

Projeto de um Sistema de Suprimento de Energia para um Nanossatélite Educacional Baseado em Busca do Ponto de Máxima Potência

Leandro Souza Batista* Luis Claudio de Oliveira Silva**
João Viana da Fonseca Neto***

* *Universidade Federal do Maranhão, MA (email: leandrosouzabatista@gmail.com).*

** *Coordenação de Engenharia da Computação, Universidade Federal do Maranhão, MA (email: claudio.luis@ufma.br).*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA (email: jviana@dee.ufma.br)*

Abstract: A nanosat is a type of satellite with mass varying between 1 and 10 kg, developed for specific missions to this size. It consists of several subsystems, each of which is responsible for a function. The reduction in the size of the satellites occurred due to a miniaturization of the integrated circuits and the standardization of the small satellites integration structures. This paper presents a project of an energy supply subsystem for an educational nanosat, using an approach for monitoring the point of maximum efficiency of solar panels. Thermal cycling tests were carried out on the batteries in order to verify their behavior, when submitted to temperature variations. Tests of solar charging of the batteries through photovoltaic panels were carried out, in order to verify the behavior of the charge and discharge of the batteries. Through computer simulation, the driver of the EPS system is observed comparing it with and without the aid of MPPT.

Resumo: Um nanossatélite é um tipo de satélite com massa variando entre 1 e 10 kg, desenvolvido para missões específicas para o seu tamanho. Ele é formado por vários subsistemas, cada um responsável por uma função. A redução no tamanho dos satélites ocorreu devido a miniaturização dos circuitos integrados e a padronização das estruturas de integração dos pequenos satélites. Neste trabalho é apresentado um projeto de um subsistema de suprimento de energia para um nanossatélite educacional, usando uma abordagem de monitoramento do ponto de máxima eficiência dos painéis solares. Foram feitos testes de ciclagem térmica das baterias de modo a verificar o comportamento das mesmas quando submetidas a variações de temperatura. Efetuaram-se também testes de carregamento solar das baterias através dos painéis fotovoltaicos, a fim de verificar o comportamento das correntes de carga e descarga das baterias. Através de simulação computacional, observou-se o comportamento do sistema EPS comparando o mesmo com e sem o auxílio do MPPT.

Keywords: Nanosat; Electrical Power System; Maximum Power Point Tracking; EPS; MPPT.

Palavras-chaves: Nanossatélite; Sistema Elétrico de Potência; Busca do Ponto de Máxima Potência; EPS; MPPT.

1. INTRODUÇÃO

Nanossatélite é um termo usado para designar um tipo de satélite com missões específicas para o seu tamanho. Nas classificações mais modernas, nanossatélites são satélites cuja massa variam entre 1 e 10 kg (NASA, 2017). A redução no tamanho dos satélites ocorreu devido à crescente miniaturização dos circuitos integrados, bem como a padronização das estruturas de integração dos pequenos satélites. Esse tipo de satélite é atualmente empregado em atividades educacionais, objetivando a formação acadêmica em cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Aeroespacial (Seman et al., 2016).

Existe uma tendência na intensificação das atividades aeroespaciais envolvendo nanossatélites nas universidades. Isto requer dos estudantes um conjunto de habilidades multidisciplinares que os possibilite aplicar os conhecimentos adquiridos de maneira prática nas pesquisas. Um nanossatélite é formado por vários subsistemas. Cada um desses subsistemas é responsável um um conjunto de tarefas dentro do nanossatélite. Os subsistemas mais comuns presentes em um nanossatélite são:

- Computador de bordo e carga útil
- Telecomunicações (telemetria e telecomandos)
- Suprimento de energia
- Controle de atitude

Além destes subsistemas, é comum nanossatélites serem providos de antenas UHF e VHF, bem como de painéis solares montados em uma estrutura feita de alumínio aeroespacial.

O subsistema de suprimento de energia, também denominado Sistema Elétrico de Potência (Electrical Power System, EPS) é responsável por gerenciar e distribuir a energia elétrica de forma eficiente para os outros subsistemas do nanossatélite, além de gerenciar a carga das baterias. De acordo com Dahbi et al. (2015), a estrutura básica do EPS é composta por uma fonte de energia, unidade de armazenamento de energia (baterias) e o sistema de distribuição. Em satélites de baixa potência, existem duas fontes de energia, a Primária e a secundária, segundo Ferriani et al. (2006). A fonte primária de energia mais utilizada é proveniente dos painéis solares. A fonte secundária geralmente é proveniente de bancos de baterias recarregáveis.

Sistemas eletrônicos microcontrolados são responsáveis por fazer o controle e condicionamento da energia gerada pelos painéis solares para as baterias e subsistemas. Estes sistemas permitem obter a máxima transferência de potência gerada nos painéis solares. No sistema de distribuição, conversores de energia estão localizados entre as fontes de energia (painéis solares e baterias) e os demais subsistemas do nanossatélite. A função destes conversores é fornecer níveis de tensão reguladas a cada subsistema. Assim, cada conversor possui seu subsistema associado de acordo com o nível de tensão ideal ao seu funcionamento.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de um sistema de suprimento de energia (EPS) de baixo custo para um nanossatélite educacional. Para isso, são propostas as seguintes tarefas:

- desenvolver um subsistema de suprimento de energia para um protótipo de um nanossatélite educacional,
- utilizar o algoritmo MPPT, a fim de encontrar o ponto de máxima transferência de potência para as baterias e cargas, que irão alimentar os demais subsistemas do nanossatélite,
- desenvolver um sistema de aquecimento de baterias para o EPS e efetuar testes de ciclagem térmica, a fim de avaliar o sistema de aquecimento das baterias.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2, serão apresentados os trabalhos mais relevantes, relacionados com este tema; na seção 3, será apresentada a metodologia do trabalho, onde serão detalhados o funcionamento do EPS proposto e componentes utilizados; na seção 4, serão apresentados os resultados obtidos nos testes do protótipo e propostas de trabalhos futuros; na seção 5, serão feitas as considerações finais do trabalho.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Tendo a proposta de desenvolvimento de um sistema de suprimento de energia de um nanossatélite educacional, fez-se uma revisão de literatura para elencar trabalhos já publicados a respeito de EPS desenvolvidos para nanossatélites.

Dahbi et al. (2015) elaborou um projeto de dimensionamento de um EPS para nanossatélites usando células

solares, onde foi empregada uma nova estratégia de cálculo para minimizar as perdas das conversões. A estratégia é baseada no posicionamento dos painéis para se ter a melhor relação irradiação/potência. Para melhorar a eficiência da carga das baterias, foi utilizado o algoritmo de busca do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Tracking, MPPT) junto com a técnica Perturbe e Observe (Perturb and observe, P&O) para rastrear o ponto de máxima potência nos painéis.

Ferriani et al. (2006) elaborou um estudo do EPS projetado para o nanossatélite universitário Itasat. São descritos os elementos principais que compõem um EPS e a arquitetura, baseada em S4R (Sequential Switchin Series Regulator). Neste estudo, cada painel do nanossatélite terá seu acionamento microcontrolado de acordo com a demanda de carga.

Notani and S.Bhattacharya (2011) apresenta um estudo de EPS, composto por seis painéis solares controlados por um algoritmo MPPT do tipo P&O. Utiliza-se também um módulo de carregamento de baterias flexível através de conversores de indutância primária single-ended (Single-Ended Primary-Inductor Converter, SEPIC) do tipo buck/boost.

Acharya et al. (2019) Propôs um projeto simulado de um EPS, composto de painéis solares, banco de baterias e conversores de potência. A simulação também trata do gerenciamento de energia durante o ciclo de trabalho do Nanossatélite, levando em consideração a ativação de cada subsistema de acordo com o plano de voo. O estudo aborda a captação de energia com o nanossatélite em modo spin, de forma a evitar pontos quentes nos painéis.

Speretta et al. (2012) abordam a análise térmica das baterias com um projeto de um aquecedor de baixa potência. Os teste obtiveram capacidade de carga acima de 95% nas baterias.

Cardoso et al. (2018) propõem o rastreamento do ponto de máxima potência (MPP) utilizando redes neurais artificiais (RNA). Foi feita uma comparação com os algoritmos tradicionais como usando o método P&O. Os resultados mostram um resposta mais rápida na obtenção do MPP pela RNA.

F.Carpes (2017) aborda o uso de RNA para obtenção do MPP para redes fotovoltaicas, como alternativa ao método P&O tradicional. Para gerar dados de treinamento da rede foi feita a modelagem do sistema de geração em um simulador. Os testes concluem que a rede neural obteve desempenho superior no rastreamento do MPP em comparação ao método P&O.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi desenvolvido um EPS para um protótipo de um nanossatélite educacional. A placa foi projetada com componentes de fácil acesso encontrados no mercado. O protótipo tem por objetivo obter de forma prática, análises de dados simulando um nanossatélite em órbita. Foram efetuados testes como transmissão e recepção de sinais e comandos por RF, análise de dados de GPS, temperatura, posição, imageamento por câmera e controle de atitude. Na tabela

1, está contida a lista de itens utilizados no protótipo do EPS, com preços atuais de mercado.

Componentes	Quantidade	Preço R\$
Placa de circuito impresso 10X10	1	15,00
Painel solar CNC85X115-18	1	53,00
Regulador de carga TP5040	1	5,00
Baterias de íons de lítio 18650	2	46,00
Conversores step up LM2577	2	30,00
Sensor de corrente ACS712	1	21,00
Total		170,00

Tabela 1. Componentes utilizados no protótipo do EPS.

Na figura 1 é possível observar o esquema elétrico do projeto desenvolvido neste trabalho. Foi elaborado, para obtenção do MPPT, um conversor estático baseado na topologia Buck de modo a fazer o rastreamento da máxima potência elétrica. O conversor MPPT terá como elemento chaveador, um transistor tipo Mosfet ou Transistor Bipolar de Porta Isolada (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT). Este componente receberá os pulsos de um sinal modulado por largura de pulso (Pulse Width Modulation, PWM) oriundos de um microcontrolador. O microcontrolador utilizado foi o ATmega2560, disponível na placa de prototipagem Arduino Mega.

A tensão de saída do conversor MPPT deve ser equivalente ao barramento de tensão de 8V, de forma a garantir uma tensão de saída mais estável possível, para alimentar os subsistemas do nanossatélite. O sistema de baterias é composto de duas baterias de Íons de Lítio na configuração série, com capacidade total de corrente de 2200 mAh. As baterias contêm aquecedores de elementos resistivos a base de níquel cromo, para evitar que as mesmas tenham sua eficiência comprometida ao trabalharem com temperaturas abaixo de 0° C. Foram elaborados conversores Buck/Boost para cada subsistema do nanossatélite.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento dos elementos básicos do EPS

O EPS é responsável pelo gerenciamento de energia para os subsistemas e controle de carga das baterias. O protótipo EPS construído possui dois tipos de carregamento: através de painéis solares ou por uma fonte DC chaveada 5V, tornando o protótipo versátil quanto ao carregamento das baterias. Na figura 2 pode-se observar as partes constituintes do protótipo EPS.

O painel solar utilizado no protótipo desenvolvido foi o CNC85X115-18, que fornece uma tensão de circuito aberto de 18 V, corrente de 90 mA e potência de 1,5 W. Para controlar a carga das baterias foi utilizado o módulo regulador de carga TP4056, que é um carregador linear que oferece corrente e tensão constante para as baterias, possuindo um conector mini-usb para carregadores externos e terminais de conexão para os painéis solares.

O banco de baterias é composto de duas baterias de Íons de Lítio 18650, conectadas em paralelo com tensão de 3,7 V nominais e capacidade de corrente total de 2400 mAh.

Para alimentação dos subsistemas do nanossatélite desenvolvido, foram utilizados os módulos conversores Step-up LM2577, com tensão de entrada de até 32 V, saída regulada e ajustável com corrente de até 2 A.

O módulo ainda possui um sensor de corrente ACS712 de efeito hall, que envia para o subsistema de computador de bordo os dados de corrente demandada para o EPS.

Para o subsistema de telecomunicações e computador de bordo, foi utilizado um conversor com saída de 5 V. Para o controle de atitude que possui um motor brushless extraído de um disco rígido de computador, foi utilizado um conversor com tensão de saída de 12 V.

4.2 Testes de Carregamento das baterias

Foram realizados testes do comportamento de carga das baterias através de um painel solar. Para os testes, o conversor Buck 12 V / 5 V foi utilizado como controlador de carga e regulador de tensão. A bateria utilizada nos testes foi a de Íons de Lítio de 3,8 V e 1200 mA. Esta tecnologia de bateria é amplamente utilizada em nanossatélites (Krause et al., 2020). Na figura 3 é possível observar a estrutura montada.

Para simular o consumo de carga durante o experimento, foram utilizados dois motores CC, a fim de ilustrar o consumo de alguns subsistemas. Foram efetuados testes de carga da bateria sem motores, carga da bateria com motores ligados e descarga da bateria com motores e painel desligado.

No teste com o painel solar desligado e os motores CC ligados, observou-se que o amperímetro registrou uma corrente drenada da bateria, de -28 mA. Quando a geração solar é inserida no sistema, através dos painéis fotovoltaicos, a corrente registrada no amperímetro foi de aproximadamente zero.

Quando os motores foram desligados, não houve consumo da bateria. Ao ser efetuada a recarga da bateria, através do painel solar, a corrente fornecida pelo painel foi de 30 mA. Os testes foram efetuados em um dia parcialmente nublado e as medições foram feitas em torno do meio-dia, nos momentos sem nuvem passante.

4.3 Testes térmicos na bateria

Segundo os datasheets das baterias de lítio utilizadas no experimento, os processos de carga devem ser efetuados em temperaturas acima de 0° C. Em ambiente espacial, a temperatura externa de um nanossatélite, em órbita baixa, a uma altitude de aproximadamente 500 km, pode chegar a -100° C. É necessário usar sistemas de aquecimento ou revestimento de modo a garantir o correto funcionamento das baterias. O isolamento térmico em nanossatélites geralmente é feito com fita Kapton, que envolve a bateria de forma a manter a temperatura interna.

Os sistemas de aquecimento da baterias, proposto neste trabalho, é composto por dois componentes: o aquecedor e o isolante térmico. O aquecedor geralmente é composto de um elemento resistivo capaz de produzir calor por efeito joule.

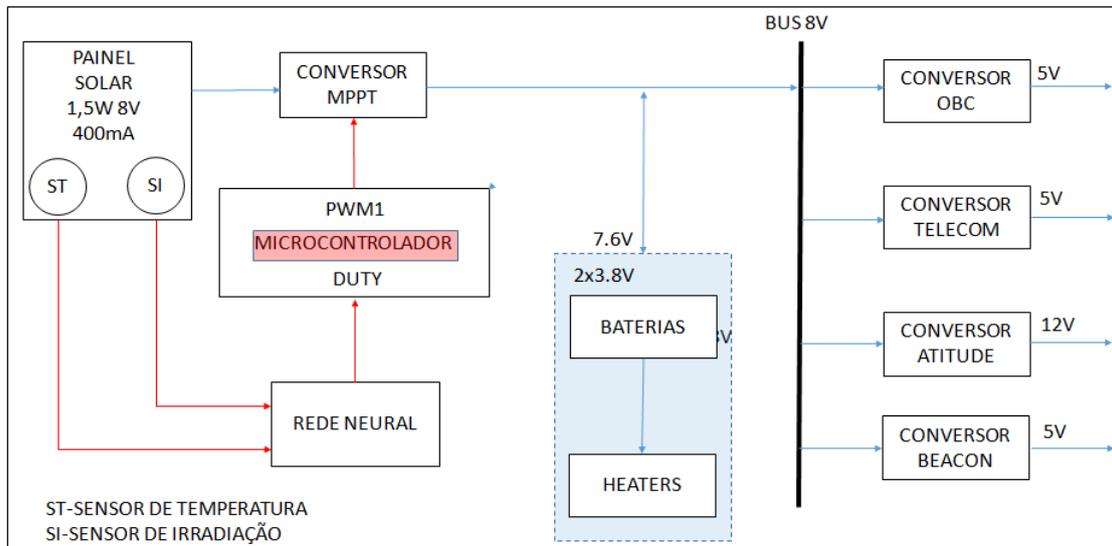


Figura 1. Esquema elétrico do projeto de um EPS para um nanossatélite educacional.

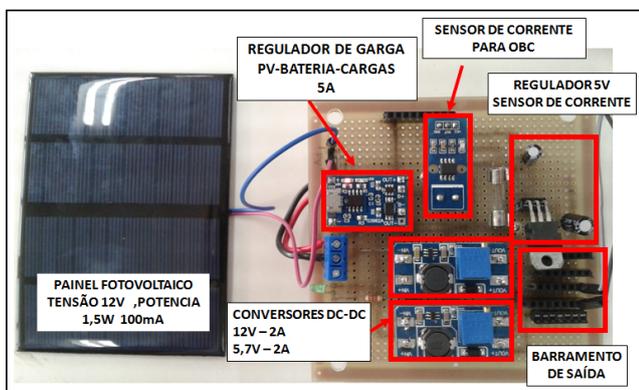


Figura 2. Partes do EPS.

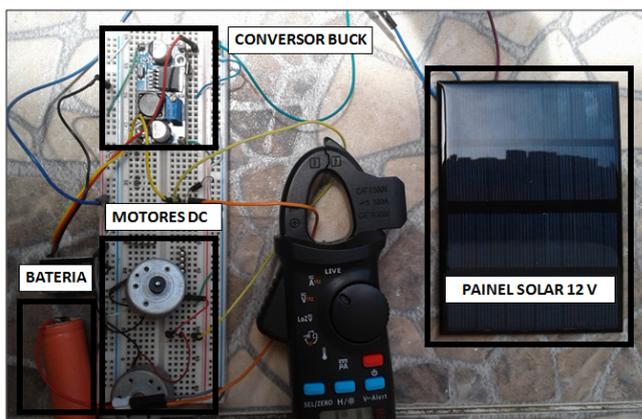


Figura 3. Estrutura de carregamento solar.

O elemento aquecedor utilizado foi um fio de níquel cromo envolvido na bateria, o mesmo utilizado em resistências de chuveiro elétrico. Para fins de teste, o isolamento térmico foi feito com isopor, simulando a fita Kapton. O sistema de teste usou um microcontrolador e um sensor para monitorar a temperatura ambiente e a temperatura da bateria. Foram utilizados sensores de temperatura do tipo NTC retirados de sucata do banco de baterias de um

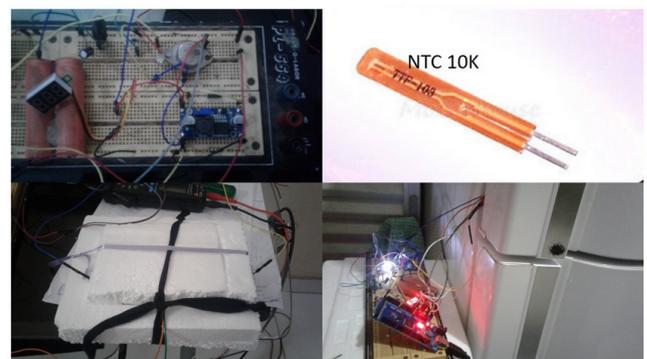


Figura 4. Protótipo de testes de ciclagem térmica.

laptop. O protótipo de testes pode ser observado na figura 4. A câmara de ciclagem utilizada foi uma refrigerador convencional do tipo duplex. A temperatura mínima que o refrigerador usado é capaz de manter é da ordem de -15°C .

No primeiro teste de ciclagem térmica, com as baterias dentro do isolante térmico feito de isopor, foram efetuadas medições com a resistência ligada e com a resistência desligada. Na figura 5 é possível observar os valores obtidos pelos sensores de temperatura.

Decorridos 4000 segundos para as duas testagens, notou-se que, com a resistência ligada, a queda de temperatura nas baterias é mais suave, chegando no final do ciclo a 28°C . Com a resistência desligada a queda de temperatura foi mais acentuada, chegando ao final do ciclo a 7°C .

Também foram efetuados testes de ciclagem térmica de 5 horas de duração, alternando a temperatura ambiente de -15°C a 30°C em intervalos de 40 minutos, aproximadamente. O controle de aquecimento foi microcontrolado, sendo habilitado quando a temperatura caiu para abaixo de 10°C . Foram monitoradas a tensão, a corrente e a potência, bem como a temperatura da bateria. Na figura 6 é possível observar os valores obtidos pelos sensores de temperatura. A potência observada ficou em torno de 1 W.

Apesar do aquecimento realizado, o consumo mostrou-se alto.

4.4 Algoritmo MPPT

Para obter a máxima eficiência elétrica dos painéis solares, a maioria dos sistemas de nanossatélites utilizam um algoritmo MPPT, a fim de encontrar o ponto de máxima transferência de potência para as baterias e cargas. O algoritmo busca um ciclo de trabalho ótimo que servirá de controle para o conversor regulador de carga da bateria. Este ciclo de trabalho (duty cycle) será responsável por controlar a largura de pulsos do sinal PWM, que servirá de controle para o Mosfet do conversor regulador. O algoritmo MPPT utilizado neste trabalho foi o método Perturba e Observa (P&O), que realizou incrementos no duty cycle até a máxima potência ser atingida. Foram realizadas simulações em ambiente Simulink/MATLAB.

Conforme a Figura 7, pode-se observar o modelamento matemático utilizando a toolbox do painel fotovoltaico; o bloco com script do algoritmo MPPT P&O; o cálculo de valores de indutância, capacitância e resistência do conversor efetuado em MATLAB. Os resultados gráficos dos testes é evidenciado na Figura 8. Pelo gráfico fica evidenciado que com o uso do algoritmo MPPT, a potência de saída possui níveis maiores, em comparação aos testes realizados sem o algoritmo MPPT.

4.5 Atividades futuras

Pretende-se, para trabalhos futuros, efetuar simulações de irradiação solar e temperatura em ambiente espacial. Estes dados serão usados no algoritmo MPPT baseado no método P&O, para gerar os dados de duty cycle para o elemento chaveador. Estes dados serão usados no treinamento e validação de uma rede neural artificial. A rede neural será usada como alternativa para encontrar o ponto de máxima potência elétrica dos painéis solares. Além disso, pretende-se projetar um protótipo mais elaborado do EPS de um Nanossatélite utilizando a rede neural artificial proposta, de forma que todos os subsistemas utilizem a potência gerada pelo EPS.

Além disso, pretende-se utilizar um sensor de radiação que fornecerá um dos dados de entrada da rede neural. A proposta é elaborar sensores de radiação de baixo custo baseados em sensores LDR e fotodiodos UV e IR, de modo a obter o maior alcance de comprimento de onda dos raios solares. Para validação e calibração será utilizado um sensor de radiação solar comercial, cujo modelo será determinado posteriormente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs o desenvolvimento de um EPS para um protótipo de um nanossatélite educacional. A placa do subsistema de EPS foi projetada com componentes de fácil acesso e carregamento versátil, uma vez que este possui dois tipos de carregamento, sendo um por meio de painéis solares e o outro por uma fonte DC chaveada. O sistema conta ainda com um painel solar que fornece uma tensão de circuito aberto de 12 V, um banco de baterias, módulos conversores para os subsistemas de

telecomunicações, computador de bordo e controle de atitude, que compõem o nanossatélite.

Foram realizados testes de ciclagem térmica das baterias de modo a verificar o comportamento das mesmas quando submetidas a variações de temperatura e testes de carregamento solar através dos painéis fotovoltaicos, a fim de verificar o comportamento das correntes de carga e descarga das baterias.

Para se obter a máxima eficiência elétrica dos painéis solares, foi proposto a utilização do algoritmo MPPT, a fim de encontrar o ponto de máxima transferência de potência para as baterias e cargas. Verificou-se nas simulações que com a utilização do algoritmo MPPT, a potência de saída possui níveis maiores, em comparação aos testes sem o algoritmo MPPT.

REFERÊNCIAS

- Acharya, Alshehhi, F., Tsoupos, A., Khan, O., Elmoursi, M., Khadkikar, V., Zeineldin, H., and Al Hosani, M. (2019). Modeling and design of electrical power subsystem for cubesats. *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 1–6.
- Cardoso, Trigos, F., Benedito, R., and Azcue, J. (2018). Proposta de algoritmo de otimização para obtenção do ponto de máxima potência de um sistema fotovoltaico baseado em redes neurais artificiais. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- Dahbi, A.Aziz, S.Zouggar, N.Benazzi, Zahboune, H., and M.Elhafyani (2015). Design and sizing of electrical power source for a nanosatellite using photovoltaic cells. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 3rd, 1–6.
- F.Carpes (2017). Rastreamento de máxima potência fotovoltaica através de redes neurais artificiais perceptron multicamadas. *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa*, 83p.
- Ferriani, C.Donato, B.Santos, E.Guimarães, C.Junior, R.d'Amore, and G.Adabo (2006). Estudo do subsistema de suprimento de energia do satélite universitário itasat. *Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA*, 12rd.
- Krause, F., Loveland, J., Smart, M., Brandon, E., and R.Bugga (2020). Implementation of commercial li-ion cells on the marco deep space cubesats. *Journal of Power Sources*.
- NASA, C.L.I. (2017). *NASA CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers*. CubeSat Launch Initiative.
- Notani and S.Bhattacharya (2011). Flexible electrical power system controller design and battery integration for 1u to 12u cubesats. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 3633–3640.
- Seman, L.O., Slongo, L.K., Hausmann, R., and Bezerra, E.A. (2016). O desenvolvimento de cubesats diante da aprendizagem ativa: um levantamento com participantes de missões brasileiras. In *XLIV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*.
- Speretta, Angadi, M., Bert, M., and Stelwagen, M. (2012). On-board power and battery sytem for small satellites. *63rd International Astronautical Congress*, B4.6A.

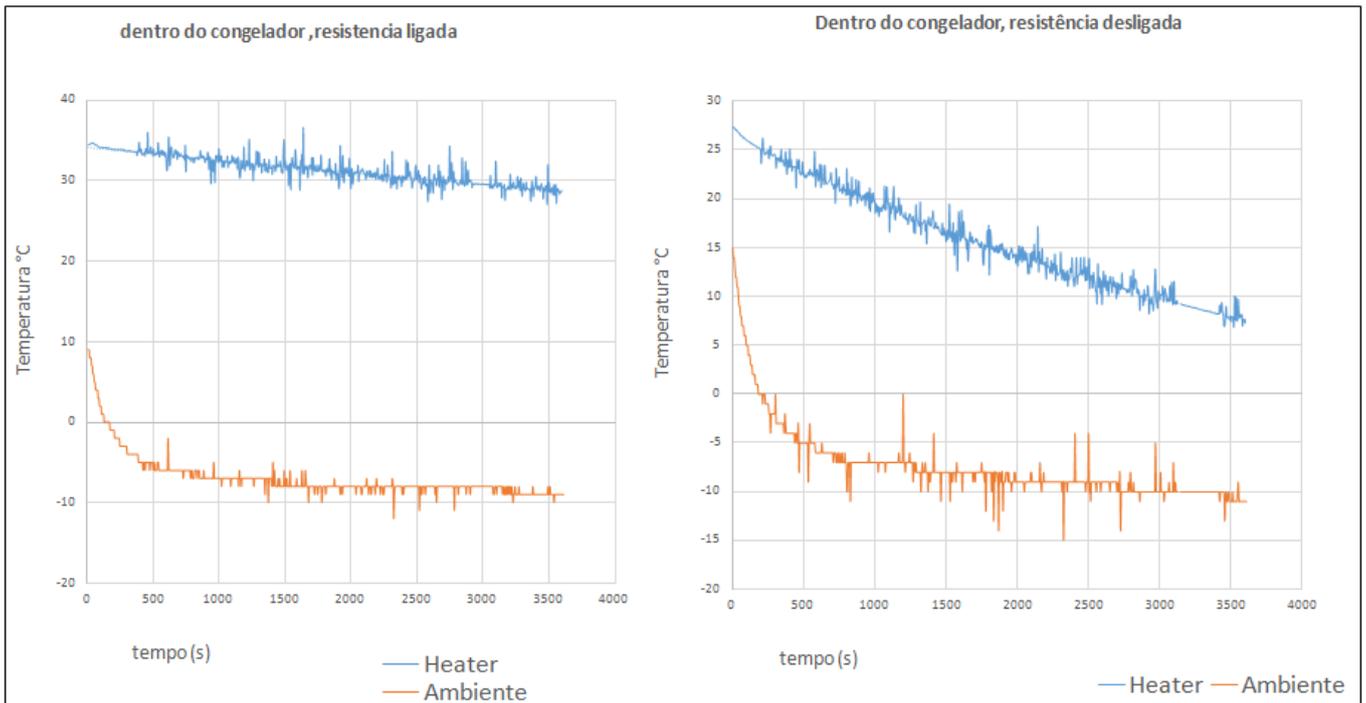


Figura 5. Ciclagem térmica com 4000 segundos de duração.

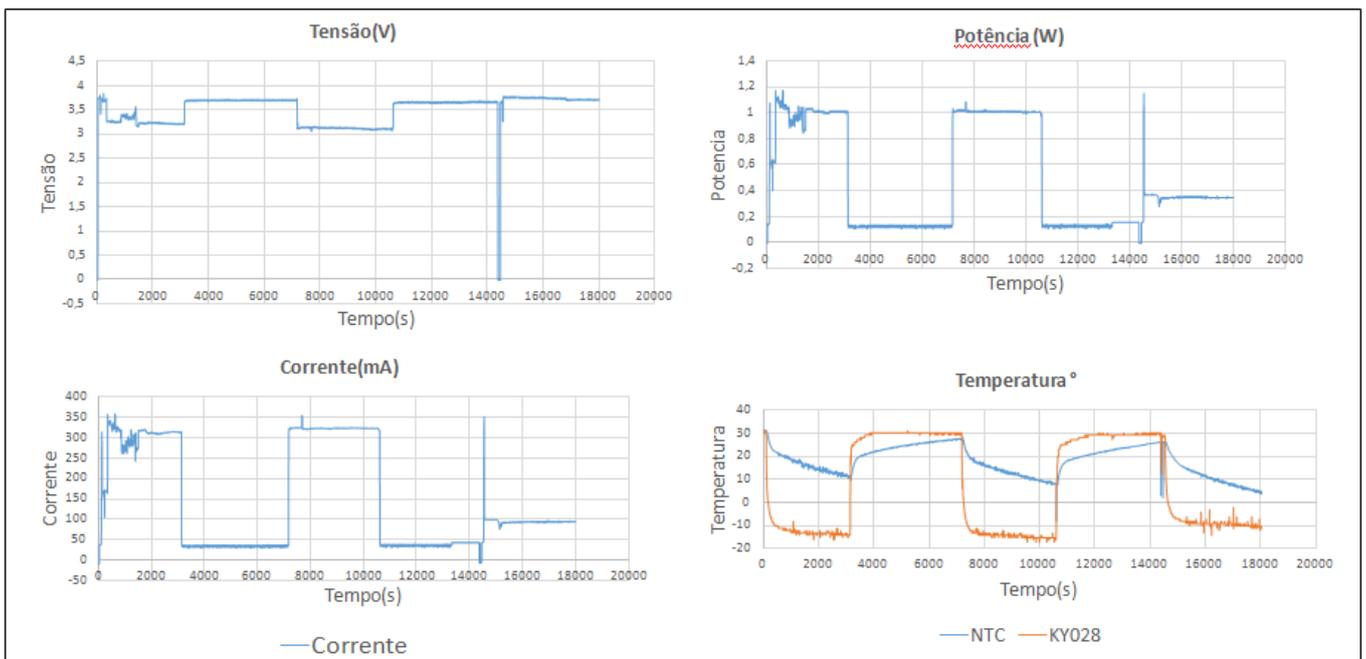


Figura 6. Ciclagem térmica com 5 horas de duração.

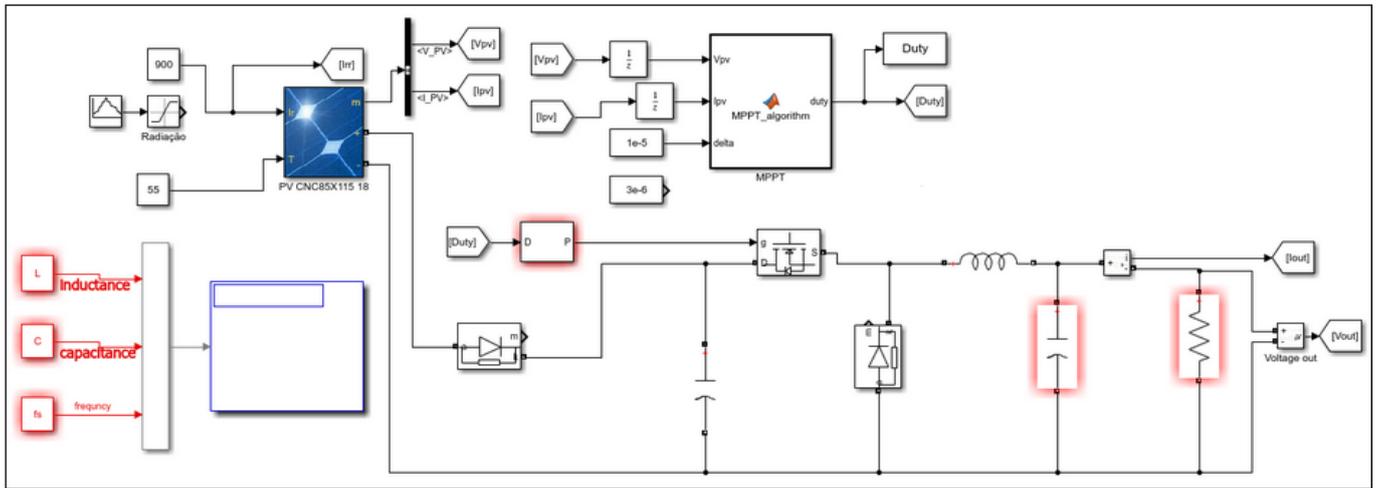


Figura 7. Simulação do uso do algoritmo MPPT, realizada no Simulink/MATLAB, para obter o ponto de máxima transferência de potência para as baterias e cargas.

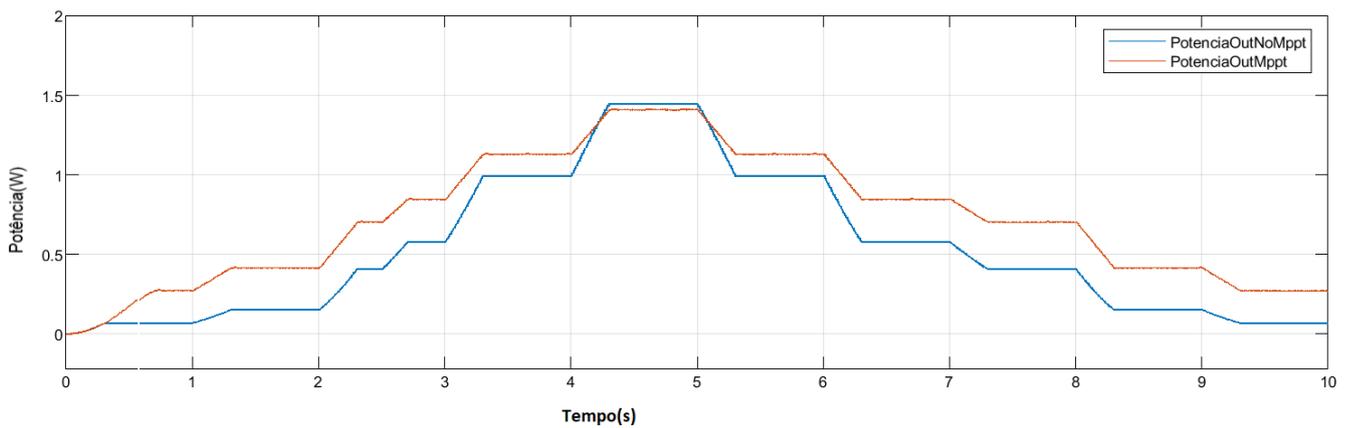


Figura 8. Gráfico comparativo da Potência de saída entre o sistema usando o algoritmo MPPT e sem o uso do algoritmo MPPT.