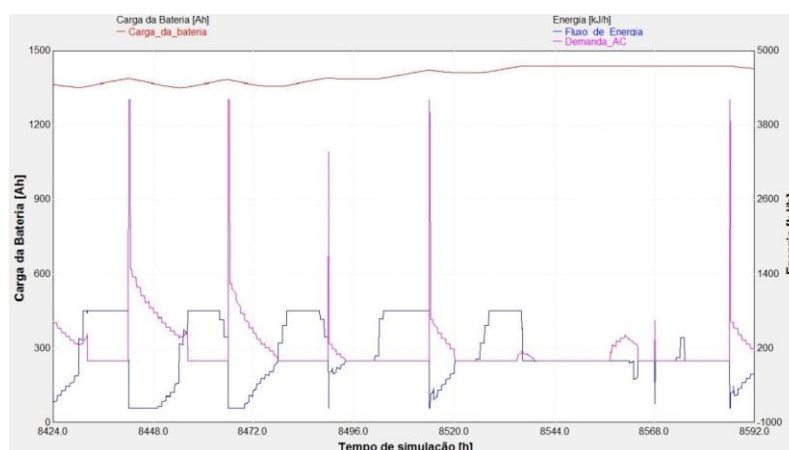


Figura 5.7 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para a cidade do Rio de Janeiro.

O solstício de inverno para essa cidade apresenta diferença quando comparado com as cidades anteriores. Na Figura 5.6 são notadas pequenas zonas de demanda de carga para o ar condicionado, que é baixa quando comparada à demanda de carga no verão, Figura 5.7. 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.

Essas cidades apresentaram simulações de grande semelhança. Uma vez que se situam próximas ao eixo do Equador, não possuem grandes variações nos solstícios de verão e inverno, e os climas nessas épocas se aproximam. É possível aproximar as simulações dos distintos solstícios.

As demandas do aparelho de ar condicionado são visíveis nessa simulação, conforme Figura 5.8. 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.

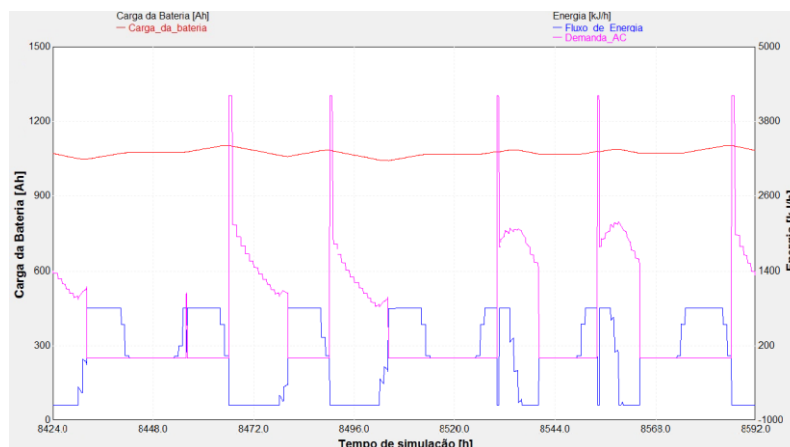


Figura 5.8 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para as cidades de Manaus, Fortaleza, Aracaju e Salvador.

É visto que o ar condicionado não é desligado, mas não há excedente de energia para armazenar. Assim, o sistema de captação de energia solar cumpre a função de fornecer energia para o ar condicionado, mas não é o suficiente para carregar as baterias, sugerindo uma necessidade de adequação do sistema, como um número de módulos fotovoltaicos maior. Por receberem maior insolação, essas cidades acabam tendo uma carga térmica maior quando comparadas com às outras cidades. Nem mesmo o Rio de Janeiro, que apresentou maior carga térmica calculada, Tabela 5.1, apresentou demanda tão elevada de carga das baterias.

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.

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam as simulações para Campo Grande e Goiânia.

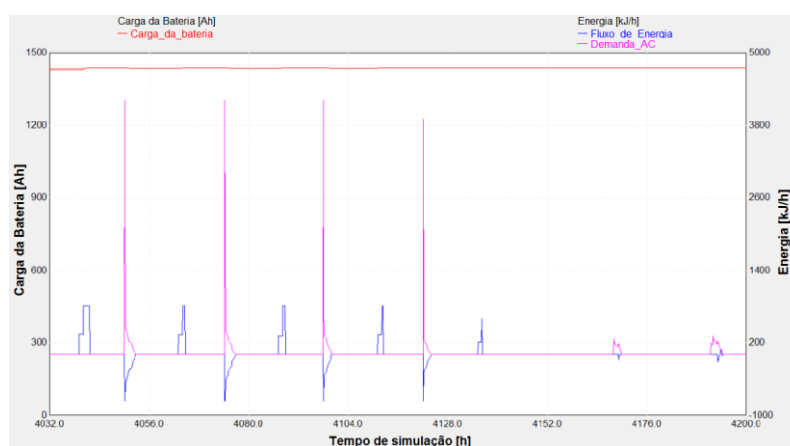


Figura 5.9 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de inverno para as cidades de Goiânia e Campo Grande.

Pela Figura 5.9, é possível ver que a carga das baterias é alta, devido a pouca exigência da edificação. O mesmo vale para a Figura 5.10, 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.

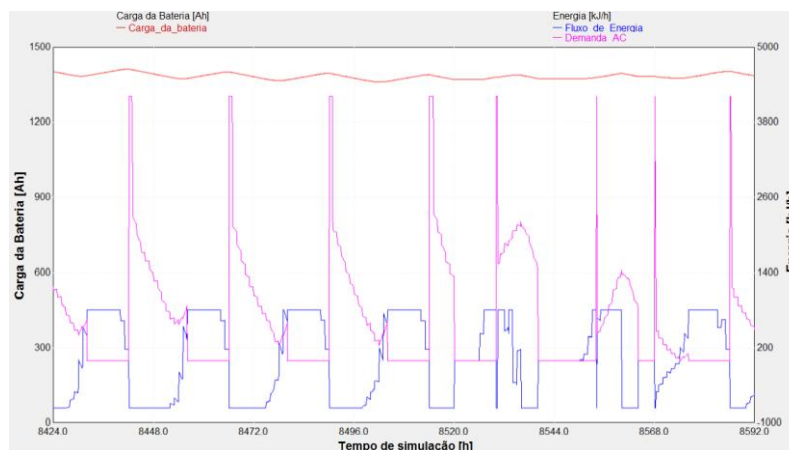


Figura 5.10 – Simulação da quantidade de carga na bateria, da demanda térmica do ar condicionado e da energia que entra ou sai das baterias no solstício de verão para as cidades de Goiânia e Campo Grande.

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.

6. 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. Foi recomendado um melhor dimensionamento para o sistema autônomo de ar condicionado, 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.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Fazer análise do sistema proposto para o uso conjunto de resfriamento e aquecimento.
- Realizar simulações em mais cidades para mapeamento de demanda energética.
- Determinar eficiência energética dos sistemas para diferentes cidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, pp. 659-708.

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

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

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

Duffie, J.A., Beckman, W.A.; **“Solar Engineering of Thermal Processes”**. Wyley, 4ª edição. New Jersey, 2013.

EPE; **“Balanço Energético Nacional 2017: ano base 2016”**, Rio de Janeiro, 2017.

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

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

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

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

TRNSYS; **“TRNSYS 17 Documentation”**, 2014.

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