

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



MARCELO ANDERSON RIBEIRO JUNIOR

**CONTROLE PREDITIVO PARA CONVERSOR BUCK
APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Vitória-ES

Outubro/2021

MARCELO ANDERSON RIBEIRO JUNIOR

**CONTROLE PREDITIVO PARA CONVERSOR BUCK
APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação
do aluno Marcelo Anderson Ribeiro Junior,
apresentado ao Departamento de Engenharia
Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade
Federal do Espírito Santo, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

Outubro/2021

Marcelo Anderson Ribeiro Junior

CONTROLE PREDITIVO PARA CONVERSOR BUCK APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Marcelo Anderson Ribeiro Junior, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

**Profa. Dra. Marcia Helena Moreira
Paiva**
Universidade Federal do Espírito Santo
Professor da Disciplina

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Marcelo Anderson Ribeiro Junior
Universidade Federal do Espírito Santo
Aluno

Vitória-ES

Outubro/2021

RESUMO

Devido ao aumento da busca e uso de energia renovável, os conversores CC-CC do tipo *Buck* têm sido uma escolha viável para serem utilizados no processamento da energia solar. Técnicas de controle, como o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC, do inglês *Model Predictive Control*), têm se tornado opções promissoras para controle de conversores, sendo amplamente utilizados na eletrônica de potência para prever o comportamento das variáveis sob controle em sistemas elétricos. O presente trabalho trata do estudo e uso da técnica MPC em um conversor CC-CC *Buck*, além de apresentar a modelagem e o princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico, que será conectado ao inversor, com o propósito de realizar o controle por Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT, do inglês *maximum power point tracking*), ou seja, será aplicada a técnica de MPPT baseado em Controle Preditivo. Para auxiliar e desenvolver o trabalho será usado o software *MATLAB/Simulink* para simulações, com o intuito de analisar como o sistema se comporta em determinadas variações nos parâmetros de entrada e evidenciar a eficácia no uso da técnica de controle utilizada.

Palavras-chave: Conversor *Buck*; MPC; Sistema Fotovoltaico; MPPT; Eletrônica de Potência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia do sistema	8
Figura 2 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de radiação	12
Figura 3 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de temperatura	12
Figura 4 – Esboço da curva característica de uma célula fotovoltaica	13
Figura 5 – Estrutura do controle preditivo aplicado a um conversor	14
Figura 6 – Conversor <i>Buck</i>	14
Figura 7 – Corrente no Indutor	15

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cronograma de Trabalho 17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
MCC	Modo de Condução Contínua
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
PMP	Ponto de Máxima Potência
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	JUSTIFICATIVA	10
3	OBJETIVOS	11
3.1	Objetivo Geral	11
3.2	Objetivos Específicos	11
4	REFERENCIAL TEÓRICO	12
4.1	Módulos Fotovoltaicos e Ponto de Máxima Potência	12
4.2	Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC)	13
4.3	Conversor CC-CC <i>Buck</i>	14
4.3.1	Modo de Condução Contínua (MCC)	14
5	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	16
5.1	Metodologia Adotada	16
5.2	Etapas de Desenvolvimento Previsto	16
5.3	Cronograma de Trabalho	17
6	ALOCAÇÃO DE RECURSOS	18
	REFERÊNCIAS	19

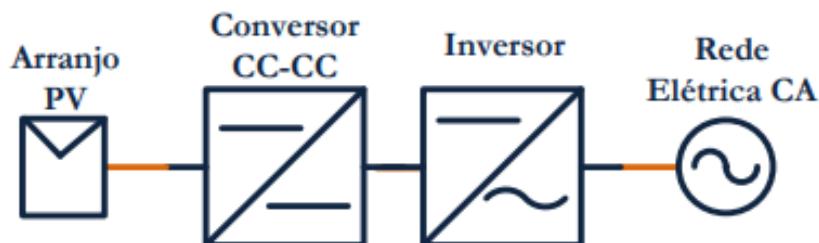
1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios dos tempos, a sociedade buscava energia para garantir a sobrevivência e realizar tarefas, como no uso de energia térmica para cozinhar e se aquecer, na navegação com barcos à vela por meio do vento e a tração animal. Em seguida, com a revolução industrial, o combustível fóssil e o petróleo passaram a serem utilizados para gerar energia, porém o seu uso está associado a problemas ambientais (FILHO, 2019).

Com o crescimento populacional e o avanço industrial e tecnológico, a sociedade passou a buscar por fontes energéticas sustentáveis, devido ao aumento na demanda de energia e a preocupação com o meio ambiente. Entre elas, a geração de energia elétrica por meio da energia fotovoltaica tem ganhado forças no mundo, uma vez que utiliza placas solares para captar luz do sol, fonte natural e inesgotável.

O crescimento da geração fotovoltaica chegou a patamares elevados devido ao desenvolvimento da eletrônica de potência, que na maioria de suas aplicações nesse sistema fotovoltaico é utilizada para processar níveis de tensão e corrente de entrada para alimentar uma carga por meio de conversores, temos como exemplo o conversor CC-CC tipo *Buck*, que será abordado neste projeto. Além disso, com o uso desse inversor, também é possível permitir que o módulo atue sempre no ponto de máxima transferência de potência (COELHO, 2008), já que existem variações de radiação solar e temperatura no painel solar. A Figura 1 ilustra o módulo fotovoltaico conectado ao conversor CC-CC, no primeiro estágio e, no segundo estágio, um inversor CC-CA conectado à rede elétrica.

Figura 1 – Topologia do sistema



Fonte: Mattos (2011)

De forma que o conversor adapte a tensão do arranjo fotovoltaico para a tensão aplicada da rede elétrica e de forma a extrair o máximo de energia, faz-se o uso da estratégia MPPT, o qual apresenta diversos métodos na literatura, como: método da perturbação e observação (P&O), condutância incremental, amostragem da tensão de circuito aberto, controle por tensão constante, entre outros.

Em comparação com os métodos clássicos de controle, o MPC oferece uma resposta dinâmica com uma alta margem de estabilidade, o que o torna adequado para aplicações em técnicas de MPPT de sistemas fotovoltaicos (FILHO, 2019).

Originalmente o MPC foi utilizado em aplicações tanto na indústria de processos como na indústria química (KOURO et al., 2015) e, atualmente, tem sido uma opção viável e promissora para controle de conversores. Esta técnica utiliza o modelo do sistema a ser controlado para predizer um comportamento futuro e, então, tomar uma decisão (TRICARICO, 2018). Ela é baseada na ideia de calcular a sequência de sinais a serem controlados para otimizar uma função objetiva.

O MPC possui alta carga computacional e isso faz com que ele possa lidar facilmente com restrições em casos de multivariáveis e de sistemas não lineares de uma maneira intuitiva. Atualmente, o controle preditivo tem sido muito utilizado na eletrônica de potência por conta da existência de um excelente modelo matemático para prever o comportamento das variáveis sob controle em sistemas elétricos e mecânicos (VAZQUEZ et al., 2016). Nesse ponto, o MPC aplicado em conversores pode ser considerado uma tecnologia bem estabelecida nas etapas de pesquisa e desenvolvimento (VAZQUEZ et al., 2014).

Sendo assim, é proposto o uso da técnica MPC em um conversor *Buck* e na abordagem do rastreamento de ponto de máxima potência, para atingir os objetivos de controle visando otimizar e melhorar o desempenho do sistema fotovoltaico.

2 JUSTIFICATIVA

Com o crescente uso de energias renováveis, principalmente com a expansão da tecnologia fotovoltaica, há maior busca por melhor eficiência e robustez nos sistemas fotovoltaicos, que já estão em patamares elevados graças ao desenvolvimento paralelo da eletrônica de potência, que tem sido importante como ferramenta para processamento de energia fotogerada (COELHO, 2008).

Sendo assim, com aplicação da eletrônica de potência que envolve conversores CC-CC, é possível obter maior quantidade de potência que é fornecida pelo sistema fotovoltaico. Em muitas aplicações, o conversor é utilizado entre o painel fotovoltaico e a carga, no entanto, também pode haver mais um estágio em que há a conversão da tensão CC em tensão CA para atender a rede elétrica.

Problemas como o sombreamento nos módulos ou painéis provocam perdas consideráveis na produção de energia, interferindo diretamente na produção ou na eficiência de energia do sistema fotovoltaico. Dessa forma, a produção será mais viável quanto melhor for a conversão de energia solar em energia elétrica, além de disponibilizar a máxima potência (NETO, 2012).

No trabalho feito em Filho (2019) é possível observar diferentes estratégias para o rastreamento do ponto de máxima potência, dentre elas há a abordagem da técnica MPC-MPPT, utilizando um conversor *Flyback*. No estudo de Santos e Mercês (2020) também é abordado a mesma técnica em um conversor SEPIC. Diferentemente, outros trabalhos, em sua maioria, fazem o uso da estratégia MPPT sem um controle preditivo e aplicado a um conversor, como é o caso de Neto (2012) e Giudici (2016).

Em geral, os trabalhos citados se restringem ao rastreamento do ponto de máxima potência com ou sem o MPC e sua aplicação em um conversor sem o uso do controle preditivo para fixação de parâmetros de saída. O presente trabalho tentará uma abordagem mais completa, cujo MPC será utilizado tanto na estratégia MPPT quanto no controle de parâmetros de saída do conversor *Buck*, tal como a tensão, para atender a rede elétrica.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

De forma geral, o objetivo desse trabalho é o conhecimento da técnica MPC e estratégia MPPT, e aplicação dos mesmos em um dispositivo conversor CC-CC *Buck*, que será conectado a um sistema fotovoltaico.

3.2 Objetivos Específicos

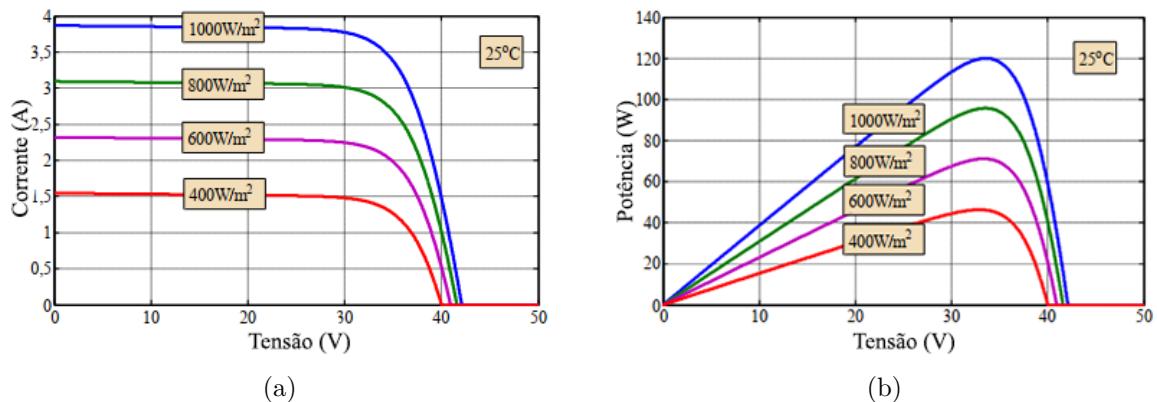
- Estudar o tema "Conversor *Buck*", "Controle Preditivo" e "Sistemas fotovoltaicos";
- Equacionamento, modelagem e dimensionamento do conversor *Buck*;
- Modelar um sistema fotovoltaico;
- Implementar o controle preditivo em um conversor *Buck* conectado a um sistema fotovoltaico utilizando a estratégia MPPT, por meio do software *MATLAB/Simulink*;
- Analisar os resultados obtidos;

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Módulos Fotovoltaicos e Ponto de Máxima Potência

Módulos fotovoltaicos, ou também, painéis fotovoltaicos são responsáveis por gerar energia solar, convertendo a luz do sol em energia elétrica. Eles são compostos por células, normalmente feitas de silício, que são interligadas e conectadas, sendo excitadas pela radiação solar e produzindo tensão e corrente. Sendo assim, sob diferentes valores de radiação e temperatura, o módulo fotovoltaico apresenta diferentes curvas características $I \times V$ e $P \times V$, conforme exemplificado na Figura 2 e Figura 3.

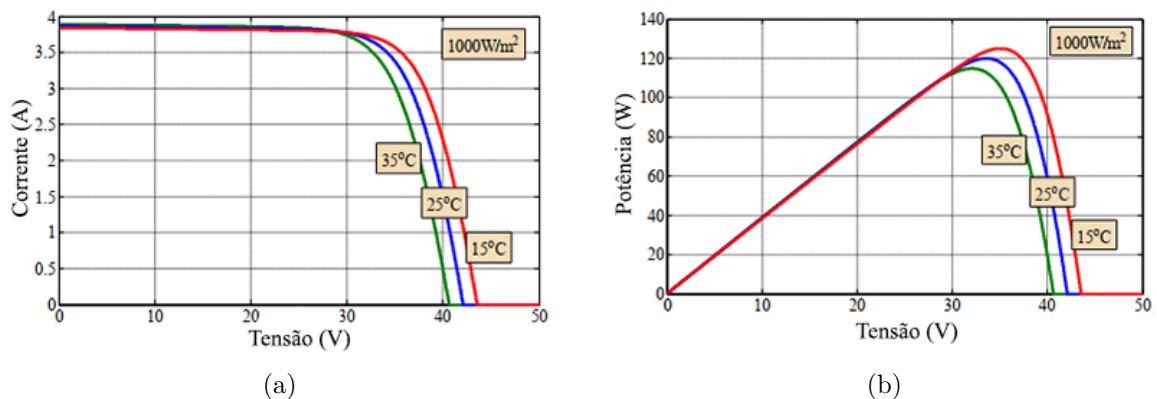
Figura 2 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de radiação



Fonte: Mattos (2011).

Nota: Adaptado pelo autor.

Figura 3 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de temperatura

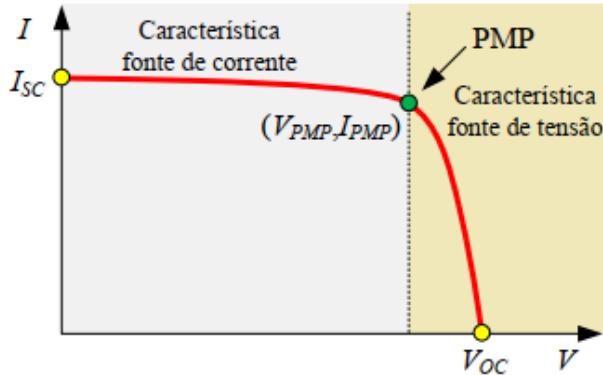


Fonte: Mattos (2011).

Nota: Adaptado pelo autor.

Podemos observar como é a variação das curvas que, consequentemente, apresentam diferentes pontos de máxima potência (PMP). Como forma de esboço, a Figura 4 mostra, aproximadamente, onde se encontra o PMP.

Figura 4 – Esboço da curva característica de uma célula fotovoltaica



Fonte: Mattos (2011).

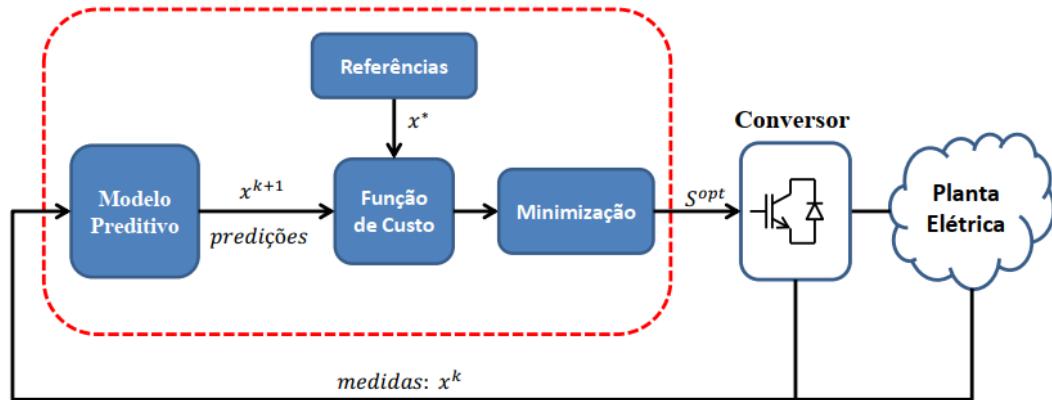
Com essas mudanças na curva, o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) se torna essencial em um sistema de geração fotovoltaica, com o objetivo de operar o painel no ponto de máxima potência em condições de mudança de temperatura e radiação solar (MATTOS, 2011).

4.2 Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC)

As técnicas de MPC definem ações de controle minimizando uma função custo que descreve o comportamento desejado do sistema. Esta função de custo compara a saída prevista do sistema com uma referência. O controlador MPC calcula uma sequência de ações de controle que minimizam a função custo, para cada amostragem de tempo, mas apenas o primeiro elemento deste vetor é aplicado ao sistema (VAZQUEZ et al., 2016). As técnicas de MPC usam o modelo de tempo discreto do sistema, e por meio dele avaliam o valor previsto dos futuros estados deste sistema. Essas previsões são usadas para determinar um cronograma de ações ideais para as etapas futuras, que minimizarão uma função de custo predefinida (FILHO, 2019).

A técnica aplicada a um conversor é mostrada na Figura 5, onde x^k são as medidas de interesse do sistema no instante k , x^{k+1} são as saídas preditas para cada estado de chaveamento do conversor no instante $k+1$ e S^{opt} é o estado otimizado, que é determinado após selecionar o estado de menor erro por meio da função custo.

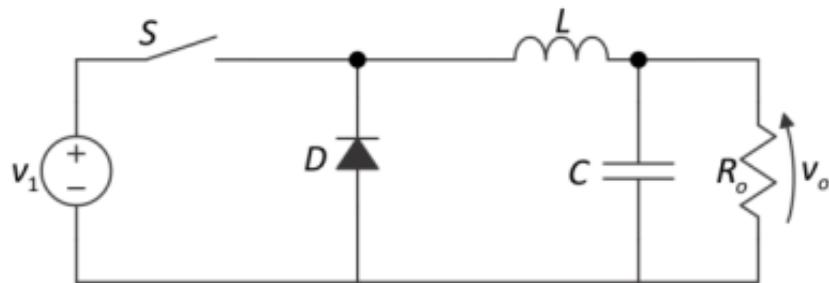
Figura 5 – Estrutura do controle preditivo aplicado a um conversor



Fonte: Tricarico (2018).

4.3 Conversor CC-CC *Buck*

O conversor *Buck*, cujo circuito é ilustrado na Figura 6, tem como função obter uma tensão de saída menor que a tensão de entrada. A chave S corta o diodo quando está conduzindo, a energia da fonte é transferida para o indutor e para o capacitor. Quando a chave S abre, o diodo começa a conduzir e continua a passagem de corrente pelo indutor. A carga e o capacitor recebem a energia armazenada em L .

Figura 6 – Conversor *Buck*

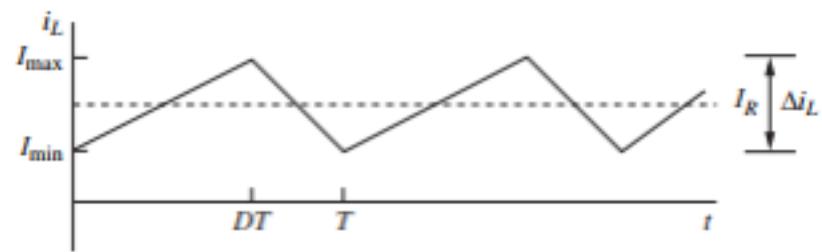
Fonte: Barbi (2015).

4.3.1 Modo de Condução Contínua (MCC)

A análise feita anteriormente, é considerado que o diodo permanece polarizado diretamente por todo o tempo que a chave está aberta, resultando na corrente no indutor sempre positiva. Uma corrente no indutor que permanece positiva em todo período de chaveamento é conhecida como modo de condução contínua, ilustrada na Figura 7. O modo de condução descontínuo de corrente é caracterizado pela corrente no indutor retornando a zero durante

cada período, o que não é considerado neste trabalho (HART, 2016).

Figura 7 – Corrente no Indutor



Fonte: Hart (2016).

5 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

5.1 Metodologia Adotada

Inicialmente, será feito o estudo de temas sobre o Controle Preditivo e MPPT em pesquisas bibliográficas tais como artigos de periódicos e dissertações. Depois, o mesmo será realizado com o tema conversores CC-CC *Buck*. Ainda se tratando do conversor, será levantado o equacionamento, feita a modelagem e o dimensionamento do mesmo visando atingir parâmetros, como a tensão de saída; além de realizar a discretização do seu modelo matemático. Em seguida, o controle preditivo será aplicado ao conversor e, posteriormente, junto ao sistema fotovoltaico por meio da estratégia de rastreamento do ponto de máxima potência. Com isso, o conteúdo será simulado em software, como o *simulink*, para ter total compreensão do funcionamento do controle preditivo aplicado ao sistema e obter resultados a serem analisados e discutidos, com a finalidade de perceber a eficácia da técnica utilizada. Finalmente, será feito o relatório final.

5.2 Etapas de Desenvolvimento Previsto

O trabalho será desenvolvido conforme as etapas apresentadas a seguir.

- **Atividade 1:** Estudo teórico sobre Controle Preditivo e estratégia MPPT;
- **Atividade 2:** Estudo do tema "Conversor CC-CC *Buck*";
- **Atividade 3:** Equacionamento, modelagem e dimensionamento do conversor e do sistema fotovoltaico;
- **Atividade 4:** Aplicação do controle preditivo ao conversor proposto e ao sistema fotovoltaico;
- **Atividade 5:** Simulação em *software*;
- **Atividade 6:** Análise e discussão dos resultados;
- **Atividade 7:** Escrita do Projeto de Graduação;
- **Atividade 8:** Defesa do Projeto de Graduação;

5.3 Cronograma de Trabalho

O projeto de graduação será realizado durante o período letivo de 2021/2, que tem previsão de acontecer entre as datas de 03 de novembro de 2021 e 26 de março de 2022. O cronograma de trabalho, baseado nas etapas descritas na seção anterior, é mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Cronograma de Trabalho

Meses	Nov. 2021				Dez. 2021				Jan. 2022				Fev. 2022				Mar. 2022			
Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Atividade 1																				
Atividade 2																				
Atividade 3																				
Atividade 4																				
Atividade 5																				
Atividade 6																				
Atividade 7																				
Atividade 8																				

Fonte: Produção do próprio autor.

6 ALOCAÇÃO DE RECURSOS

O projeto será realizado utilizando a máquina do próprio autor, com a seguinte configuração: (i) sistema operacional Windows 10; (ii) processador Intel Core i5-7200U, 2.50GHz; (iii) memória RAM de 8 GB; (iv) unidade de armazenamento de 1TB (disco rígido); (v) placa de vídeo Nvidia 920MX Graphics.

Como material bibliográfico será utilizado livros, periódicos, artigos internacionais e demais documentos com a literatura que aborde o tema, por meio das credenciais de aluno da UFES ou disponibilizados digitalmente de forma gratuita e livre. Para as simulações e desenvolvimento do controle preditivo, será utilizado o *software MATLAB/Simulink* da *Mathworks*.

REFERÊNCIAS

- BARBI, I. **Modelagem de conversores CC-CC empregando modelo médio em espaço de estados.** Florianópolis: [s.n.], 2015. Citado na página 14.
- COELHO, R. F. **Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 10.
- FILHO, G. L. **Seguimento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos Utilizando Controle Preditivo por Modelo e Algoritmos Heurísticos para Estimação de Parâmetros.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 10 e 13.
- GIUDICI, R. **Modelagem e Simulação de um Sistema Fotovoltaico para Geração Distribuída.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Citado na página 10.
- HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos.** [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. Citado na página 15.
- KOURO, S.; PEREZ, M. A.; RODRIGUEZ, J.; LLOR, A. M.; YOUNG, H. A. Model predictive control: Mpc's role in the evolution of power electronics. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 9, n. 4, p. 8–21, Dec. 2015. Citado na página 9.
- MATTOS, F. C. **Contribuição ao estudo de um sistema solar fotovoltaico monofásico de único estágio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 8, 12 e 13.
- NETO, J. T. de C. **Controle Robusto Aplicado a Conversor Buck-Boost em Sistemas Fotovoltaicos.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Citado na página 10.
- SANTOS, A. G. dos; MERCÊS, V. O. das. Rastreador do ponto de máxima potência baseado em controle preditivo para o conversor sepic em sistemas fotovoltaicos. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA.** [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1. Citado na página 10.
- TRICARICO, T. C. **Estudo de técnicas de controle para interface de potência de uma microrrede híbrida utilizando um conversor Intervelead.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 14.
- VAZQUEZ, S.; LEON, J. I.; FRANQUELO, L. G.; RODRIGUEZ, J.; YOUNG, H. A.; MARQUEZ, A.; ZANCHETTA, P. Model predictive control: A review of its applications in power electronics. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 8, n. 1, p. 16–31, Mar. 2014. Citado na página 9.

VAZQUEZ, S.; RODRIGUEZ, J.; RIVERA, M.; FRANQUELO, L. G.; NORAMBUENA, M. Model predictive control for power converters and drives: Advances and trends. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 2, p. 935–947, Feb. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 13.