

**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

Julho/2023

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

Julho/2023

Marcelo Anderson Ribeiro Junior

CONTROLE PREDITIVO PARA CONVERSOR BUCK APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

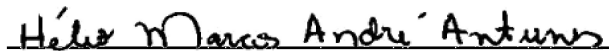
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Marcelo Anderson Ribeiro Junior, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 06 de julho de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Dr. Daniel Carletti
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Vitória-ES

Julho/2023

A Deus, a minha noiva, pais e irmão, aos amigos e professores pelo apoio e ensino.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder a graça de estar ao meu lado durante todo o curso, por me fazer passar por dificuldades que me fizeram crescer e por poder finalizar minha graduação no curso de Engenharia Elétrica. À minha noiva Brenda, por me motivar e me reerguer durante toda minha trajetória na UFES, principalmente nos momentos mais difíceis. Aos meus pais, Marcelo e Ana Rosilma, por me aconselharem e me ouvirem com todo amor, por todo carinho e cuidado para comigo durante esse tempo. Ao meu irmão Rafael que sempre se mostrou feliz com todas minhas conquistas e esteve ao meu lado em cada instante. Aos meus amigos da faculdade, por compartilharem comigo os momentos bons e ruins, pelos atos de ajuda diante das dificuldades das disciplinas do curso e pela torcida. À minha Tia Enilce e sua família por não medirem esforços para me dar suporte durante essa jornada e se alegrarem comigo.

Agradeço ao Professor e orientador Lucas Frizera Encarnação, por todo conhecimento compartilhado, todo suporte, paciência e dedicação que teve para comigo durante sua orientação. Também pela oportunidade de ser orientado por ele desde a Iniciação Científica, motivando e incentivando a pesquisa, mesmo diante de todas as minhas dificuldades.

À banca examinadora pela aceitação do convite e pelo tempo investido para leitura e avaliação desse trabalho.

Finalmente, agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo e aos professores por contribuírem pela minha formação.

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* e em um inversor trifásico de dois níveis, além de apresentar a modelagem e o princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico, que será conectado ao conversor. O controle preditivo é utilizado no controle da tensão de saída do conversor CC-CC e nos estados de chaveamento do inversor CC-CA para garantir os parâmetros necessários, como a corrente de saída, para que o sistema opere em potência máxima. Com essa finalidade, foi realizada a estratégia de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT, do inglês *maximum power point tracking*). A fim de auxiliar e desenvolver o projeto, foi utilizado o *software* MATLAB/Simulink para a implementação do sistema proposto e realizar as simulações, com o intuito de aplicar e evidenciar a eficácia do uso da técnica de controle utilizada. Também foram analisados os resultados obtidos, apresentando os principais parâmetros almejados.

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

ABSTRACT

Due to the increased search for and use of renewable energy, DC-DC Buck converters have been a viable choice for use in solar energy processing. Control techniques, such as Model Predictive Control (MPC) have become promising options for controlling converters, being widely used in power electronics to predict the behavior of variables under control in electrical systems. The present work deals with the study and use of MPC technique in a DC-DC Buck converter and a two-level three-phase inverter, in addition to showing the modeling and operating principle of a photovoltaic system, which will be connected to the converter. Predictive control is used to control the output voltage of the DC-DC converter and the switching states of the DC-AC inverter to ensure the necessary parameters such as the output current for the system to operate at maximum power. For this purpose, the strategy of maximum power point tracking (MPPT) was carried out. In order to assist and develop the project, the MATLAB/Simulink software was used to implement the proposed system and to carry out the simulations in order to apply and demonstrate the effectiveness of the use of the control technique. The results obtained were also analyzed, presenting the main desired parameters.

Keywords: Buck Converter; MPC; Photovoltaic System; MPPT; Power Electronics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia de um sistema de geração fotovoltaico conectado à rede elétrica	15
Figura 2 – Célula elementar (esquerda) e painel formado por várias células (direita)	19
Figura 3 – Circuito equivalente célula fotovoltaica: (a) modelo ideal, (b) modelo de um diodo, (c) modelo de dois diodos	19
Figura 4 – Exemplo de um arranjo fotovoltaico 3x4 painéis	20
Figura 5 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de irradiância	21
Figura 6 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de temperatura	21
Figura 7 – Esboço da curva característica de uma célula fotovoltaica	21
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo P&O	23
Figura 9 – Topologias dos conversores CC-CC: (a) Conversor <i>Boost</i> (b) Conversor <i>Buck</i> (c) Conversor <i>Buck-Boost</i>	24
Figura 10 – Conversor <i>Buck</i>	26
Figura 11 – Formas de onda do conversor <i>Buck</i> : (a) Tensão no indutor (b) Corrente no indutor (c) Corrente no capacitor	27
Figura 12 – Diagrama do VSI de dois níveis	30
Figura 13 – Classificação do MPC aplicado a conversores de potência	33
Figura 14 – Estrutura do controle preditivo aplicado a um conversor	34
Figura 15 – Estrutura do controle preditivo aplicado ao inversor	36
Figura 16 – Corrente de referência e predita do inversor	37
Figura 17 – Topologia geral do sistema	39
Figura 18 – Sistema completo do projeto simulado	41
Figura 19 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ do módulo para diferentes valores: (a) de irradiância, (b) de temperatura	43
Figura 20 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ do arranjo para diferentes valores: (a) de irradiância, (b) de temperatura	43
Figura 21 – Circuito de simulação do Conversor <i>Buck</i>	45
Figura 22 – Blocos da aplicação da técnica MPC no conversor <i>Buck</i>	45
Figura 23 – Curvas resultantes da tensão: (a) na saída do arranjo fotovoltaico, (b) na saída do <i>buck</i> , (c) na saída do <i>buck</i> com aproximação via <i>zoom</i>	46
Figura 24 – Corrente no Indutor do Conversor <i>Buck</i>	47
Figura 25 – Controlador PI no ambiente de simulação	47
Figura 26 – Curva da tensão de saída do conversor <i>Buck</i> com Controlador PI: (a) original, (b) com aproximação via <i>zoom</i>	48
Figura 27 – Inversor Trifásico no ambiente de simulação	49
Figura 28 – Rede Elétrica no ambiente de simulação	49
Figura 29 – Esquemático utilizado para o MPPT	50

Figura 30 – Circuito para cálculo da corrente de referência	51
Figura 31 – Controle Preditivo aplicado ao Inversor	51
Figura 32 – Circuito de disparo	52
Figura 33 – Curva de máxima potência: (a) original, (b) com aproximação via <i>zoom</i>	53
Figura 34 – Curva da corrente predita do inversor seguindo a corrente de referência: (a) original , (b) com aproximação via <i>zoom</i> , (c) com maior aproximação via <i>zoom</i>	54
Figura 35 – Curvas para irradiância de $1000W/m^2$ e temperatura variando de $25^{\circ}C$ para $45^{\circ}C$: (a) de máxima potência, (b) tensão do arranjo fotovoltaico, (c) tensão de saída do <i>buck</i>	55
Figura 36 – Curvas para irradiância variando de $1000W/m^2$ para $800W/m^2$ e tem- peratura de $25^{\circ}C$: (a) de máxima potência, (b) tensão do arranjo fotovoltaico, (c) tensão de saída do <i>buck</i>	56
Figura 37 – Espectro Harmônico da corrente do inversor	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ganho estático dos conversores CC-CC	25
Tabela 2 – Estados de comutação e vetor de voltagem	32
Tabela 3 – Características elétricas do módulo CS6P-255P	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CCS	<i>Continuous Control Set</i>
FCS	<i>Finit Control Set</i>
IGBT	<i>Isolated Gate Bipolar Transistor</i>
MCC	Modo de Condução Contínua
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
OSV	<i>Optimal Switching Vector</i>
OSS	<i>Optimal Switching Sequence</i>
PI	Proporcional Integral
PMP	Ponto de Máxima Potência
P&O	Perturbação e Observação
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{ph}	Fotocorrente
I_{cel}	Corrente de saída da célula
I_d	Corrente no diodo
I_{sh}	Corrente no resistor shunt
I_s	Corrente de saturação do diodo
V_{cel}	Tensão nos terminais da célula
R_s	Resistência Série
R_{sh}	Resistência <i>shunt</i>
η	Fator de idealidade da célula
V_t	Tensão térmica
V_s	Tensão de entrada do conversor <i>Buck</i>
V_o	Tensão de saída do conversor <i>Buck</i>
V_c	Tensão no capacitor
i_L	Corrente no indutor
i_C	Corrente no capacitor
D	<i>Duty Cicle</i> ou Taxa de Trabalho
T	Período de chaveamento
i_o	Corrente de saída
ΔV_o	Variação da tensão de saída
ΔQ	Variação da carga
V_a	Tensão da fase “a”
V_{dc}	Tensão CC da fonte
e_a	Tensão Trifásica da Rede

k	valores medidos das variáveis no instante atual
$k + 1$	valores medidos das variáveis no instante futuro
V_{ref}	Tensão de referência
N	Número de estados de chaveamento possíveis do conversor
T_s	Tempo de amostragem do modelo preditivo discreto
g	Função custo do modelo preditivo
i_{ref}	Corrente de referência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	SISTEMA FOTOVOLTAICO	19
2.1	Algoritmo para o MPPT	22
3	CONVERSOR CC-CC	24
3.1	Conversor CC-CC Buck	25
3.1.1	Modo de Condução Contínua (MCC)	27
3.1.2	Dimensionamento do Conversor	28
4	INVERSOR CC-CA	30
5	CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO	33
5.1	MPC aplicado ao Conversor CC-CC Buck	34
5.1.1	Modelo de tempo discreto	35
5.1.2	Função Custo	35
5.2	MPC aplicado ao Inversor CC-CA	35
5.2.1	Modelo de tempo discreto	36
5.2.2	Função Custo	37
6	METODOLOGIA E PROPOSTA	38
6.1	Metodologia	38
6.2	Proposta	38
6.3	Etapas de Desenvolvimento	39
7	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	41
7.1	Introdução	41
7.2	Recursos Computacionais	41
7.3	Sistema Fotovoltaico	42
7.4	Conversor CC-CC Buck	44
7.4.1	Cálculo dos parâmetros	44
7.4.2	MPC aplicado ao Conversor Buck	45
7.4.3	PI aplicado ao Conversor <i>Buck</i>	47

7.5	Inversor CC-CA conectado a Rede Elétrica	48
7.5.1	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) e implementação do MPC ao Inversor	50
8	CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	59

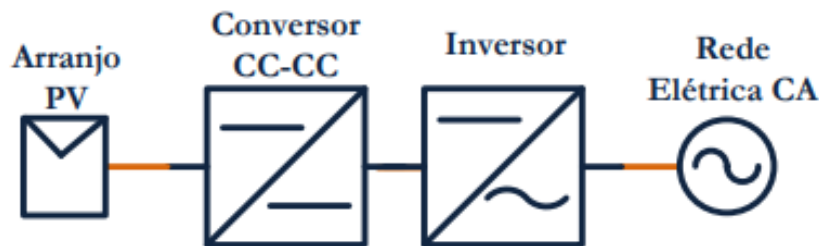
1 INTRODUÇÃO

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, 2019b).

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 força 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. Como exemplo é possível citar o conversor CC-CC tipo *Buck*, que será abordado neste projeto. Além disso, com o uso desse conversor, também é possível permitir que o módulo atue sempre no ponto de máxima transferência de potência (COELHO, 2008), já que existem variações de irradiação 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 de um sistema de geração fotovoltaico conectado à rede elétrica



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 (VILLALVA, 2010).

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, 2019b).

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 prever 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.

Apesar do MPC possuir alta carga computacional, o mesmo pode lidar facilmente com restrições, sistemas com múltiplas variáveis e também com 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 no Inversor CC-CA junto a abordagem do rastreamento de ponto de máxima potência, para atingir os objetivos de controle visando otimizar e melhorar o desempenho do sistema fotovoltaico.

1.1 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 fotovoltaica (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 (2019b) 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.

1.2 Objetivos

1.2.1 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 e em um Inversor CC-CA conectado a rede elétrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

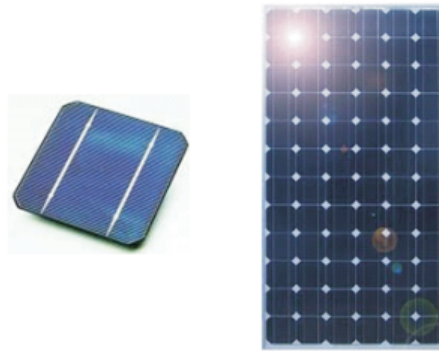
- Estudar o tema “Conversor *Buck*”, “Inversor CC-CA”, “Controle Preditivo”, “Sistemas fotovoltaicos” e “Estratégia MPPT”;
- Equacionamento, modelagem e dimensionamento do Conversor *Buck* e do Inversor CC-CA;
- Modelar um sistema fotovoltaico;

-
- Implementar o controle preditivo no Conversor *Buck* conectado a um sistema fotovoltaico, por meio do *software MATLAB/Simulink*;
 - Implementar o controle preditivo no Inversor CC-CA conectado a rede, junto a estratégia MPPT e ao conversor *Buck*;
 - Analisar os resultados obtidos;

2 SISTEMA FOTOVOLTAICO

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 irradiação solar e produzindo tensão e corrente. A Figura 2 ilustra uma célula fotovoltaica e um painel formado por várias células.

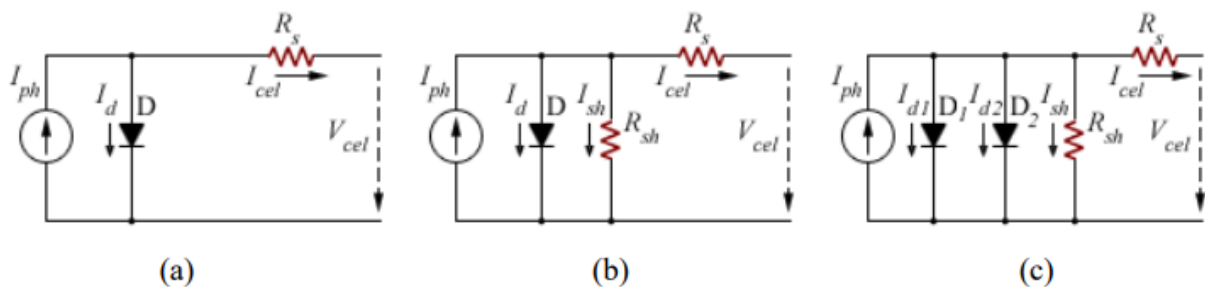
Figura 2 – Célula elementar (esquerda) e painel formado por várias células (direita)



Fonte: Villalva (2010)

Dentre as principais características dos módulos fotovoltaicos está a curva de corrente-tensão ($I - V$), que é obtida a partir da modelagem do circuito elétrico equivalente da célula fotovoltaica. Existem três modelos principais de circuitos: o modelo ideal, o modelo de um diodo e o modelo de dois diodos (TAVARES, 2009). A Figura 3 mostra esses modelos.

Figura 3 – Circuito equivalente célula fotovoltaica: (a) modelo ideal, (b) modelo de um diodo, (c) modelo de dois diodos



Fonte: Tavares (2009)

O modelo que será utilizado neste trabalho é o modelo de um diodo (modelo real). É possível obter a equação 2.1 da corrente da célula I_{cel} ao analisar a Figura 3(b) com a aplicação da Lei das Correntes de Kirchoff.

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.1)$$

A corrente no diodo (I_d) e a corrente no resistor *shunt* (I_{sh}), após manipulações algébricas, estão representadas pelas Equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

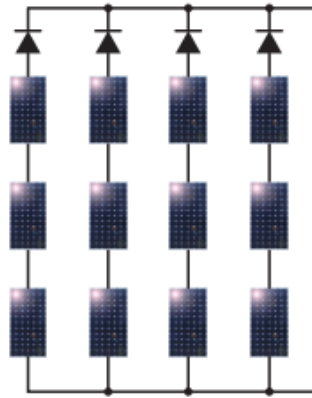
$$I_d = I_s \left[e^{\frac{V_{cel} + I_{cel} R_s}{\eta V_t}} - 1 \right] \quad (2.2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{cel} + I_{cel} R_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Onde η é o fator de idealidade da célula e V_t é a tensão térmica.

O sistema fotovoltaico pode ser construído conectando vários módulos, formando o arranjo (ou *arrays*) fotovoltaico, seja em paralelo ou em série. Sendo assim, a corrente e tensão gerada são proporcionais ao número de módulos que serão colocados em série ou em paralelo. A Figura 4 exemplifica um arranjo fotovoltaico.

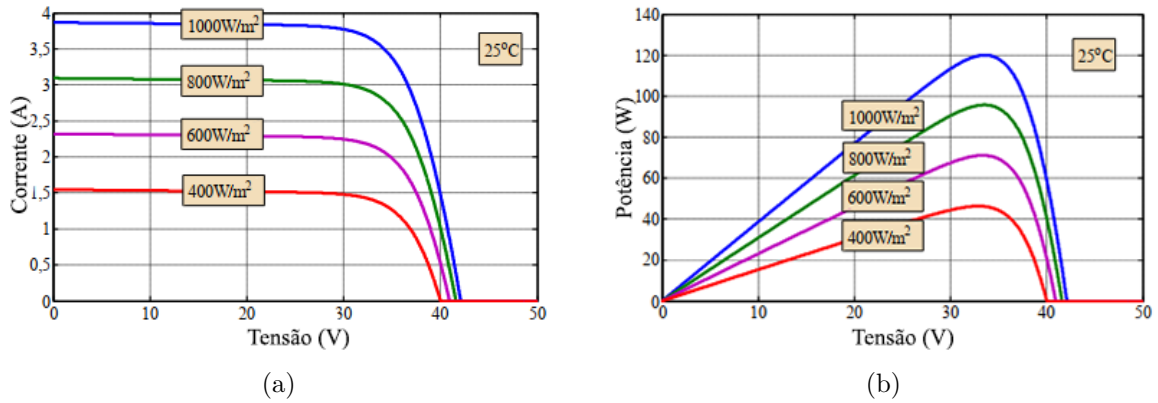
Figura 4 – Exemplo de um arranjo fotovoltaico 3x4 painéis



Fonte: Villalva (2010)

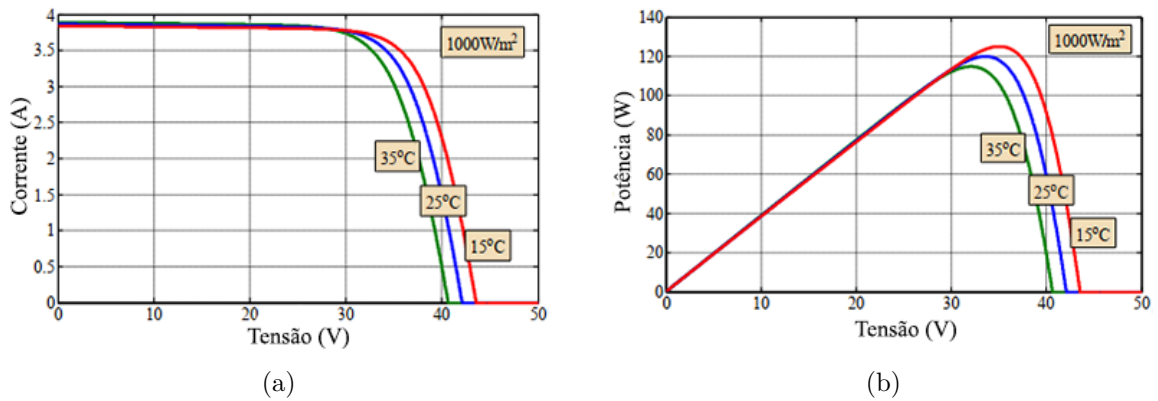
É comum analisar as características de um módulo usando a curva $I - V$ e $P - V$. Sob diferentes valores de irradiância e temperatura, o módulo fotovoltaico apresenta diferentes curvas características $I \times V$ e $P \times V$, conforme exemplificado na Figura 5 e Figura 6.

Figura 5 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de irradiância



Fonte: Adaptado de Mattos (2011).

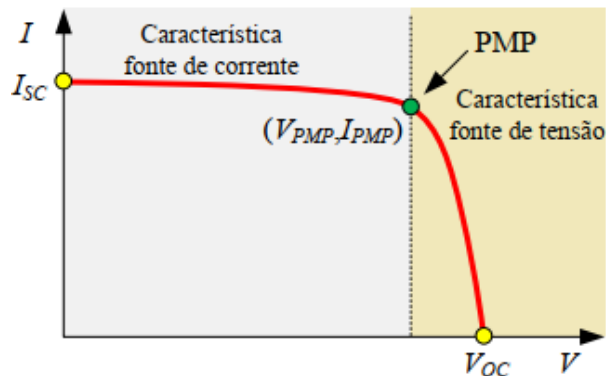
Figura 6 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de temperatura



Fonte: Adaptado de Mattos (2011).

Podemos observar como é a variação das curvas que, conseqüentemente, apresentam diferentes pontos de máxima potência (PMP). Como forma de esboço, a Figura 7 mostra, aproximadamente, onde se encontra o PMP. Considerando que I_{SC} é a corrente de curto circuito, V_{OC} é a tensão de circuito aberto, I_{PMP} é a corrente de potência máxima e V_{PMP} é a tensão de potência máxima.

Figura 7 – Esboço da curva característica de uma célula fotovoltaica



Fonte: Mattos (2011).

Com essas mudanças na curva e observando que o PMP se encontra na região menos linear, 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 irradiação solar (MATOS, 2011), requerendo um controle preciso para uma eficiente geração de energia. A seção seguinte aborda como será o algoritmo utilizado como busca para este fim.

2.1 Algoritmo para o MPPT

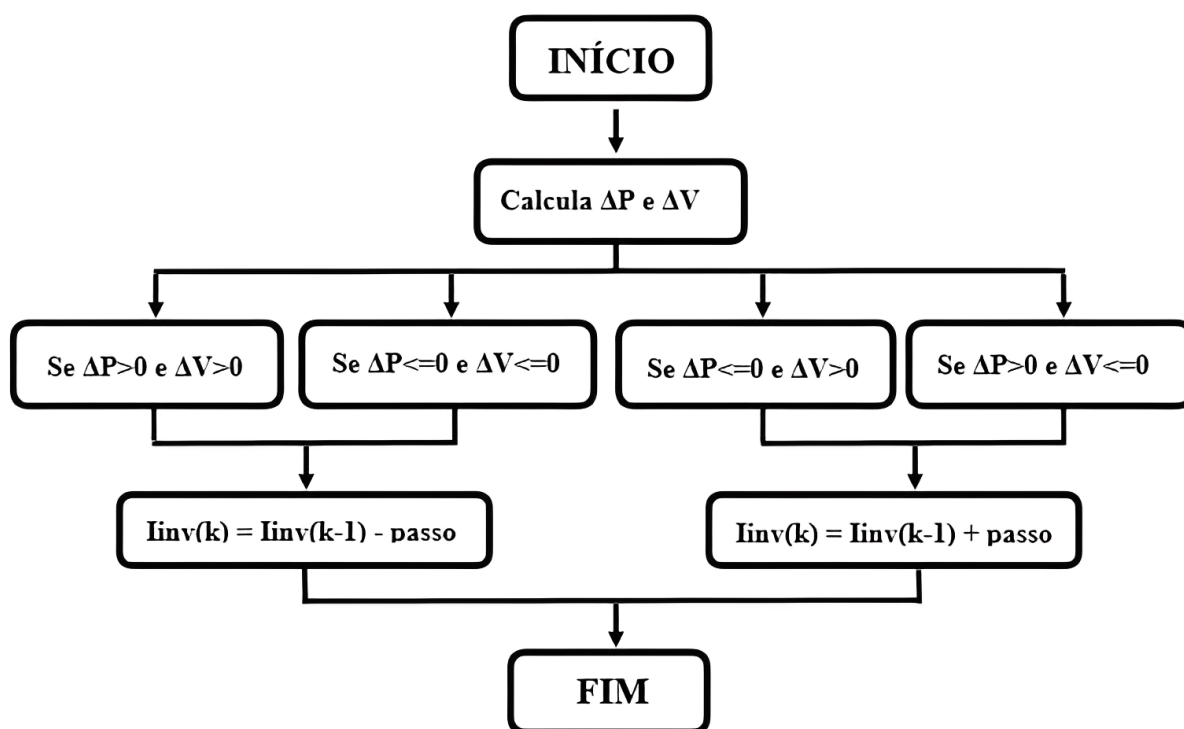
Há diversos tipos de estratégias de MPPT que são utilizados, o método da perturbação e observação (P&O), condutância incremental, amostragem da tensão de circuito aberto, controle por tensão constante, entre outros (VILLALVA, 2010). Neste trabalho, será utilizado o método da perturbação e observação (P&O), que se baseia na curva de potência do painel fotovoltaico. Esse método consiste em “perturbar” a tensão do arranjo e observar a potência de saída, se ela aumentar, a perturbação continua na mesma direção; caso contrário, ela muda de direção. Sendo assim, é possível alterar os parâmetros para ir se aproximando do ponto de máxima potência.

Portanto, há 4 casos principais definidos no MPPT (GIUDICI, 2016):

- $\Delta P > 0$ e $\Delta V > 0$: diminui-se a referência de corrente;
- $\Delta P \leq 0$ e $\Delta V \leq 0$: diminui-se a referência de corrente;
- $\Delta P \leq 0$ e $\Delta V > 0$: aumenta-se a referência de corrente;
- $\Delta P > 0$ e $\Delta V \leq 0$: aumenta-se a referência de corrente.

A Figura 8 a seguir mostra o fluxograma do algoritmo do método P&O.

Figura 8 – Fluxograma do algoritmo P&O

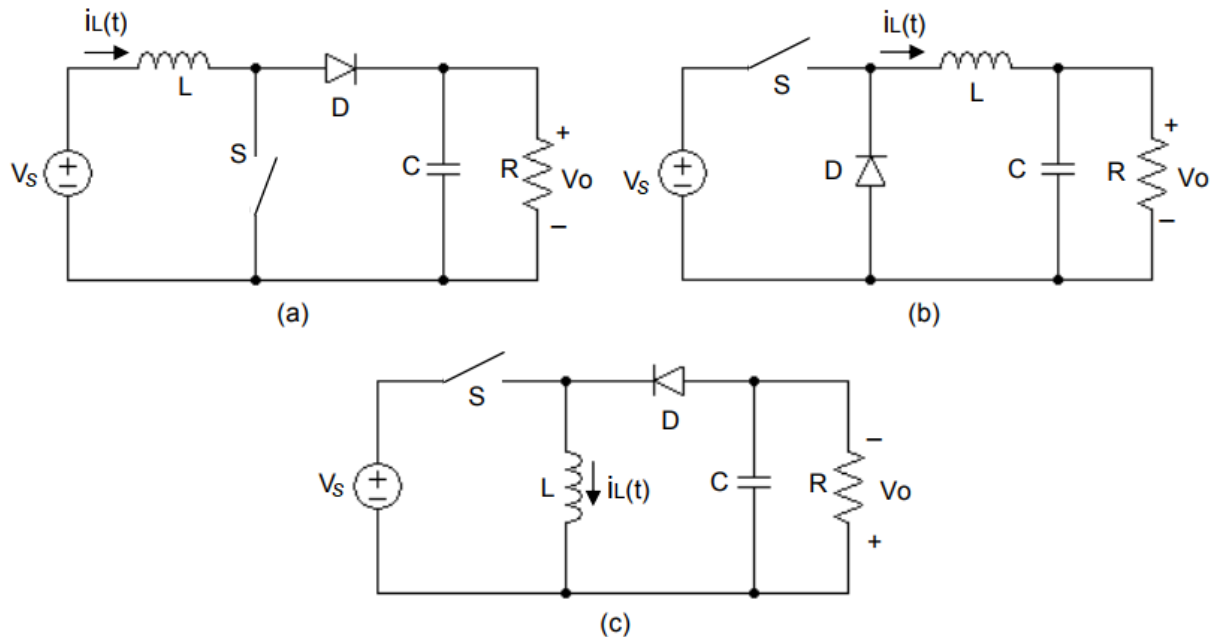


Fonte: Giudici (2016)

3 CONVERSOR CC-CC

Os conversores CC-CC são circuitos eletrônicos que convertem a tensão CC de entrada para diferentes níveis de tensão CC de saída, de forma regulada, a depender da topologia do sistema. Essas topologias são divididas em 3 tipos: o conversor *Step-Down* ou *Buck* (abaixador de tensão), o *Step-Up* ou *Boost* (elevador de tensão) e o *Buck-Boost* (abaixador-elevador de tensão). Na Figura 9 (a), (b) e (c) é mostrado o conversor *Buck*, o conversor *Boost* e o conversor *Buck-Boost*, respectivamente. O circuito de cada topologia apresenta o indutor (L), o capacitor (C), a resistência (R), o diodo (D) e a chave (S); a tensão de entrada e tensão de saída são representados por V_s e V_o , respectivamente, e a corrente no indutor como $i_L(t)$.

Figura 9 – Topologias dos conversores CC-CC: (a) Conversor *Boost* (b) Conversor *Buck* (c) Conversor *Buck-Boost*



Fonte: Seguel (2009)

A tensão de saída é controlada em níveis desejados pelo ajuste da taxa de trabalho, ou *duty cycle* (D), que é a fração do período de chaveamento que a chave está fechada, representada pela equação 3.1.

$$D = \frac{t_{lig}}{T} = t_{lig} \cdot f \quad (3.1)$$

Onde t_{lig} é o tempo em que a chave está conduzindo, T é o período de chaveamento e f a frequência de chaveamento.

De forma geral, os conversores CC-CC operam no modo de corrente contínua (MCC) e corrente descontínua (MCD). Se durante todo período de chaveamento a corrente no indutor permanece positiva, é conhecido como modo de condução contínua. O modo de condução descontínuo é caracterizado pela corrente no indutor retornando a zero durante cada período, o que não é considerado neste trabalho. A Tabela 1 apresenta o ganho estático em função da razão cíclica no MCC.

Tabela 1 – Ganho estático dos conversores CC-CC

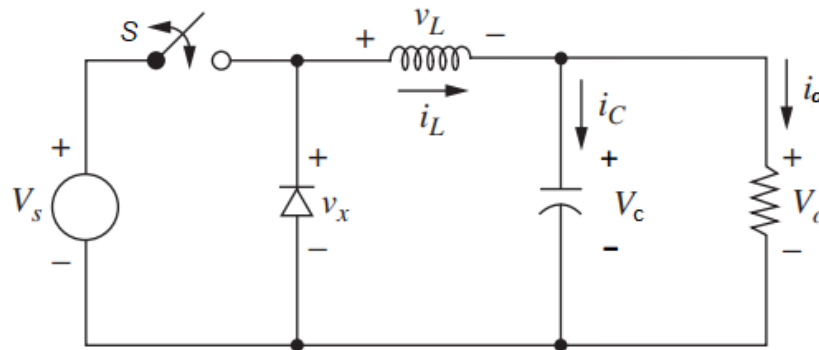
Conversor	Ganho Estático	Aplicação
<i>Buck</i>	D	abaixador
<i>Boost</i>	$\frac{1}{1-D}$	elevador
<i>Buck – Boost</i>	$\frac{D}{1-D}$	abaixador para $D < 0.5$ elevador para $D > 0.5$

Fonte: Deus (2018)

Como objeto deste trabalho, dentre os conversores apresentados, apenas o Conversor *Buck* será utilizado. Essa escolha é feita dando continuidade a aplicação deste conversor desde a pesquisa de iniciação científica.

3.1 Conversor CC-CC Buck

O conversor *Buck*, cujo circuito é ilustrado na Figura 10, tem como função obter uma tensão de saída menor que a tensão de entrada. A chave (S) corta o diodo quando está conduzindo, e a energia da fonte é transferida para o indutor (L) e para o capacitor (C). 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 10 – Conversor *Buck*

Fonte: Adaptado de Hart (2016)

Os equacionamentos que regem o funcionamento do conversor Buck são descritos conforme o comportamento do circuito para cada ciclo de comutação da chave, conforme mostrado a seguir.

Caso chave fechada:

$$V_s = L \frac{di_L}{dt} + V_c \quad (3.2)$$

$$i_L = C \frac{dV_c}{dt} + i_o \quad (3.3)$$

Caso chave aberta:

$$0 = L \frac{di_L}{dt} + V_c \quad (3.4)$$

Combinando essas equações utilizando o sinal de chave S conforme 3.5, são obtidas as equações 3.7 e 3.8.

$$S = \begin{cases} 1, & \text{se chave aberta} \\ 0, & \text{se chave fechada} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$S.V_s = L \frac{di_L}{dt} + V_c \quad (3.6)$$

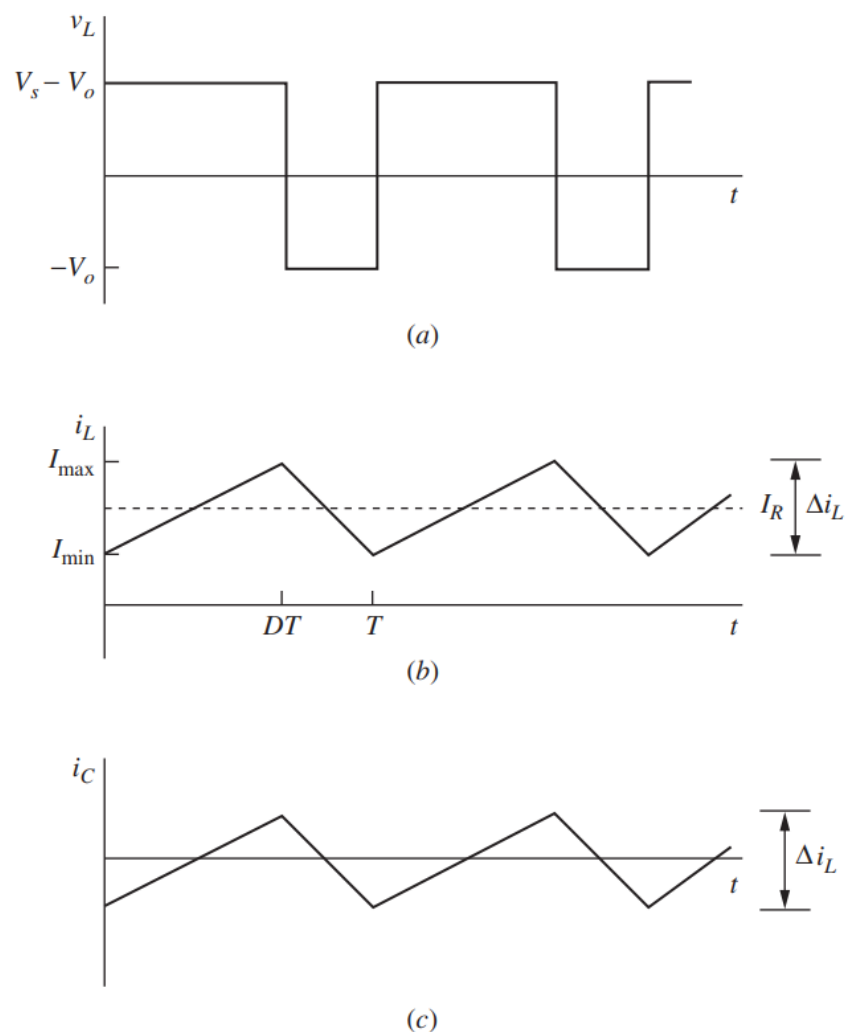
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{S.V_s - V_c}{L} \quad (3.7)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{i_L - i_o}{C} \quad (3.8)$$

3.1.1 Modo de Condução Contínua (MCC)

Na 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. O modo de operação nessa condição, da corrente no indutor permanecer positiva em todo período de chaveamento, é chamado de modo de condução contínua, conforme ilustrada na Figura 11(b) (HART, 2016).

Figura 11 – Formas de onda do conversor *Buck*: (a) Tensão no indutor (b) Corrente no indutor (c) Corrente no capacitor



Fonte: Hart (2016).

A partir do comportamento do elemento que transfere energia é possível obter uma relação entrada/saída, conforme a onda de tensão no indutor mostrado na Figura 11(a), sabendo que a tensão média no indutor é zero no período de funcionamento. Sendo assim, é possível obter a equação (3.9).

$$V_L = (V_s - V_o)DT + (-V_o)(T - DT) = 0 \quad (3.9)$$

Obtendo, após resolver para a taxa de trabalho(D):

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (3.10)$$

3.1.2 Dimensionamento do Conversor

Para o dimensionamento, considerando que será operado em modo de condução contínua (MCC), existe uma condição limite que define onde é iniciado o MCC, conforme a equação (3.11).

$$I_o = \frac{(V_s - V_o) D}{2Lf} \quad (3.11)$$

Assim, pode-se obter a equação (3.12).

$$L_{min} = \frac{(V_s - V_o) D}{2I_o f} \quad (3.12)$$

Que, em função da carga é escrito como (3.13)

$$L_{min} = \frac{(1 - D) R}{2f} \quad (3.13)$$

Para dimensionar o capacitor, é preciso conhecer a variação da tensão de saída ΔV_o , já que irá carregar e descarregar. Esse parâmetro é definido pelo projetista e conhecido mais adiante. O capacitor estará carregando quando a corrente nele estiver positiva e, pela definição da capacitância, temos a equação (3.14).

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V_o} \quad (3.14)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta I_o}{2} \right) = \frac{T \Delta I_o}{8} = \frac{\Delta I_o}{8f} \quad (3.15)$$

Logo,

$$\Delta V_o = \frac{\Delta I_o}{8V_o C f} \quad (3.16)$$

Sabendo que a variação da corrente é de acordo com a equação (3.17).

$$\Delta I_o = \frac{(V_s - V_o) D}{Lf} \quad (3.17)$$

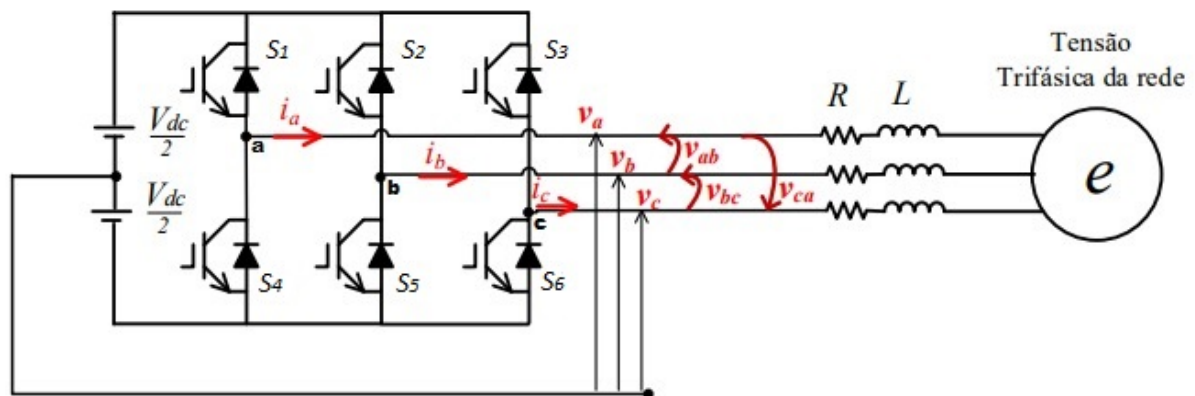
Substituindo (3.17) em (3.16), é possível encontrar a equação (3.18) para o valor do capacitor.

$$C = \frac{(V_s - V_o) D}{8L\Delta V_o f^2} = \frac{(1 - D) V_o}{8L\Delta V_o f^2} \quad (3.18)$$

4 INVERSOR CC-CA

Os inversores são utilizados para converter a tensão de entrada contínua (CC) em tensão de saída alternada (CA) sendo compatível em módulo, fase e frequência a rede elétrica. Essa conversão acontece quando a combinação na alternância das chaves provoca uma nova forma de onda para a tensão sobre a carga (FILHO, 2019a). Eles podem ser classificados em diversos tipos, conforme o número de níveis, a onda de saída e o tipo de comutação de chaveamento. Entre estes, o mais utilizado e abordado neste trabalho é o inversor de fonte de tensão (VSI, do inglês *Voltage Source Inverter*). Na Figura 12, é apresentado o Inversor Trifásico de dois níveis, com 6 chaves (S1 a S6) e 3 braços.

Figura 12 – Diagrama do VSI de dois níveis



Fonte: Adaptado de Francez (2021)

Da Figura 12, é possível ver a existência de 8 possíveis estados de chaveamento, conforme mostrada de forma detalhada na Tabela 2. O estado, representado pelo número 1, significa que a chave (S1 a S6) está conduzindo e o estado 0 significa que a chave não está conduzindo. Assim, o estado de chaveamento que possui três dígitos, como exemplo o 001, correspondem às pernas do inversor (abc) e pode-se concluir que as chaves S_1 e S_2 não estão conduzindo, referentes as pernas (a) e (b), respectivamente; porém, na perna (c) a chave S_3 está conduzindo. Existem dois estados de chaveamento, 000 e 111, em que a tensão de saída do inversor será nula.

De forma geral, considerando que as duas chaves em cada fase do inversor operam de forma complementar para evitar curto-circuito, o estado de comutação das chaves S_x , com $x = 1, \dots, 6$ pode ser representado pelos sinais de comutação S_a , S_b e S_c conforme a seguir

(RODRIGUEZ; CORTES, 2012):

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{se } S_1 \text{ on e } S_4 \text{ off} \\ 0 & \text{se } S_1 \text{ off e } S_4 \text{ on} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{se } S_2 \text{ on e } S_5 \text{ off} \\ 0 & \text{se } S_2 \text{ off e } S_5 \text{ on} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{se } S_3 \text{ on e } S_6 \text{ off} \\ 0 & \text{se } S_3 \text{ off e } S_6 \text{ on} \end{cases} \quad (4.3)$$

Esses sinais de comutação determinam o valor da tensão de saída:

$$V_a = S_a V_{dc} \quad (4.4)$$

$$V_b = S_b V_{dc} \quad (4.5)$$

$$V_c = S_c V_{dc} \quad (4.6)$$

Considerando o vetor unitário $\mathbf{a} = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, que representa a defasagem de 120° , o vetor de tensão de saída pode ser definido como:

$$\mathbf{v} = \frac{2}{3}(V_a + \mathbf{a}V_b + \mathbf{a}^2V_c) \quad (4.7)$$

Sendo assim, se o estado de chaveamento $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$, é possível obter \mathbf{V}_0 :

$$\mathbf{V}_0 = \frac{2}{3}(0 + \mathbf{a}0 + \mathbf{a}^20) = 0 \quad (4.8)$$

No caso de $(1, 0, 0)$:

$$\mathbf{V}_1 = \frac{2}{3}(V_{dc} + \mathbf{a}0 + \mathbf{a}^20) = \frac{2}{3}V_{dc} \quad (4.9)$$

Até chegar no ultimo estado $(1, 1, 1)$:

$$\mathbf{V}_7 = \frac{2}{3}(V_{dc} + \mathbf{a}V_{dc} + \mathbf{a}^2V_{dc}) = 0 \quad (4.10)$$

Com todas as possíveis combinações, são 8 estados de comutação e, portanto, 8 vetores de tensão são obtidos, como mostrado na Tabela 2. Como já dito, é observado que $\mathbf{V}_7 = \mathbf{V}_0$.

Tabela 2 – Estados de comutação e vetor de voltagem

S_a	S_b	S_c	Vetor \mathbf{V}
0	0	0	$\mathbf{V}_0 = 0$
1	0	0	$\mathbf{V}_1 = \frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$\mathbf{V}_2 = \frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$\mathbf{V}_3 = -\frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$\mathbf{V}_4 = -\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$\mathbf{V}_5 = -\frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$\mathbf{V}_6 = \frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	$\mathbf{V}_7 = 0$

Fonte: Rodriguez e Cortes (2012)

Por fim, por meio da Lei de *Kirchhoff*, é possível obter as equações 4.11 e 4.12 da corrente (FRANCEZ, 2021), no tempo contínuo, as quais serão de grande importância para implementação do controle MPC que será detalhado mais adiante.

$$\mathbf{v} = L\frac{d\mathbf{i}}{dt} + R\mathbf{i} + \mathbf{e} \quad (4.11)$$

Rearranjando:

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \frac{1}{L}[\mathbf{v} - \mathbf{e} - R\mathbf{i}] \quad (4.12)$$

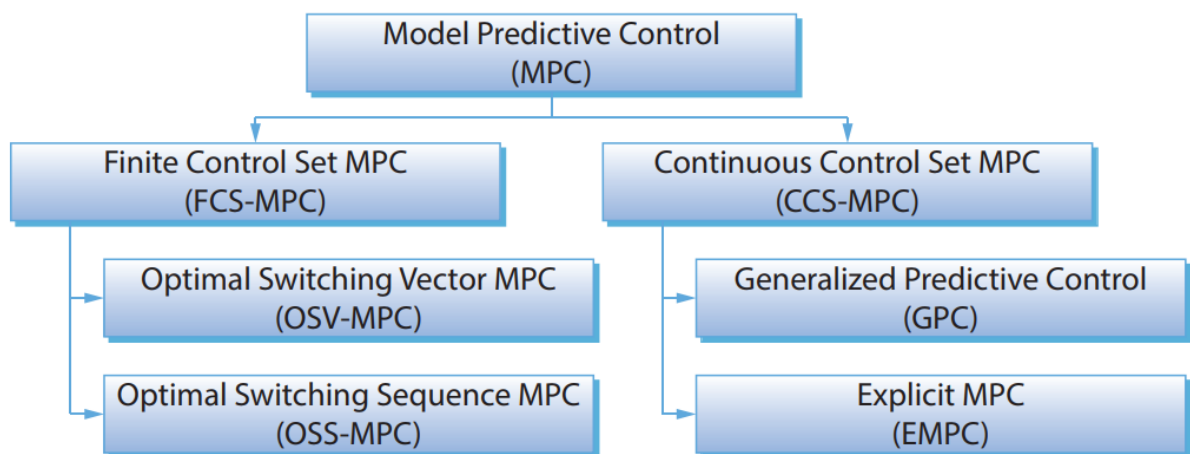
5 CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO

O Controle Preditivo Baseado em Modelo, do inglês *Model Predictive Control* (MPC), abrange uma classe muito ampla de controladores que são aplicados em conversores de potência e tem crescido devido a melhoria de microcontroladores digitais (VAZQUEZ et al., 2014). Em conversores de eletrônica de potência, a atuação de controle está limitada ao conjunto de estados de chaveamento possíveis do conversor, assim o MPC torna-se viável e facilmente implementável (TRICARICO, 2018).

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, 2019b).

Com base no tipo de problema de otimização, as técnicas MPC podem ser classificadas em dois tipos: *Continuous Control Set MPC* (CCS-MPC) e *Finite Control Set MPC* (FCS-MPC), conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Classificação do MPC aplicado a conversores de potência



Fonte: Vazquez et al. (2016)

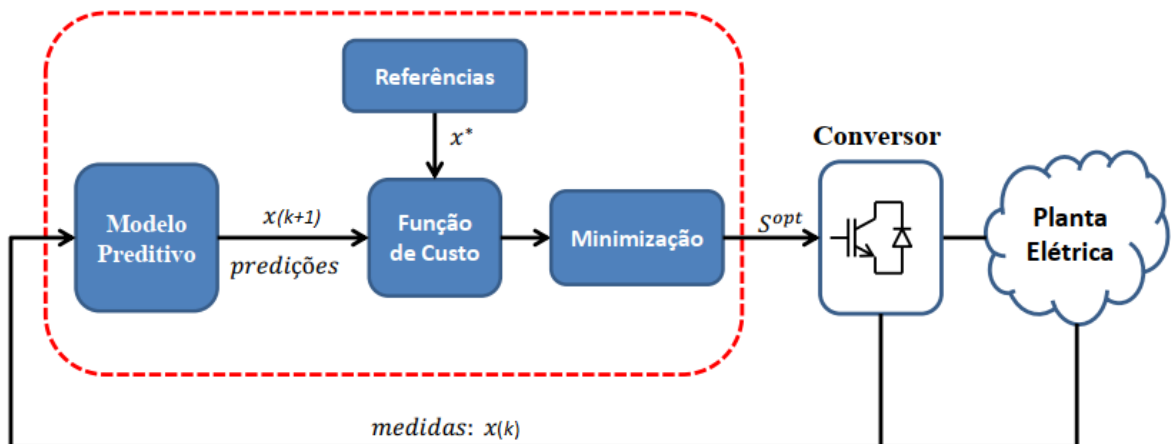
O tipo CCS-MPC calcula um sinal de controle contínuo e usa um modulador para gerar a tensão de saída desejada, com isso, produz uma frequência de comutação fixa, mas sua implementação torna-se mais complexa. Em contrapartida, o FCS-MPC utiliza da natureza discreta do conversor para formular algoritmos mais simples, sem a utilização de um modulador. Ele pode ser dividido em dois tipos, o *Optimal Switching Vector MPC* (OSV-MPC) e o *Optimal Switching Sequence MPC* (OSS-MPC) (VAZQUEZ et al., 2016). A principal diferença entre eles é em relação ao número de vetores que são aplicados em um tempo de amostragem (T_s), sendo que o OSV-MPC refere-se a um vetor em um T_s , enquanto OSS-MPC emprega uma sequência de vetores que se assemelha a um modulador convencional.

Sendo assim, esse trabalho se concentra no controlador FCS-MPC do tipo OSV-MPC, sendo, atualmente, a estratégia de MPC mais popular na eletrônica de potência (VAZQUEZ et al., 2016).

5.1 MPC aplicado ao Conversor CC-CC Buck

A técnica aplicada a um conversor é mostrada na Figura 14, onde x^k são as medidas de interesse do sistema no instante k , x^{k+1} são as saídas previstas 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 14 – Estrutura do controle preditivo aplicado a um conversor



Fonte: Tricarico (2018).

5.1.1 Modelo de tempo discreto

Conforme dito anteriormente, o MPC utiliza a natureza discreta do conversor e, por isso, as equações (3.7) e (3.8) precisam ser discretizadas. Utilizando o método de Euler, são obtidas as equações (5.1) e (5.3).

$$i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{T_s}{L}[S(k) \cdot V_s(k) - V_c(k)] \quad (5.1)$$

$$S(k) = \begin{cases} 1, & \text{se chave aberta} \\ 0, & \text{se chave fechada} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$V_c(k+1) = V_c(k) + \frac{T_s}{C}[i_L(k+1) - i_c(k)] \quad (5.3)$$

5.1.2 Função Custo

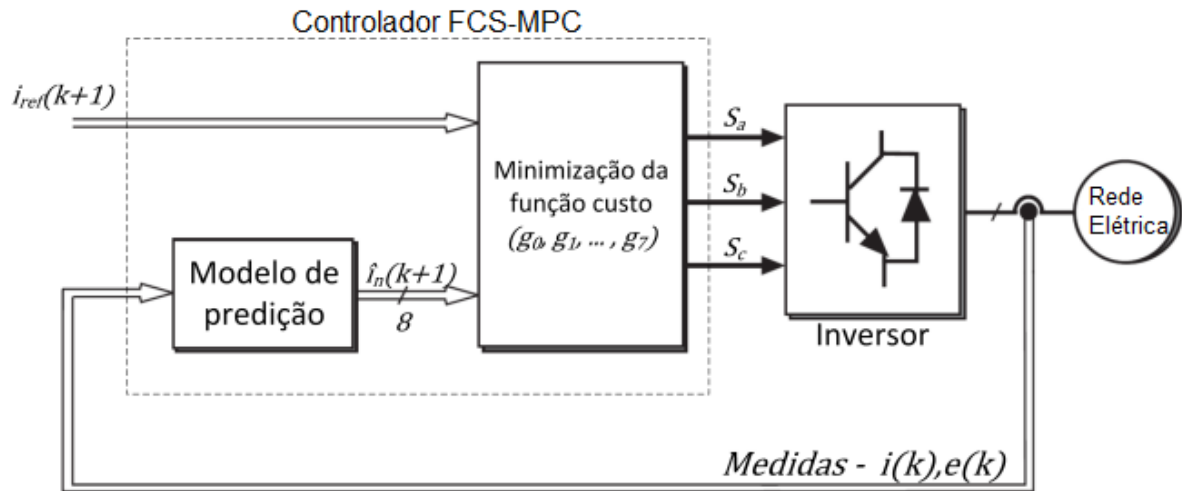
O objetivo da função custo é comparar um parâmetro de saída previsto do sistema com uma referência, sendo neste caso, a tensão de saída. As equação 5.4 mostra a função custo para esse objetivo de controle, onde $N = 1$ ou $N = 2$ possibilidades de chaveamento do conversor.

$$g = |V_{ref} - V_c^N(k+1)| \quad (5.4)$$

5.2 MPC aplicado ao Inversor CC-CA

A Figura 15 ilustra o esquemático do controle MPC com um inversor, que define o melhor estado de chaveamento a cada período de amostragem.

Figura 15 – Estrutura do controle preditivo aplicado ao inversor



Fonte: Martinelli (2018)

Para calcular os estados futuros da corrente ($\mathbf{i}(k+1)$), o controlador recebe as medidas de corrente do inversor e tensão da rede. Com o intuito de minimizar uma função custo, ele utiliza as informações de referência e dos estados previstos (MARTINELLI, 2018).

5.2.1 Modelo de tempo discreto

Assim como feito na aplicação ao conversor CC-CC, é preciso discretizar a equação da corrente 4.12 no tempo de amostragem T_s . O modelo de tempo discreto será usado para prever o valor futuro de corrente de saída a partir das correntes medidas no k -ésimo instante de amostragem (RODRIGUEZ; CORTES, 2012). Utilizando novamente o método de Euler, é obtida a equação 5.5 que, após isolado o termo $\mathbf{i}(k+1)$ obtém-se a equação 5.6, necessária para fazer o controle por corrente.

$$\frac{\mathbf{i}(k+1) - \mathbf{i}(k)}{T_s} = \frac{1}{L}[\mathbf{v}(k) - \mathbf{e}(k) - R\mathbf{i}(k)] \quad (5.5)$$

$$\mathbf{i}(k+1) = \mathbf{i}(k) + \frac{T_s}{L}[\mathbf{v}(k) - \mathbf{e}(k) - R\mathbf{i}(k)] \quad (5.6)$$

Como será mostrado na simulação, nesse trabalho foi utilizado o filtro L e, portanto, não é preciso considerar a resistência R nessas equações. Além disso, na equação 5.6, $v_{an}(k)$ é referente a uma das 8 possibilidades de tensão para a fase “a”, conforme observado na

Tabela 2. Sendo assim, obtemos a equação final para a fase “a” na equação 5.7, onde $N = 1 \dots 8$ possibilidades e $i_a^N(k+1)$ se refere a corrente no instante futuro que corresponde a cada uma dessas N tensões (FRANCEZ, 2021). O mesmo é feito para as demais fases.

$$\mathbf{i}^N(k+1) = \mathbf{i}(k) + \frac{T_s}{L}[\mathbf{v}^N(k) - \mathbf{e}(k)] \quad (5.7)$$

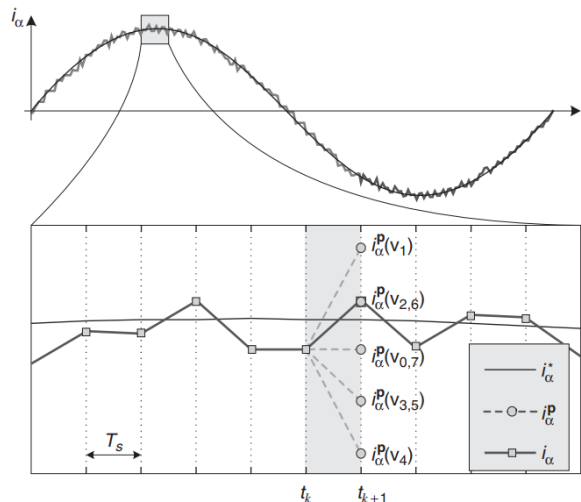
5.2.2 Função Custo

Conforme mostrado anteriormente na Figura 15, inicialmente é medida a corrente $i(k)$ na saída do inversor e a tensão $e_a(k)$ para, por meio do MPC, obter as correntes preditas $i(k+1)$ para as N possibilidades de chaveamento do inversor. É também definido a corrente i_{ref} que é calculada a partir do MPPT. Portanto, a função custo calcula o erro entre essa corrente de referência e as correntes preditas, conforme a equação 5.8 e, assim, o estado de chaveamento que fornece o menor erro será aplicado.

$$g = |i_{ref} - i^N(k+1)| \quad (5.8)$$

Desta forma, é esperado que a corrente do inversor siga a corrente de referência. Um exemplo é ilustrado na Figura 16, onde i_α^* é a corrente de referência e i_α a corrente predita do inversor.

Figura 16 – Corrente de referência e predita do inversor



Fonte: Rodriguez e Cortes (2012)

6 METODOLOGIA E PROPOSTA

6.1 Metodologia

Este trabalho pode ser classificado, segundo Prodanov e Freitas (2013), do ponto de vista da sua natureza como uma pesquisa aplicada que objetiva promover conhecimentos para aplicação prática guiados para a solução de problemas específicos, neste caso, para conversores de potência aplicados a um sistema fotovoltaico visando a eficiência e rapidez do processo.

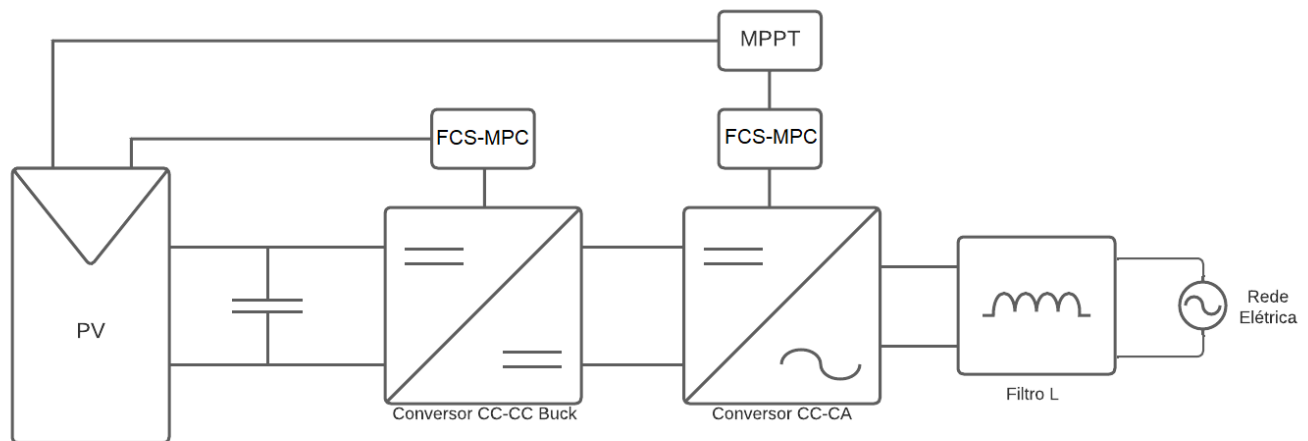
Com relação ao ponto de vista dos objetivos, refere-se a uma pesquisa explicativa, uma vez que é pretendido aprofundar no conhecimento do controle preditivo e utilizar de métodos experimentais por meio de simulações, fazendo manipulações e controlando variáveis para o registro e análise dos fenômenos observados.

Quanto aos procedimentos técnicos envolvidos, este trabalho se classifica como pesquisa experimental, cujo objeto de estudo foi determinado e variáveis de interesse são selecionadas para manipulação e observação dos efeitos produzidos, além de fazer análise desses resultados de forma quantitativa e do desempenho.

6.2 Proposta

De forma geral, a proposta deste trabalho é aplicar a técnica MPC e MPPT em um sistema completo partindo de um arranjo fotovoltaico, passando por um conversor CC-CC e um inversor CC-CA conectado a rede. Faz-se o uso do modelo preditivo para controlar a tensão de saída do conversor *Buck*, determinada em 600V e também para o controle do disparo das chaves do inversor, alinhado a estratégia MPPT, para o sistema operar em máxima potência, atendendo uma rede elétrica de 220V. A Figura 17 representa resumidamente o diagrama geral do trabalho em questão, que é simulado e analisado na seção 7.

Figura 17 – Topologia geral do sistema



Fonte: Produção do próprio autor.

6.3 Etapas de Desenvolvimento

Inicialmente, foi realizado o estudo em pesquisas bibliográficas tais como artigos de periódicos, dissertações e livros sobre os principais temas deste trabalho, são eles: o Modelo de Controle Preditivo (MPC), Sistemas Fotovoltaicos, Estratégia MPPT, Conversores de Potência e Rede Elétrica Trifásica. Posteriormente, foi necessário decidir a plataforma que seria utilizada para o ambiente de simulação, sendo o *Simulink* do *software* MATLAB. Além disso, dentre as opções de conversores, foi escolhido o conversor abaixador, conhecido como *Buck* e decidido a tensão de saída pretendida; com isso, o sistema fotovoltaico utilizado foi dimensionado com tensão acima desse valor conforme o arranjo fornecido por Giudici (2016). Da mesma forma, foi selecionado o inversor trifásico de dois níveis conectado a rede elétrica. Por último, dentre as inúmeras estratégias de MPPT, foi optado pelo método P&O por ser mais comumente e facilmente implementada.

A etapa seguinte foi o levantamento do equacionamento, modelagem do circuito e o dimensionamento dos conversores com o objetivo de atingir os parâmetros desejados. Após isso, foi desenvolvido o projeto aplicando as estratégias desejadas, começando com a aplicação do modelo preditivo no conversor implementando no ambiente de simulação com o objetivo de controlar a tensão de saída do conversor, tendo como entrada o sistema fotovoltaico. Em seguida, o mesmo foi feito para o inversor, mas agora alinhado ao algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência e utilizando do MPC para controlar as chaves do inversor com a finalidade de atender a rede e alcançar potência máxima. Também foi feito um controlador PI para controlar a tensão de saída do *Buck* visando compará-lo com a técnica principal deste projeto.

Por fim, com o ambiente de simulação montado, as principais variáveis foram selecionadas para serem observadas em forma de gráfico e validar todo conteúdo estudado e abordado neste trabalho. Sendo assim, foi possível fazer análises e discutir os resultados obtidos na simulação, bem como observar pontos a serem melhorados para futuros trabalhos.

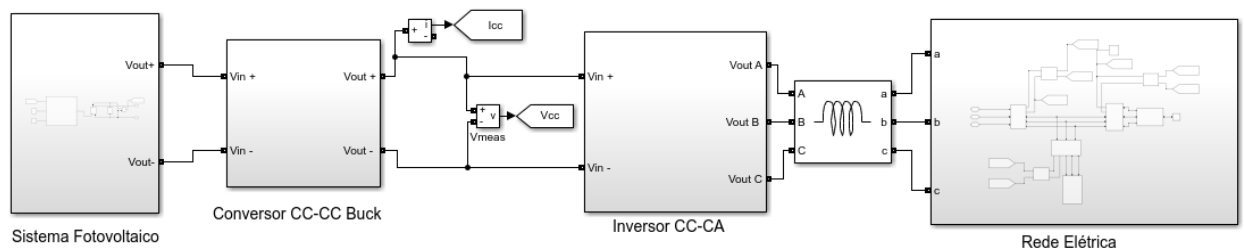
7 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

7.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados numéricos das equações apresentadas nas seções anteriores, a simulação do sistema completo proposto, mostrando e analisando cada parte envolvida. A simulação foi realizada na plataforma *Simulink* do *software* MATLAB. Por fim, é feita uma análise dos resultados obtidos, mostrando as vantagens da implementação do MPC.

O visual geral da simulação é apresentado na Figura 18, a partir disso, serão detalhadas as quatro partes (Sistema Fotovoltaico, Conversor CC-CC *Buck* com a aplicação do MPC, Inversor CC-CA com aplicação do MPC e Rede Elétrica) nas seções seguintes, além do resultado obtido com o foco na tensão de saída do conversor e o MPPT.

Figura 18 – Sistema completo do projeto simulado



Fonte: Produção do próprio autor.

7.2 Recursos Computacionais

O projeto foi realizado utilizando a máquina do próprio autor, com a seguinte configuração: (i) sistema operacional Windows 10; (ii) processador Intel Core i5-10400F, 2.90 GHz; (iii) memória RAM de 16 GB; (iv) unidade de armazenamento de 1TB (disco rígido); (v) placa de vídeo Nvidia GTX 1050 Ti.

Como material bibliográfico foram utilizados 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, foi utilizado o *software MATLAB/Simulink* da *Mathworks*.

7.3 Sistema Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico utilizado para a modelagem do sistema fotovoltaico deste trabalho foi o Canadian Solar CS6P-255P de 255Wp. Comumente os módulos são classificados sob condições de teste padrão (STC, do inglês *Standart Test Conditions*) com irradiância de $1000W/m^2$, temperatura da célula de $25^{\circ}C$, e massa do ar de 1,5 (TAVARES, 2009). A Tabela 3 apresenta suas características elétricas (GIUDICI, 2016).

Tabela 3 – Características elétricas do módulo CS6P-255P

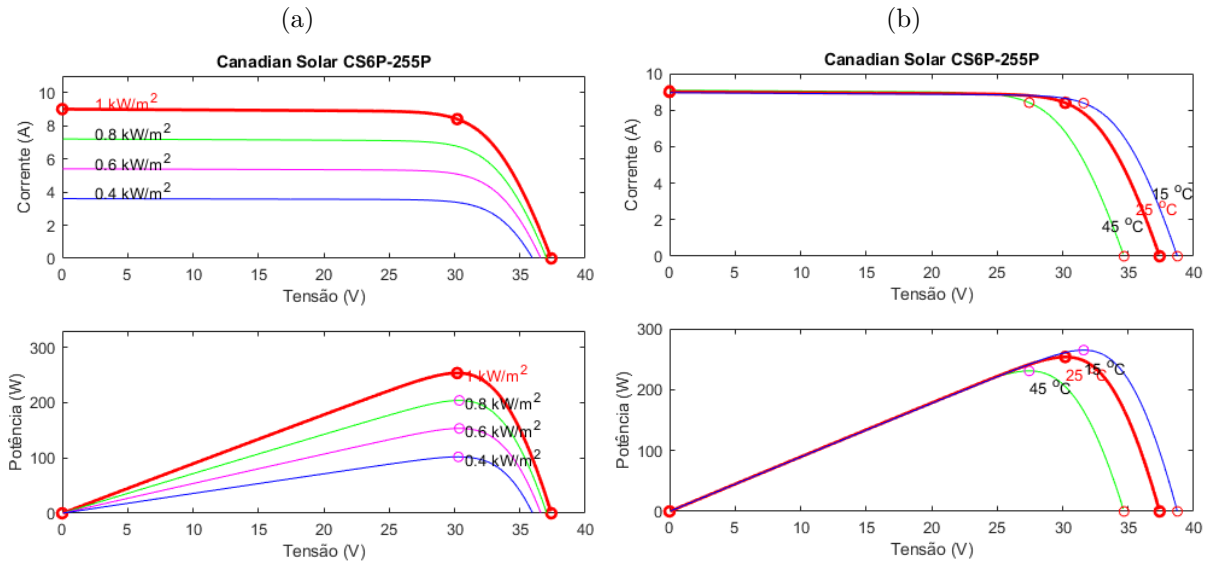
Dados Elétricos	Valor (STC)
Potência Máxima (W)	255
Tensão de Potência Máxima (V)	30,2
Corrente de Potência Máxima (A)	8,4
Tensão de Circuito Aberto (V)	37,4
Corrente de Curto Circuito (A)	9,0
Organização das células	60 (6x10)

Fonte: Produção do próprio autor.

O projeto fotovoltaico está disposto em 29 painéis em série e 10 painéis em paralelo, sendo assim, a tensão de operação do arranjo é aumentada em 29 vezes e a corrente em 10 vezes.

Conforme o conceito apresentado na seção 2 e as características do módulo fotovoltaico, foi possível simular as curvas características $I \times V$ e $P \times V$ do módulo sob diferentes valores de irradiância e temperatura, conforme a Figura 19.

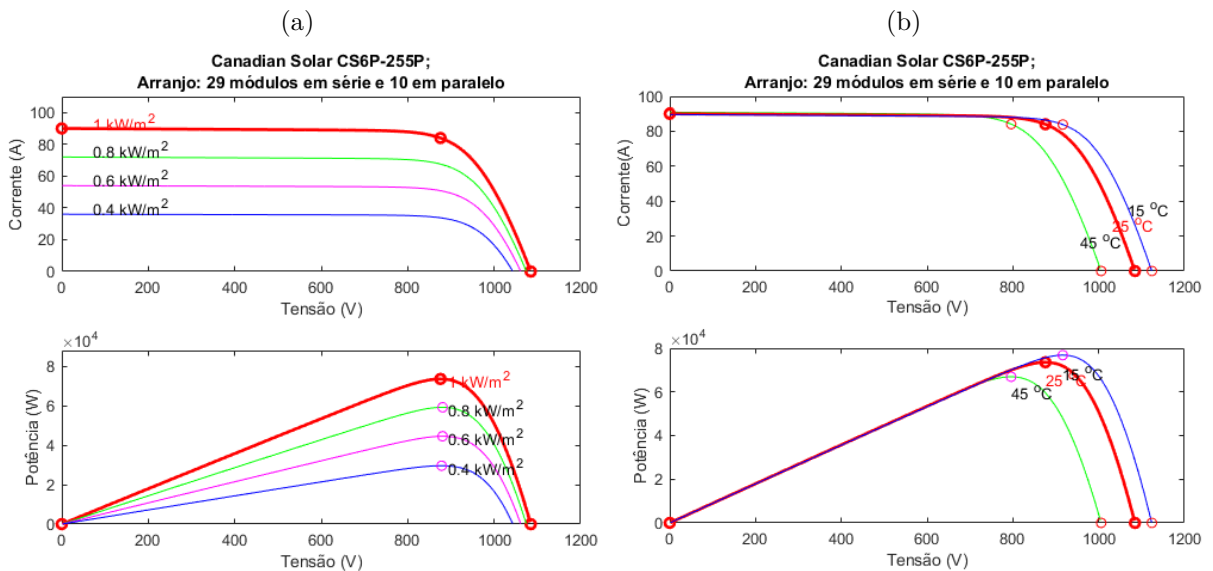
Figura 19 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ do módulo para diferentes valores: (a) de irradiância, (b) de temperatura



Fonte: Produção do próprio autor.

Além disso, considerando o arranjo fotovoltaico projetado, sob irradiância de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e temperatura de 25°C , foi possível verificar o valor de máxima potência de 73.567Wp a uma tensão de $875,8\text{V}$. A Figura 20 mostra as curvas características $I \times V$ e $P \times V$ deste arranjo obtidas na simulação sob diferentes valores de irradiância e temperatura.

Figura 20 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ do arranjo para diferentes valores: (a) de irradiância, (b) de temperatura



Fonte: Produção do próprio autor.

7.4 Conversor CC-CC Buck

7.4.1 Cálculo dos parâmetros

Para o dimensionamento do Conversor *Buck*, foram utilizadas as equações 3.10, 3.12 e 3.18 para encontrar os valores de L e C . Sabendo que $V_o = 600V$, $V_s = 1084,6V$ (29 módulos em série com $37,4V$ de tensão de circuito aberto cada um), $P = 73.567Wp$, $f = 10.000Hz$ e $\Delta V_o = 1V$, temos:

$$D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{600}{1084,6} = 0,5532 \quad (7.1)$$

$$I_o = \frac{P}{V} = \frac{73567}{600} = 122,61A \quad (7.2)$$

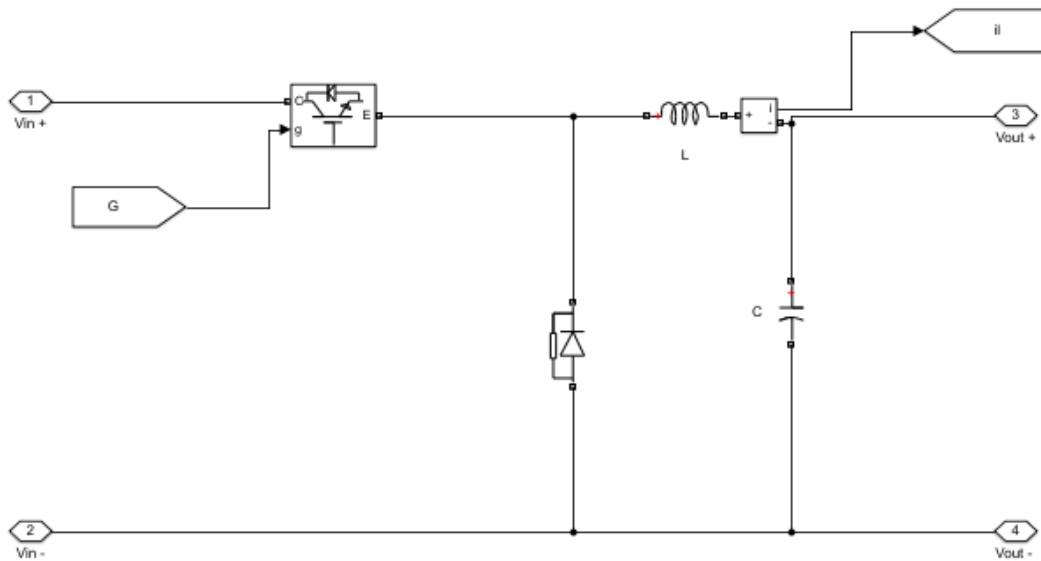
$$L_{min} = \frac{(V_s - V_o) D}{2I_o f} = \frac{(1084,6 - 600) 0,5532}{2.123,25.10000} = 109,32.10^{-6} \quad (7.3)$$

O valor de L_{min} representa o valor mínimo para manter o conversor em modo de condução contínua, sendo assim, pode-se escolher um valor acima deste. O valor escolhido foi $L = 115.10^{-6}$. Com isso, é possível encontrar o valor de C :

$$C = \frac{(1 - D) V_o}{8L \Delta V_o f^2} = \frac{(1 - 0,5532) 600}{8.115.10^{-6}.1.10000^2} = 3,0464.10^{-3} \quad (7.4)$$

Da mesma forma, o valor escolhido será $C = 3,1.10^{-3}$. Portanto, com esses parâmetros, o esquemático do Conversor Buck foi montado conforme a Figura 21.

Figura 21 – Circuito de simulação do Conversor Buck

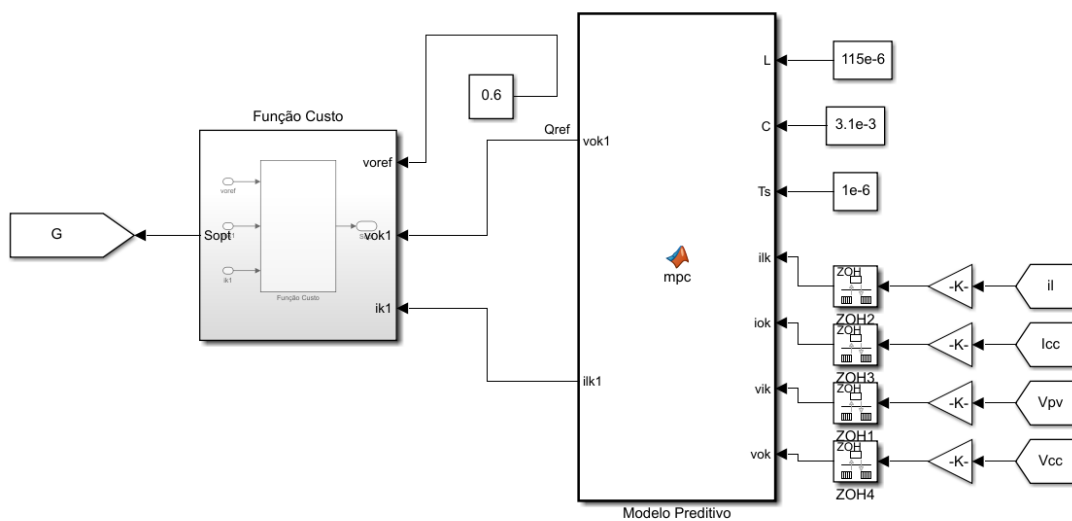


Fonte: Produção do próprio autor.

7.4.2 MPC aplicado ao Conversor Buck

Com a finalidade de obter uma tensão constante de 600V na saída do conversor, a técnica MPC foi implementada. A Figura 22 mostra os blocos onde foram inseridas as informações descritas na seção 5.1, com as equações no bloco “mpc” e a função custo. Como entrada estão os parâmetros calculados do valor do capacitor e indutor, também o valor do tempo de amostragem, e os demais valores são as medições das tensões e correntes de entrada e saída do conversor.

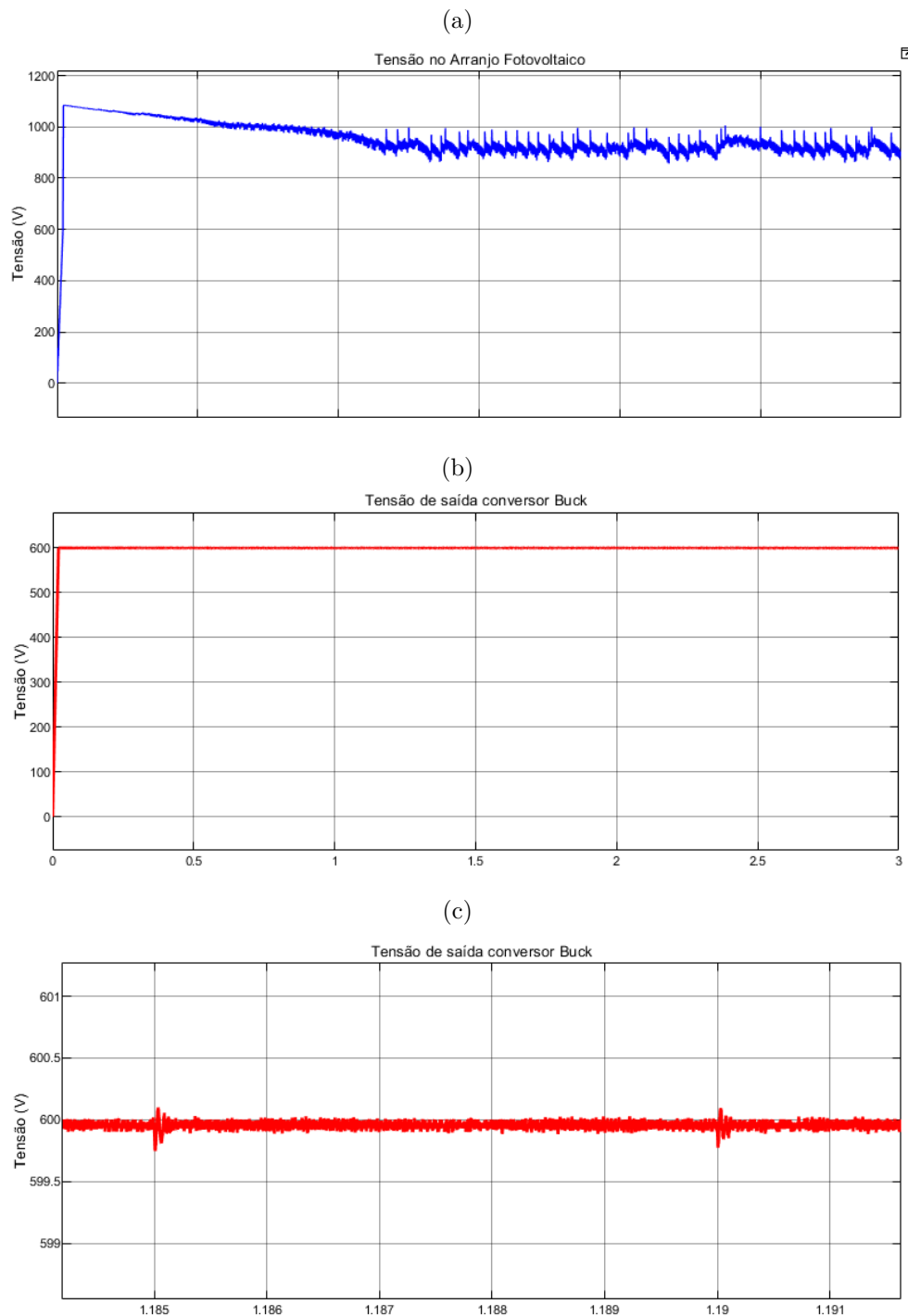
Figura 22 – Blocos da aplicação da técnica MPC no conversor *Buck*



Fonte: Produção do próprio autor.

A função custo é programada para calcular a diferença entre a tensão de referência e a tensão de saída, e ir alterando o estado de comutação da chave S , visando minimizá-la. O resultado da simulação é mostrado na Figura 23, onde é possível reparar a tensão na saída do conversor em 600V, alcançando esse valor de forma rápida e se mantendo praticamente constante, além de variar abaixo de 1V conforme mostrado na Figura 23c.

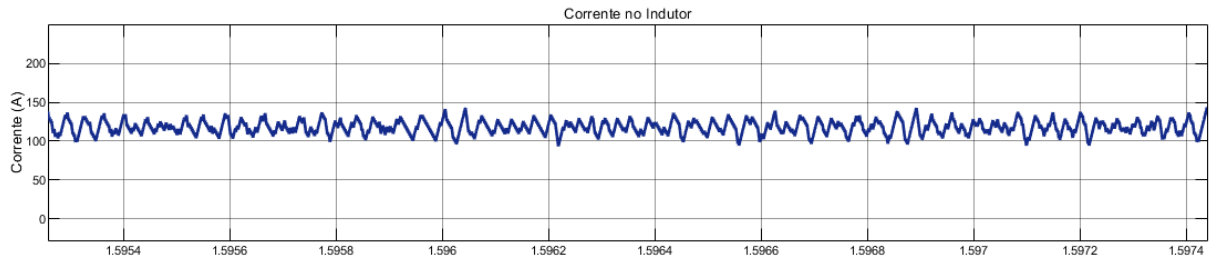
Figura 23 – Curvas resultantes da tensão: (a) na saída do arranjo fotovoltaico, (b) na saída do *buck*, (c) na saída do *buck* com aproximação via *zoom*



Fonte: Produção do próprio autor.

Com o propósito de validar o conceito apresentado na seção 3.1.1, um trecho da corrente que passa pelo indutor do conversor é apresentada na Figura 24, demonstrando que a corrente permanece positiva e, portanto, em modo de condução contínua.

Figura 24 – Corrente no Indutor do Conversor Buck

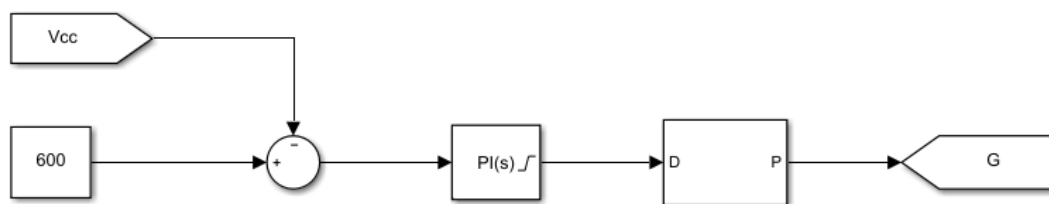


Fonte: Produção do próprio autor.

7.4.3 PI aplicado ao Conversor *Buck*

Com o intuito de comparar o resultado obtido com a técnica MPC, foi desenvolvido o projeto de um controlador PI (Proporcional Integral), via *PID Tuner* (Sintonizador PID) do *software* MATLAB, para controlar a tensão de saída do conversor Buck. O ganho proporcional (K_p) e ganho integral (K_i) foram de 0.0008 e 0.0257, respectivamente. A Figura 25 mostra o controle implementado em ambiente de simulação.

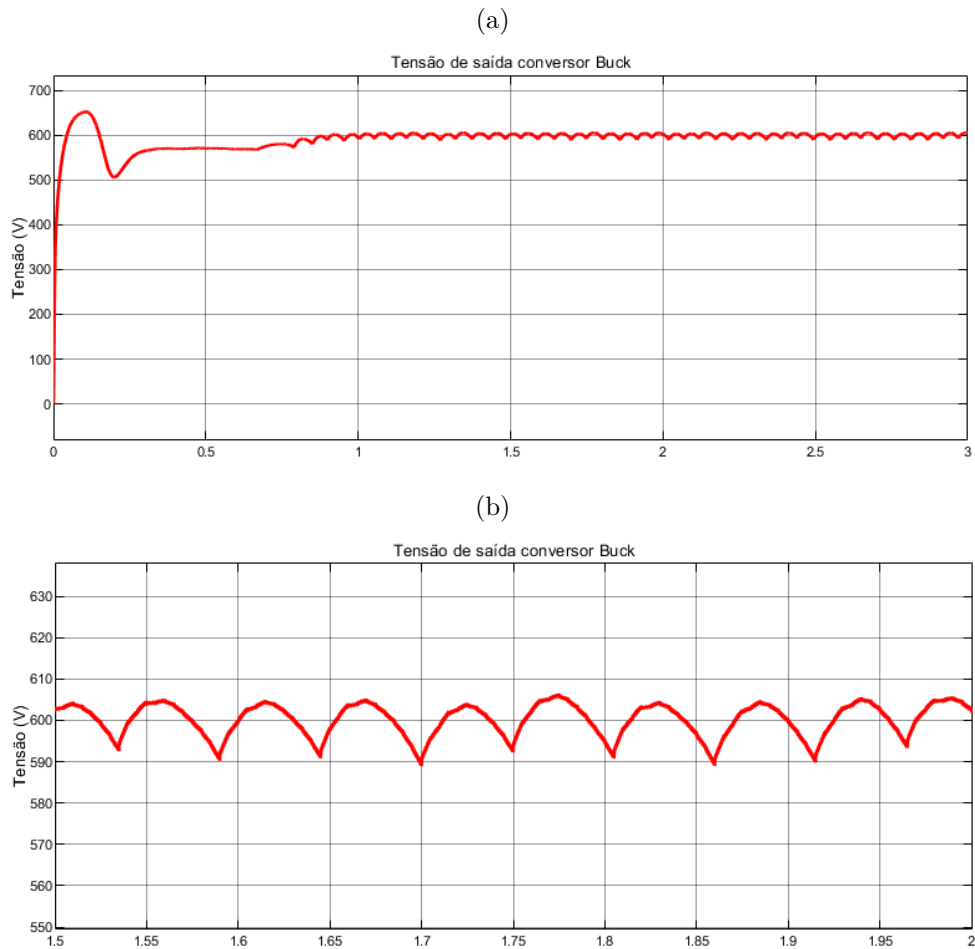
Figura 25 – Controlador PI no ambiente de simulação



Fonte: Produção do próprio autor.

Como resultado, foi obtido a curva de tensão apresentada na Figura 26. É observado que a curva oscila antes de atingir o valor de tensão esperado e não se mantém tão constante quanto com o uso do MPC, se mostrando mais lenta e com pior desempenho comparado a essa técnica.

Figura 26 – Curva da tensão de saída do conversor Buck com Controlador PI: (a) original, (b) com aproximação via *zoom*

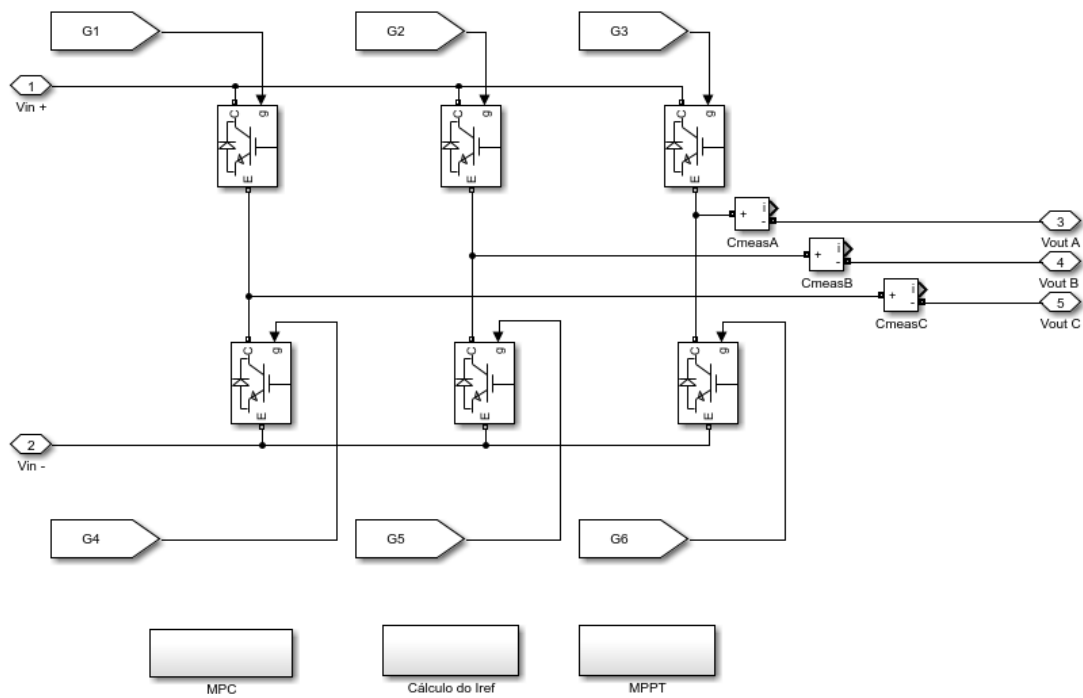


Fonte: Produção do próprio autor.

7.5 Inversor CC-CA conectado a Rede Elétrica

O diagrama simulado do inversor conectado a rede elétrica refere-se ao lado direito da Figura 18, onde há um filtro L entre o inversor e a rede. É utilizado o Inversor Trifásico de dois níveis, com 6 chaves, conforme mostrado na seção 4. A Figura 27 mostra o circuito do inversor que foi implementado no ambiente de simulação.

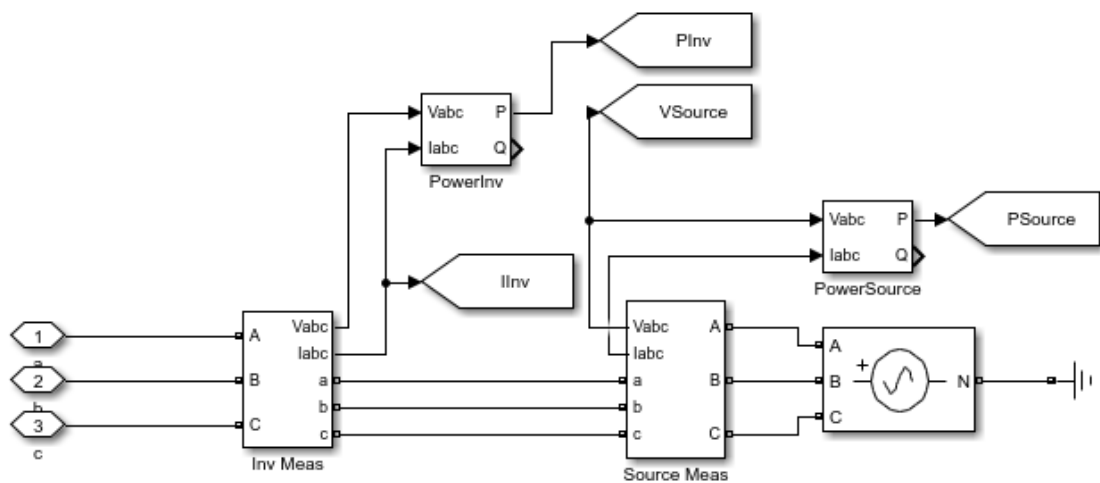
Figura 27 – Inversor Trifásico no ambiente de simulação



Fonte: Adaptado de Giudici (2016)

Após passar por um filtro L, ele é conectado a rede, que foi simulada com uma fonte trifásica de tensão de linha igual a 220V e frequência de 60Hz, como barramento infinito. A Figura 28 apresenta essa implementação no ambiente de simulação.

Figura 28 – Rede Elétrica no ambiente de simulação

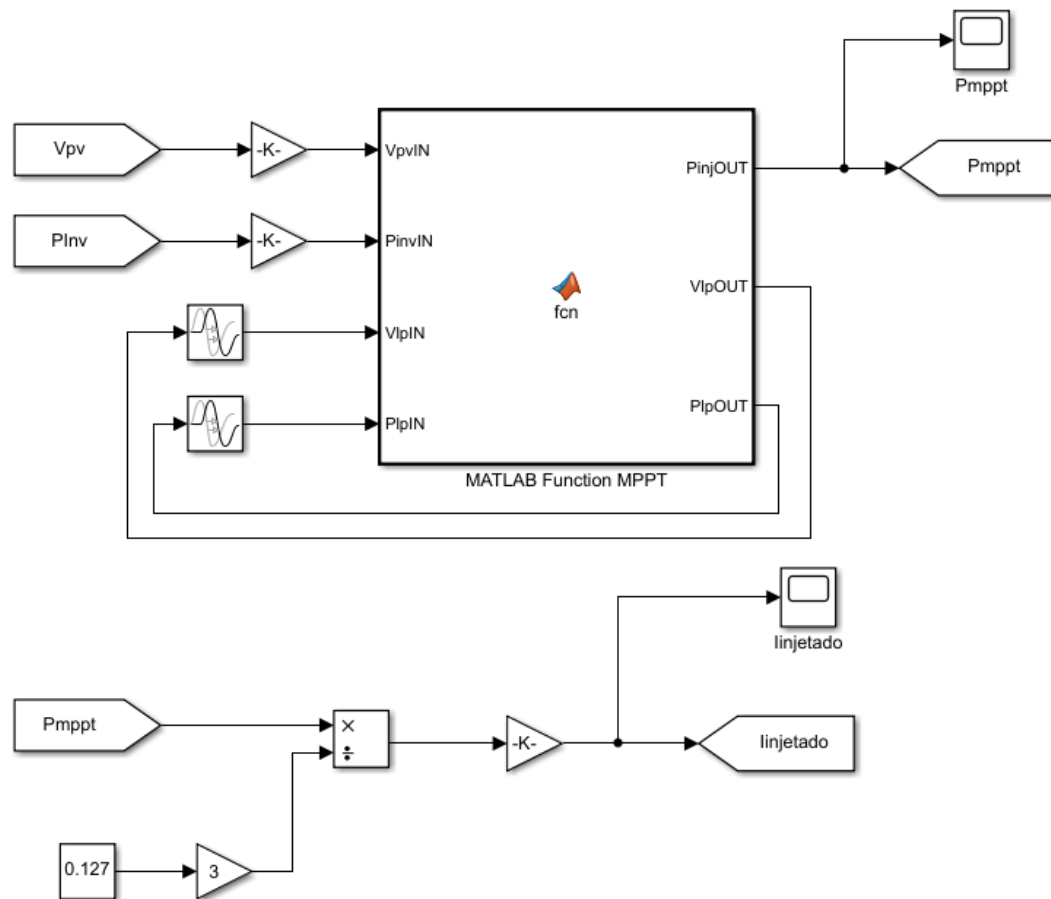


Fonte: Adaptado de Giudici (2016)

7.5.1 Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) e implementação do MPC ao Inversor

O rastreamento do ponto de máxima potência foi programado conforme o apresentado na seção 2.1. A Figura 29 mostra o bloco utilizado no ambiente de simulação para o MPPT. As entradas são a tensão do arranjo fotovoltaico e a potência do inversor, as saídas são esses dois sinais antigos que serão nova referência, e a potência máxima (P_{mppt}). Além disso, por meio dessa potência máxima é retirado um parâmetro de corrente “injetada” que é utilizado mais adiante para o cálculo da corrente de referência.

Figura 29 – Esquemático utilizado para o MPPT

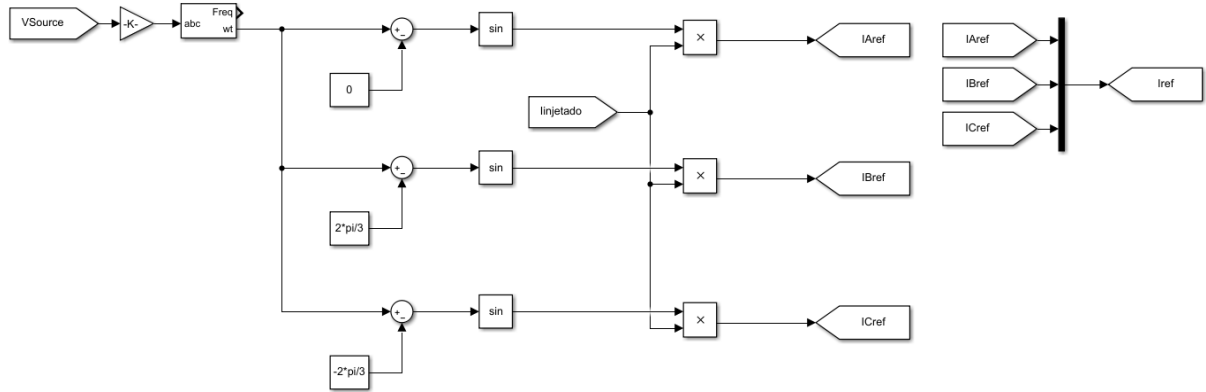


Fonte: Giudici (2016)

Após isso, para a implementação do Modelo Preditivo (MPC), faz-se necessário definir a corrente de referência que será usada na função custo para compará-la com a corrente predita, conforme conceituado na seção 5.2.2. Sendo assim, o esquemático responsável por calcular essa corrente de referência está apresentado na Figura 30, onde a entrada é a tensão da rede elétrica que passa por um PLL, que é um sistema que realiza a medida do ângulo de fase dessa rede, o qual é separado e deslocado em 0° , 120° e -120° . Em seguida, multiplica-se pela corrente “injetada” que foi encontrada anteriormente. A partir

disso, é encontrado o sinal da corrente de referência (i_{ref}). O PLL utilizado é baseado em referencial síncrono (SRF-PLL, do inglês *Synchronous Reference Frame PLL*) conforme observado em Kaura e Blasko (1997).

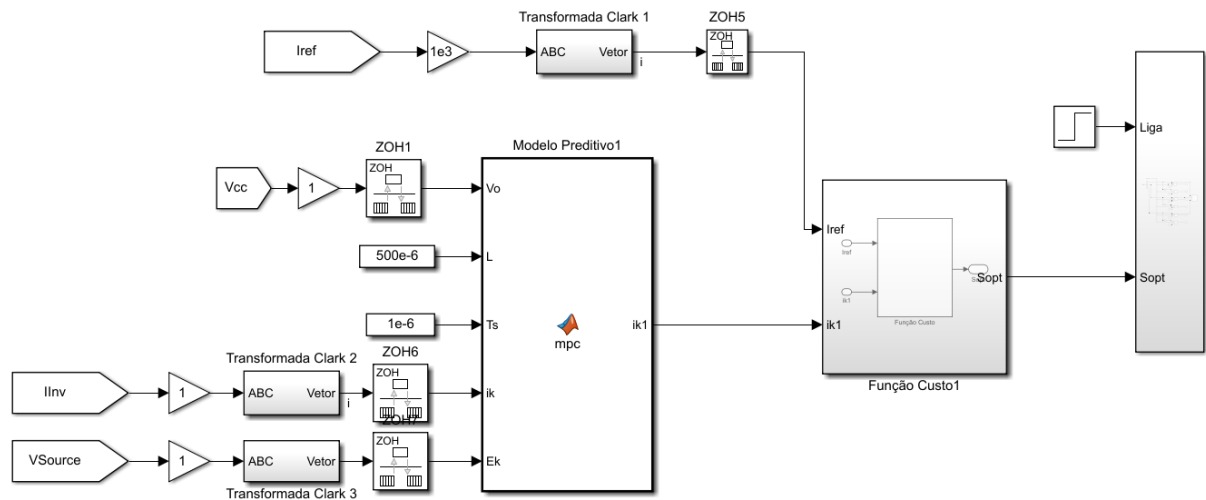
Figura 30 – Circuito para cálculo da corrente de referência



Fonte: Adaptado de Giudici (2016)

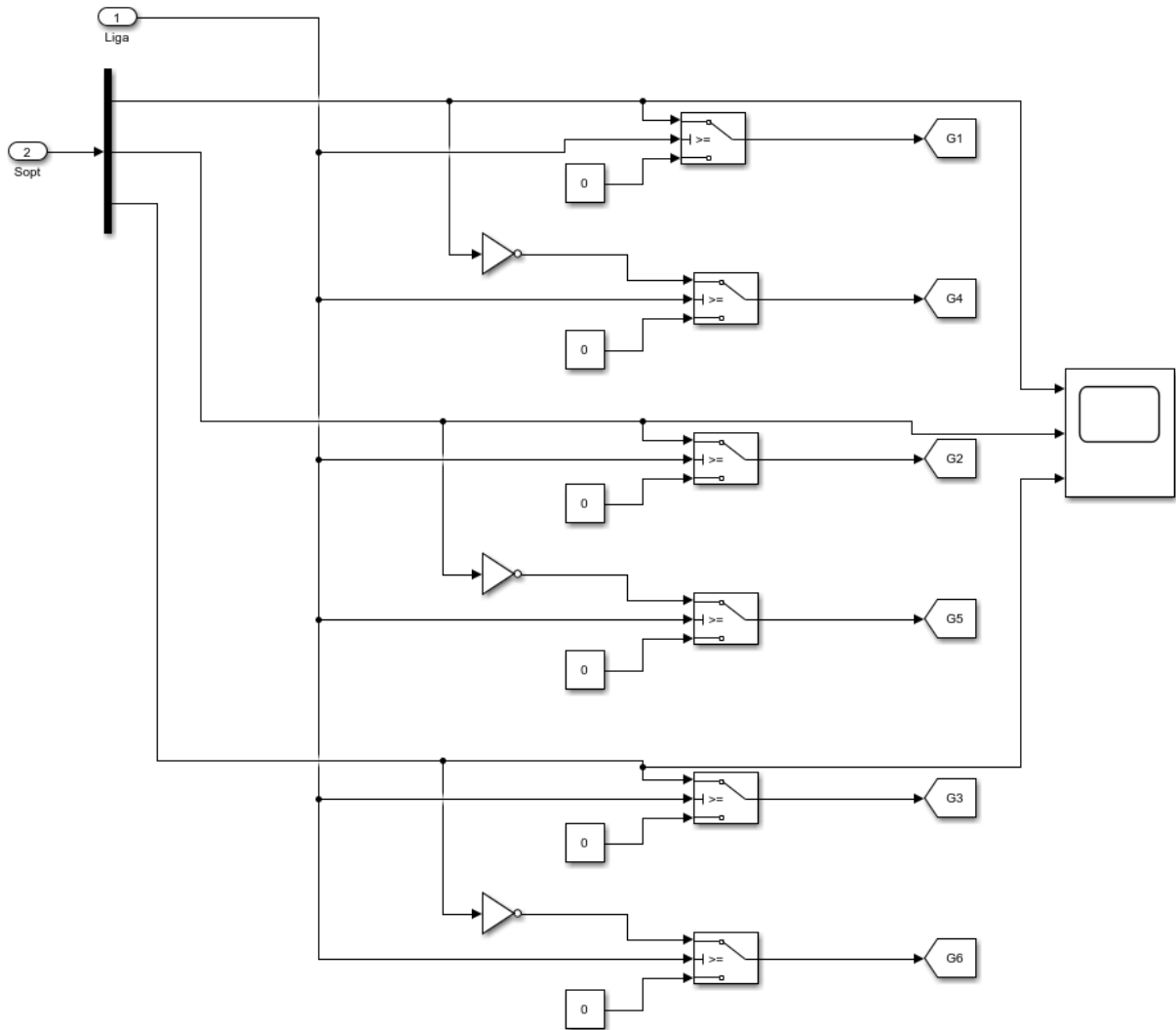
Finalmente, utilizando o controle preditivo, a corrente de referência é comparada a corrente predita por meio da função custo. A Figura 31 apresenta o esquemático do MPC utilizado para o inversor. O bloco “mpc” tem como entrada a tensão do conversor *Buck*, o valor de indutância do filtro L, as medições da corrente de saída do inversor e a tensão da rede, nele é calculado a corrente predita $i(k + 1)$, conforme as equações apresentadas na seção 5.2.1. O sinal obtido é enviado ao circuito de disparo para manipulação das chaves *S*, onde o bloco mais a direita faz o uso de um *switch* para comparar esse sinal com um *step* a fim de que os IGBT’s da mesma fase não entrem em condução juntos, evitando curto-circuito, conforme Figura 32.

Figura 31 – Controle Preditivo aplicado ao Inversor



Fonte: Produção do próprio autor.

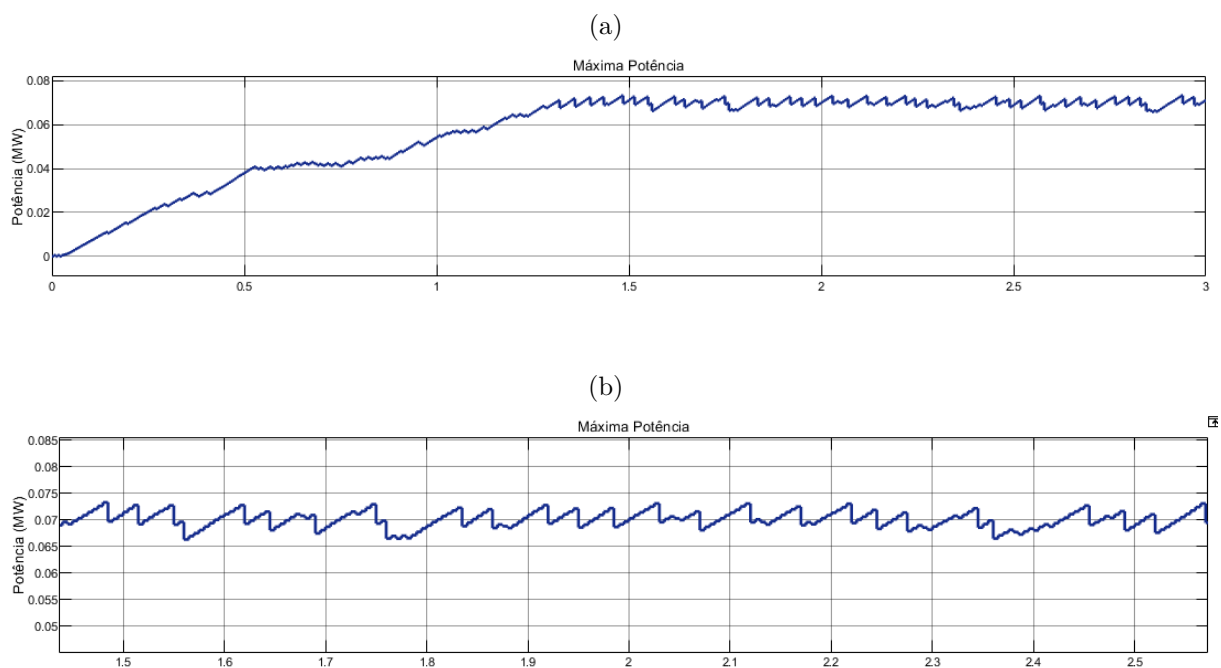
Figura 32 – Circuito de disparo



Fonte: Produção do próprio autor.

Sendo assim, com essa implementação, após executar a simulação foi possível obter a curva de potência mostrada na Figura 33. É observado que o valor de máxima potência ficou próximo aos 73,567kW esperado, com uma oscilação de, aproximadamente, 8,1%, correspondente a 6kW.

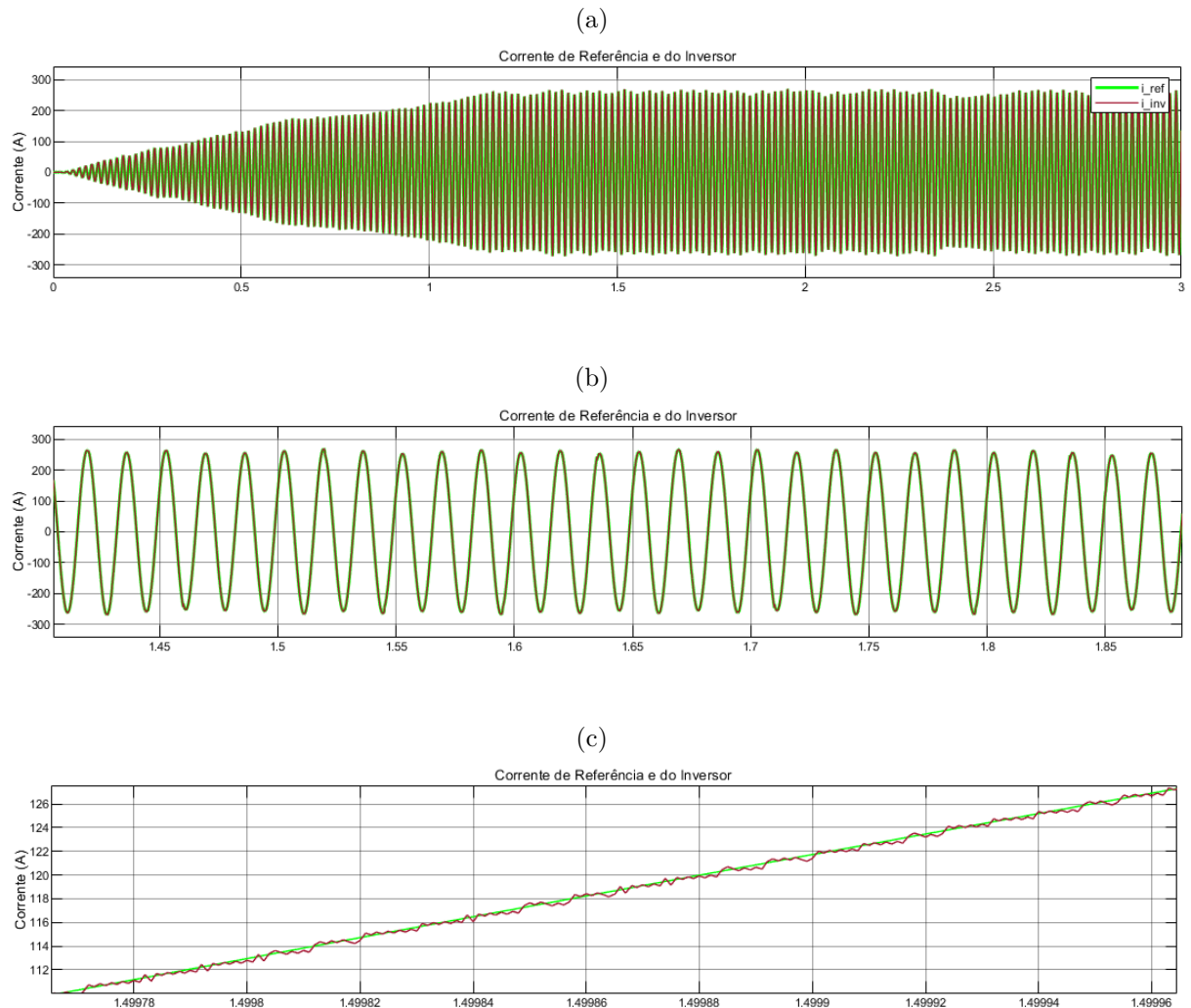
Figura 33 – Curva de máxima potência: (a) original, (b) com aproximação via *zoom*



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 34 mostra a corrente da fase “a” e a corrente de referencia também da fase “a”. Conforme apresentado na Figura 16 da seção 5.2.2, a corrente predita vai se aproximando e acompanhando a corrente de referência.

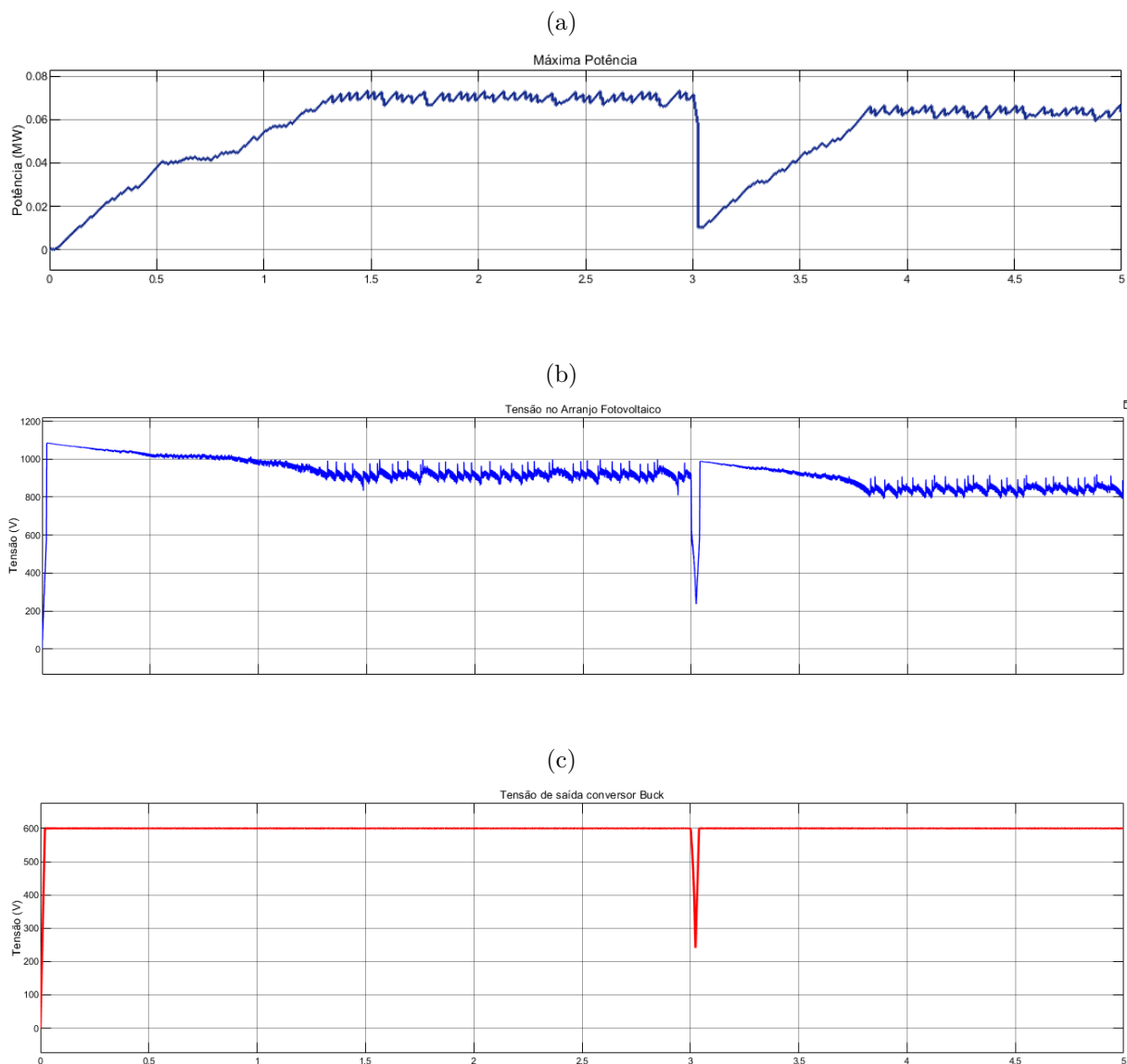
Figura 34 – Curva da corrente predita do inversor seguindo a corrente de referência: (a) original , (b) com aproximação via *zoom*, (c) com maior aproximação via *zoom*



Fonte: Produção do próprio autor.

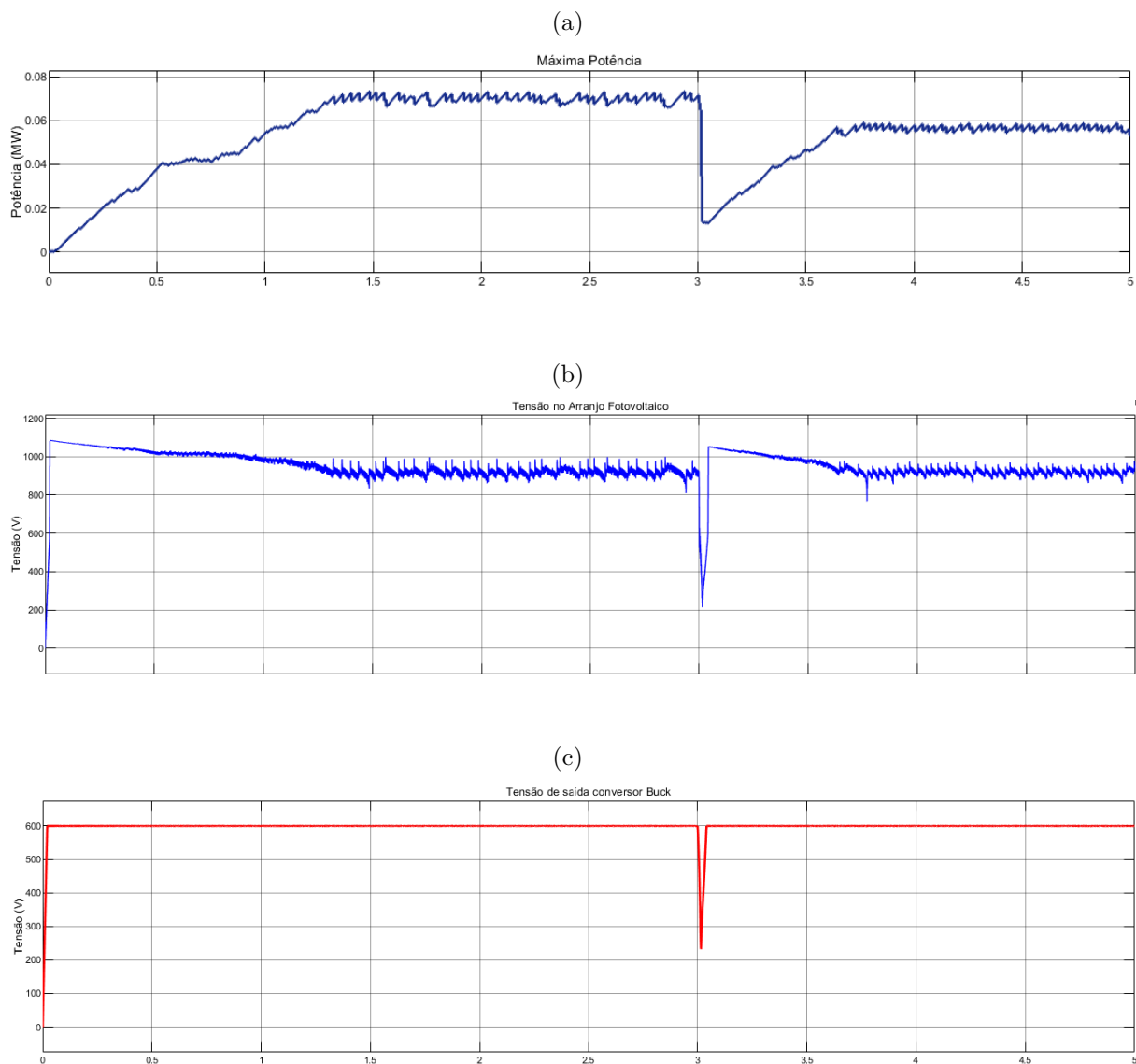
Com o propósito de analisar o comportamento do sistema para diferentes valores de irradiância e temperatura, foi feita a variação desses parâmetros diante de duas situações: para irradiância fixa e temperatura variando (Figura 35); e para irradiância variando e temperatura fixa (Figura 36). Observa-se que após 3 segundos, quando há a variação do parâmetro, o algoritmo volta a buscar o novo valor de máxima potência, que diminui com a redução da irradiância ou aumento da temperatura. Também é possível notar que a tensão do arranjo fotovoltaico, após estabilizar, diminui com a variação da temperatura e permanece a mesma com a variação da irradiância, resultados esperados após analisar as Figuras 19a e 19b.

Figura 35 – Curvas para irradiância de $1000W/m^2$ e temperatura variando de $25^{\circ}C$ para $45^{\circ}C$: (a) de máxima potência, (b) tensão do arranjo fotovoltaico, (c) tensão de saída do buck



Fonte: Produção do próprio autor.

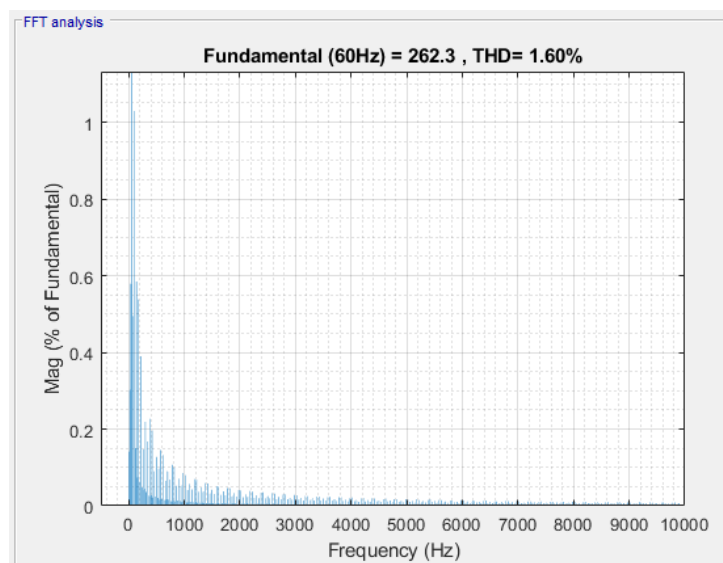
Figura 36 – Curvas para irradiância variando de $1000W/m^2$ para $800W/m^2$ e temperatura de $25^{\circ}C$: (a) de máxima potência, (b) tensão do arranjo fotovoltaico, (c) tensão de saída do buck



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, a Figura 37 apresenta o espectro harmônico da corrente de saída do inversor. A Distorção Harmônica Total (THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*) da corrente é de 1.60%.

Figura 37 – Espectro Harmônico da corrente do inversor



Fonte: Produção do próprio autor.

8 CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver um sistema desde a geração fotovoltaica ao fornecimento de energia para a rede. Contando com o conversor CC-CC e o inversor CC-CA, foi proposto utilizar da técnica de controle preditivo baseado em modelo para controlar a tensão de saída com conversor e, juntamente com a estratégia MPPT, controlar os estados de chaveamento do inversor para a melhor eficiência do mesmo e obter a máxima potência. A justificativa para a utilização dessa técnica de controle, em comparação as demais, é por oferecer uma resposta dinâmica com uma alta margem de estabilidade e, portanto, se torna adequada para essas aplicações em sistemas fotovoltaicos.

De forma a validar toda a teoria e estudos feitos sobre os temas mencionados no trabalho, foram realizadas simulações e apresentados os resultados dos principais parâmetros a serem analisados. O sistema fotovoltaico apresentou desempenho condizente com a expectativa; com relação ao controle da tensão de saída do conversor CC-CC, o desempenho foi satisfatório, com rapidez no alcance do valor quantitativo e boa estabilidade, além de ter melhor eficiência comparado ao controlador PI. O principal desafio foi no desenvolvimento do inversor em conjunto com a estratégia MPPT e controle preditivo, onde foi possível observar ruídos nas respostas, como na curva de máxima potência, sendo essa uma das desvantagens do OSV-MPC que, por não apresentar modulador e possuir frequência de chaveamento variável e não fixa, pode gerar ruídos e maiores variações de tensões e correntes, diminuindo o desempenho do sistema. Mesmo assim, foram encontrados resultados satisfatórios, os quais foram apresentados nesse trabalho. Sob essa perspectiva, foi possível notar resultados coerentes quanto a resposta do controle preditivo junto ao MPPT aplicado ao inversor, observando o gráfico da corrente e o de potência, que obteve valor próximo ao necessário para atingir seu valor máximo.

Como trabalhos futuros, uma abordagem que pode ser feita é utilizando diferentes métodos da estratégia MPPT, como por exemplo a condutância incremental. Pensando em análises mais comparativas, um trabalho mais completo utilizando outros controles pode ser interessante para validar as principais diferenças entre eles. Ademais, pode-se implementar os diferentes tipos de modelo preditivo que foram apresentados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

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 15 e 16.

DEUS, F. R. A. de. **Estudo Comparativo entre Técnicas de Controle Aplicadas em um Conversor Buck**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018. Citado na página 25.

FILHO, E. A. S. **Estudo do PWM espaço vetorial para o inversor de dois-níveis para carga trifásica**. Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - Pró-reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa — Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019. Citado na página 30.

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 15, 16, 17 e 33.

FRANCEZ, W. T. **Estudo comparativo de estratégias de controle e chaveamento convencionais com estratégias de controle preditivo baseado em modelo aplicado a conversores trifásicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 30, 32 e 37.

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 8 vezes nas páginas 17, 22, 23, 39, 42, 49, 50 e 51.

HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

KAURA, V.; BLASKO, V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 1, p. 58–63, 1997. Citado na página 51.

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 16.

MARTINELLI, B. Z. **Aplicações de Técnicas de Controle Preditivo Baseado em Modelo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Citado na página 36.

- 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 15, 21 e 22.
- 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 17.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**, 2. ed. Feevale: [s.n.], 2013. Citado na página 38.
- RODRIGUEZ, J.; CORTES, P. **Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives**. [S.l.]: John Wiley Sons, Ltd, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 36 e 37.
- 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 17.
- SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Citado na página 24.
- TAVARES, C. A. P. **Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 42.
- 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 3 vezes nas páginas 16, 33 e 34.
- 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 2 vezes nas páginas 16 e 33.
- 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 3 vezes nas páginas 16, 33 e 34.
- VILLALVA, M. G. **Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 15, 19, 20 e 22.