



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

CONEXÃO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Mariana Rabelo Ribeiro

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Maurício Aredes

Rio de Janeiro

Agosto de 2015

CONEXÃO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Mariana Rabelo Ribeiro

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA ELETRICISTA.

Examinada por:

Prof. Maurício Aredes, D.Sc.

(Orientador)

Eng. Paulo Max Maciel Portugal, D.Sc.

(Co-Orientador)

Eng. Bruno Wanderley França, M.Sc.

Rio de Janeiro

Agosto de 2015

Ribeiro, Mariana Rabelo

Conexão de um Sistema Solar Fotovoltaico à Rede de Distribuição de Energia Elétrica / Mariana Rabelo Ribeiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

VIII, 61p.: il.; 29,7cm

Orientador: Maurício Aredes

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/

Curso de Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 59

1. Introdução. 2. Arranjo Fotovoltaico. 3. Conversores de Potência. 4. Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência. 5. Sistema Fotovoltaico. 6. Resultados. 7. Conclusão. I. Aredes, Maurício. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. III. Conexão de um Sistema Solar Fotovoltaico à Rede de Distribuição de Energia Elétrica

Escola Politécnica – Departamento de Engenharia Elétrica
Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária.
Rio de Janeiro – RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e aos meus pais, Lúcia Rabelo Ferreira e Paulo José Rosa Ribeiro, por terem proporcionado todas as condições para que eu pudesse me dedicar em tempo integral às atividades acadêmicas desta Universidade e de todas as outras instituições de ensino as quais eu fiz parte. Agradeço a minha mãe por ter me dado todo o apoio emocional que precisei ao longo desses anos e ao meu pai por sempre me incentivar a pensar no que eu queria para o meu futuro.

Agradeço às minhas irmãs, Luciana Rabelo Ribeiro e Giovana Amarante Ribeiro. À Lu por ter me ajudado no dia a dia, por estar sempre disposta a ouvir mesmo quando não fazia menor ideia do assunto em questão; à Gigi por entender minha ausência devido às provas, trabalhos e execução deste projeto.

Agradeço também ao Matheus Galluzzi Malafaia que me acompanhou desde o segundo período da faculdade, por ter sido meu porto seguro, por ter secado minhas lágrimas muitas vezes derramadas por bobagens e por cálculos e físicas do ciclo básico. À minha grande amiga Maynara Aredes, por fazer o dia durar 30 horas e assim ter tempo de me ajudar (e muito) neste trabalho e por rir comigo depois do desespero e adrenalina que as provas que o ciclo profissional nos submeteram. À Raquel Mattoso, por ter entrado na minha vida e por permanecer nela em momentos muito além da faculdade.

Agradeço ainda aos meus professores ao longo do curso, e em especial, ao professor Heloi, pela inspiração e por sempre falar “como é o mundo lá fora”, à professora Tatiana, pelas melhores aulas que eu tive nesta Universidade, ao professor Sérgio, por toda dedicação aos alunos, como professor e coordenador e ao professor Rubens, por ter me acolhido em seu laboratório e por acreditar sempre em mim. Quero ainda agradecer ao meu orientador Maurício Aredes por ter aceitado este projeto e ao meu co-orientador, Paulo Max, por ter se dedicado e me apoiado nos momentos de maior aflição.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à Katia por ser a melhor secretária de departamento que esta instituição já viu, por ser atenciosa, por conversar e estar sempre disposta a ouvir. Agradeço também ao professor Oumar, que apesar de não ter lecionado a minha matéria preferida, sempre fez o seu trabalho com destreza e foi sempre solícito nos momentos que precisei.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

CONEXÃO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Mariana Rabelo Ribeiro

Agosto/2015

Orientador: Maurício Aredes

Curso: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta um estudo sobre a conexão de um sistema de geração solar fotovoltaico à uma rede de distribuição de energia elétrica. É apresentada a estrutura de um sistema desse tipo e os elementos que a compõe. Genericamente, fez-se uso de um conversor CC-CC tipo Buck-Boost, de um conversor CC-CA do tipo fonte de tensão e de 9 painéis fotovoltaicos Kyocera KC130TM conectados em série. O estudo foi modelado e simulado no software PSCAD/EMTDC.

O sistema foi simulado considerando uma radiação de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e temperatura de 25°C para verificação do modelo e então foi exposto à perturbações como: variações de radiação e temperatura e execução de um curto-circuito trifásico do lado da rede de distribuição, tendo apresentado resultados satisfatórios para todos os casos.

Palavras-Chave: energia solar, fotovoltaico, conversor, inversor.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

CONEXÃO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Mariana Rabelo Ribeiro

Agosto/2015

Advisor: Maurício Aredes.

Department: Electrical Engineer.

This paper presents a study on the connection of a photovoltaic solar system to an electrical power distribution network. The structure of such a system and its components are described and modeled in a digital simulator. A Buck-Boost DC-DC converter is employed to realize the maximum-power-point-tracking (MPPT); a DC-AC voltage-source converter connects the PV system to the ac grid. The modeled PV system corresponds to nine Kyocera KC130TM PV-panels connected in series. The study has been carried out in the PSCAD/EMTDC Electromagnetic Transient Program.

The system was simulated considering a radiation of $1000\text{W}/\text{m}^2$ and 25°C in order to validate the PV model. After that, some disturbances were applied to evaluate the performance of the controllers. Basically, three kinds of disturbances were evaluated: (a) changes of solar radiation, (b) changes in PV-cells temperature and (c) three-phase fault on the ac bus (point Of common coupling). The design of the controllers and their gains' adjustment proved to be adequate, since good results were obtained in all disturbance cases.

Key-words: solar energy, photovoltaics, converters.

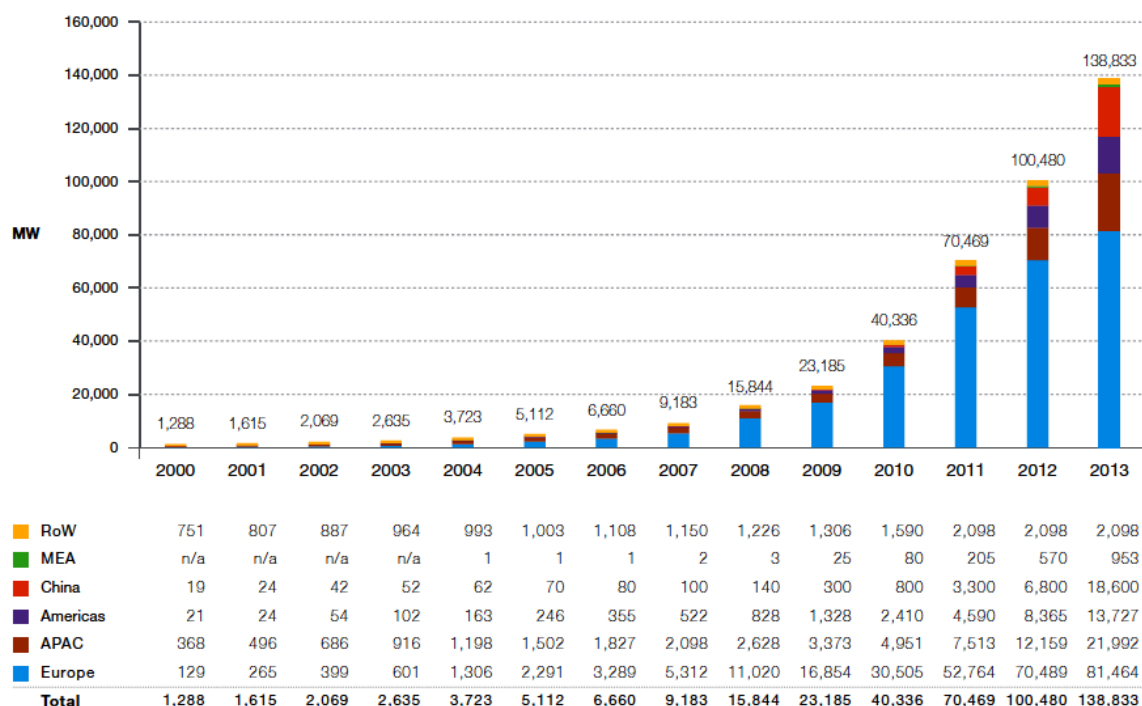
Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivo.....	3
1.4 Organização.....	3
2. Arranjo Fotovoltaico.....	5
3. Conversores de Potência.....	9
3.1 Conversores CC-CC.....	9
3.1.1 Conversor Buck.....	11
3.1.2 Conversor Boost.....	13
3.1.3 Conversores Buck-Boost.....	15
3.2 Conversores CC-CA.....	17
4. Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência.....	21
4.1 Método da Tensão Constante.....	22
4.2 Método Perturba e Observa (P&O).....	24
4.3 Método da Condutância Incremental.....	26
5. Sistema Fotovoltaico.....	29
5.1 Parâmetros do Sistema.....	30
5.1.1 Projeto do Conversor Buck-Boost.....	30
5.1.2 Controle do Conversor CC-CC Buck-Boost.....	32
5.1.3 Controle do Inversor.....	34
6. Resultados.....	39
6.1 Operação em regime permanente.....	39
6.2 Efeito de Variações na Radiação e na Temperatura.....	45
6.2.1 Variação nas Condições de Radiação e Temperatura para 1300 W/m ² e 30°C.....	47
6.2.2 Variação nas Condições de Radiação e Temperatura para 700 W/m ² e 20°C.....	50
6.3 Efeito de um curto-circuito trifásico na Rede CA do lado inversor.....	52
6. Conclusão.....	57
Bibliografia.....	59
Anexo 1.....	60
Anexo 2.....	61

1. Introdução

1.1 Apresentação

A matriz energética mundial tem se tornando cada vez mais insustentável considerando a capacidade de renovação do planeta. Os combustíveis fósseis não têm uma perspectiva animadora, e por esta razão a visibilidade e a aplicação das fontes de energia renováveis tem aumentado muito nos últimos anos. Segundo a *European Photovoltaic Industry Association* (EPIA), do final de 2009 até 2013, o cumulativo da capacidade fotovoltaica instalada no mundo saiu de cerca de 23 GW para quase 138,9 GW - quantidade capaz de produzir pelo menos 160 terawatts-hora (TWh) de energia elétrica a cada ano. A Europa ainda é a principal região do mundo em termos de capacidade instalada acumulada, com cerca de 59% da capacidade do mundo em 2013. A Figura 1.1 mostra que os países da Ásia-Pacífico e a China, apresentam grande aumento de capacidade.



RoW: Rest of the World. MEA: Middle East and Africa. APAC: Asia Pacific.
Methodology used for RoW data collection has changed in 2012.

Figura 1.1 - Evolução da capacidade instalada de energia fotovoltaica no mundo [EPIA – 2013]

No que diz respeito ao consumidor residencial de energia, a microgeração é uma alternativa a ser considerada uma vez que esta não é suscetível aos reajustes tarifários determinados pela distribuidora de energia elétrica. Muitos países concedem incentivos à geração distribuída de pequeno porte, pois tais investimentos geram consideráveis benefícios para o sistema elétrico de maneira geral, como a postergação de expansão dos sistemas de transmissão e distribuição. Além disso, o carregamento da rede é suavizado, as perdas são reduzidas, o impacto ambiental é diminuído, a matriz energética é diversificada, etc.

No Brasil, a micro e minigeração tem papel muito importante devido à expansão demográfica e econômica que tem gerado um aumento constante no consumo. Por esta razão, e com o objetivo de reduzir as dificuldades fiscais, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) aprovou a Resolução Normativa nº 482/2012, junto a seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que estabelece os procedimentos para acesso de micro e minigeração ao sistema de distribuição. Esses regulamentos determinam que esse tipo de geração deve ser feito, estritamente, por fontes renováveis, sendo a microgeração inferior ou igual a 100kW e a minigeração inferior ou igual a 1MW. Além disso, a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL possibilita que o fluxo de energia seja bidirecional, e estabelece que o consumidor que optar em fornecer energia para a rede receberá créditos em energia para serem consumidos em um período de até 36 meses.

1.2 Motivação

O Brasil tem em sua matriz energética uma imensa fatia dependente da geração hidrelétrica e das inúmeras quedas d'água que o terreno sinuoso de nosso país nos proporciona. Obviamente, o volume de água tem um peso extremamente importante nessa equação que acaba se tornando extremamente inconstante e sazonal. É bem verdade que nosso sistema elétrico interligado, e a extensão do nosso país, sendo em grande parte latitudinal nos permite o aproveitamento completo das épocas de maior volúpia hídrica e, portanto, maior geração elétrica nas diferentes regiões do Brasil. Entretanto, nos últimos anos, observa-se que, apesar do aproveitamento supracitado, precisamos agregar mais tecnologias para manter o abastecimento constante durante todo ano.

É neste prisma que a energia fotovoltaica e a microgeração se encaixam perfeitamente como mais variáveis desta equação. E, apesar de ser um tipo de energia intermitente, a

energia solar pode representar a diversificação da matriz energética no país. Este cenário de necessidade, sustentabilidade e progresso são os pilares de nossa profissão e, é claro, o motor deste trabalho.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo o projeto e simulação de um sistema de geração fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica. Foi simulado como base um sistema sem nenhum tipo de perturbação e, posteriormente, casos com os efeitos de variações na radiação e na temperatura às quais o arranjo fotovoltaico está comumente exposto, assim como os efeitos de uma falta trifásica do lado da rede.

Os resultados obtidos neste trabalho serão aproveitados para a instalação do sistema de minigeração no Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão (LEMT), localizado no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

1.4 Organização

Este trabalho de conclusão de curso, que engloba o estudo e o desenvolvimento de uma conexão de um arranjo fotovoltaico em uma rede de distribuição, é composto pela seguinte estrutura:

O Capítulo 1 trata da introdução do trabalho, através da abordagem sobre as características das fontes alternativas de energia em especial a energia solar que é o tema deste trabalho. Ainda nesse capítulo são abordadas algumas características sobre a evolução da geração fotovoltaica no mundo, assim como o status da mini e micro geração no Brasil. Nesse capítulo também são apresentados o objetivo, a motivação e a estrutura desenvolvida para esse trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral do arranjo fotovoltaico, definições de célula, módulo e painel fotovoltaico. Ainda nesse capítulo são introduzidos o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, a equação característica deste circuito assim como as curvas características do painel *Kyocera KC130TM*, utilizado como base nas simulações deste projeto.

O Capítulo 3 apresenta e descreve os tipos de dispositivos conversores de potência usados nesse trabalho, assim como exibe os respectivos fundamentos teóricos, separando-os em dois grupos: conversores CC-CC e conversores CC-CA. A seção 3.1 e suas subseções descrevem os três tipos mais usuais de conversores CC-CC, sendo eles: os conversores Buck, Boost e Buck-Boost. A seção 3.2 apresenta e descreve os fundamentos dos inversores de tensão CC/CA do tipo VSC (*Voltage-Source Converters*).

No Capítulo 4 são apresentados três métodos para o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum power point tracking*). Esses métodos são: o Método da tensão constante, o método perturba e observa e o método da condutância incremental.

Os Capítulos 5 e 6 exibem a modelagem e os resultados das simulações do sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de 220V e 60Hz. O capítulo 5 detalha o projeto do conversor CC-CC utilizado, o controle MPPT aplicado e o controle aplicado ao inversor CC/CA. No Capítulo 6 são apresentados os gráficos obtidos na simulação feita no software PSCAD/EMTDC.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões de cada análise de resultado, assim como do estudo de maneira geral.

2. Arranjo Fotovoltaico

Arranjos fotovoltaicos são compostos por painéis fotovoltaicos, que por sua vez são constituídos de módulos e células fotovoltaicas, como pode ser visto na Figura 2.1. As células fotovoltaicas são responsáveis pela conversão de radiação eletromagnética em energia elétrica. Essas células são compostas por materiais semicondutores, geralmente sendo Silício (Si), que é um semicondutor abundante no Brasil.

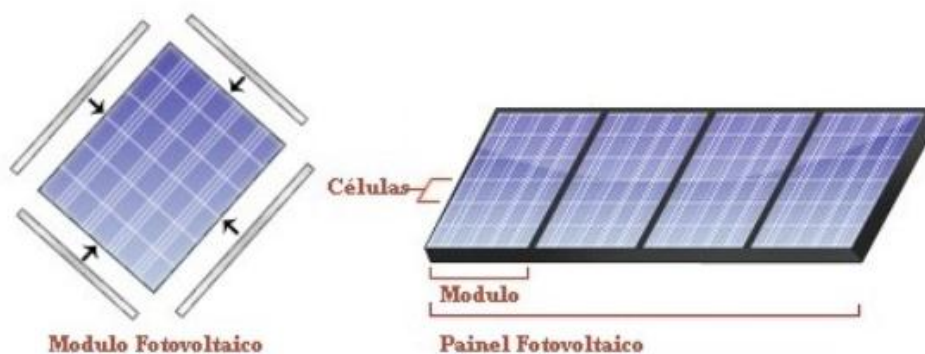


Figura 2. 1 - Arranjo Fotovoltaico [3].

O corte transversal de uma célula fotovoltaica é apresentado na Figura 2.2. O processo de conversão de energia começa com os fótons (presentes na radiação solar) atingindo o revestimento (vidro, adesivo transparente e antirreflexo) e ao cortar a célula, os elétrons presentes nos semicondutores são liberados. Os semicondutores do tipo n compõem a região com excesso de elétrons, enquanto que os semicondutores do tipo p fazem parte da região com poucos elétrons. Essa diferença de elétrons em cada camada produz um fluxo da camada n para a p, o que resulta em corrente elétrica.

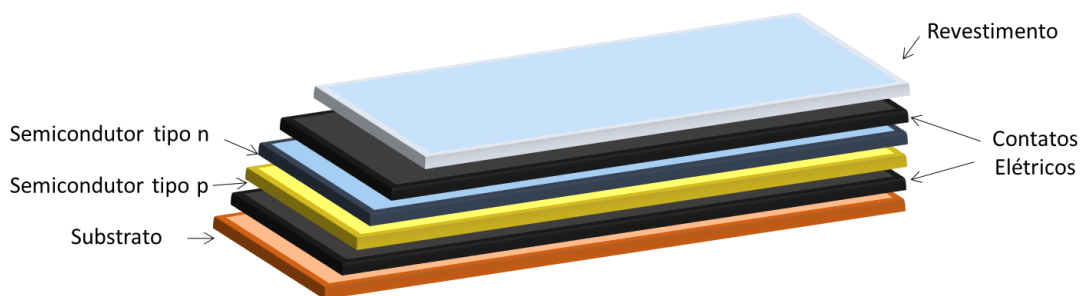


Figura 2. 2 - Corte transversal da célula.

Para descrever melhor o comportamento elétrico da célula fotovoltaica, assim como o seu processo de conversão de energia solar em energia elétrica, é apresentado o seu circuito elétrico equivalente na Figura 2.3.

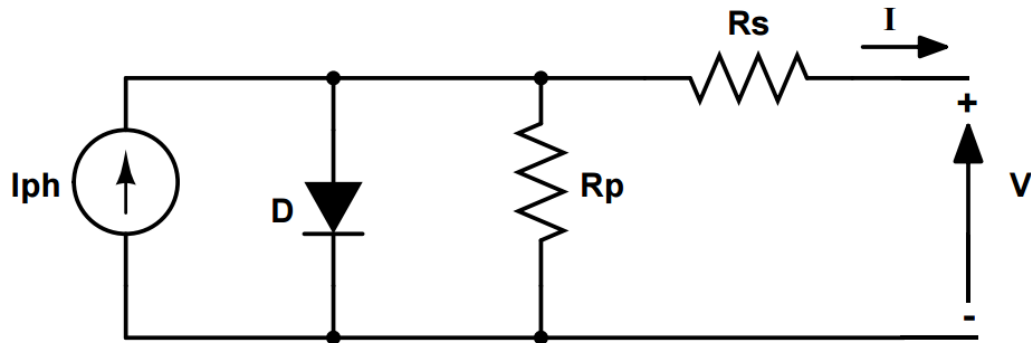


Figura 2. 3 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica [5].

A corrente de saída da célula é dada pela seguinte equação [5],

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{\eta k T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Em que,

V, I - Tensão e corrente de saída de uma célula fotovoltaica;

I_{ph} - Foto-corrente;

I_r - Corrente de saturação;

R_s, R_p - Resistências série e paralela da célula;

q - Carga do elétron, $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$;

k - Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

T - Temperatura ambiente em Kelvin;

η - Fator de qualidade da junção p.

A Equação 2.1 resulta na característica I-V da célula fotovoltaica. A solução desta equação não é trivial e é determinada através do Método de Newton Raphson [5].

A aplicação de sistemas fotovoltaicos possui várias vantagens, tais como, utilização de espaços ociosos, tamanho ajustável, matéria prima abundante, nenhuma emissão de CO₂ (desconsiderando aquela emitida na produção do painel), silencioso, pouca manutenção

requerida, etc. Esses sistemas podem ser divididos em dois grandes grupos: Sistemas Isolados ou autônomos (*off-grid*) e Sistemas Conectados à Rede (*grid-tie*). Os sistemas isolados são constituídos, em geral, por módulos fotovoltaicos, acumuladores (baterias), controladores de carga e um inversor (caso a carga seja em corrente alternada (CA)). Os sistemas conectados a rede não se utilizam de baterias e de controladores de carga. Faz-se uso de um conversor, a fim de elevar a tensão de saída do painel à um nível compatível com a inversão para o nível CA da rede.

Este projeto foi elaborado com base nos painéis solares *Kyocera KC130TM*. De acordo com o *datasheet* do fabricante, as curvas características de corrente e tensão do módulo são apresentadas na Figura 2.4. O módulo fotovoltaico é constituído de ligações em série ou em paralelo das células com o objetivo de aumentar a eficiência do mesmo, essas ligações são estabelecidas pelo fabricante e não é possível alterá-las uma vez que o painel estiver pronto.

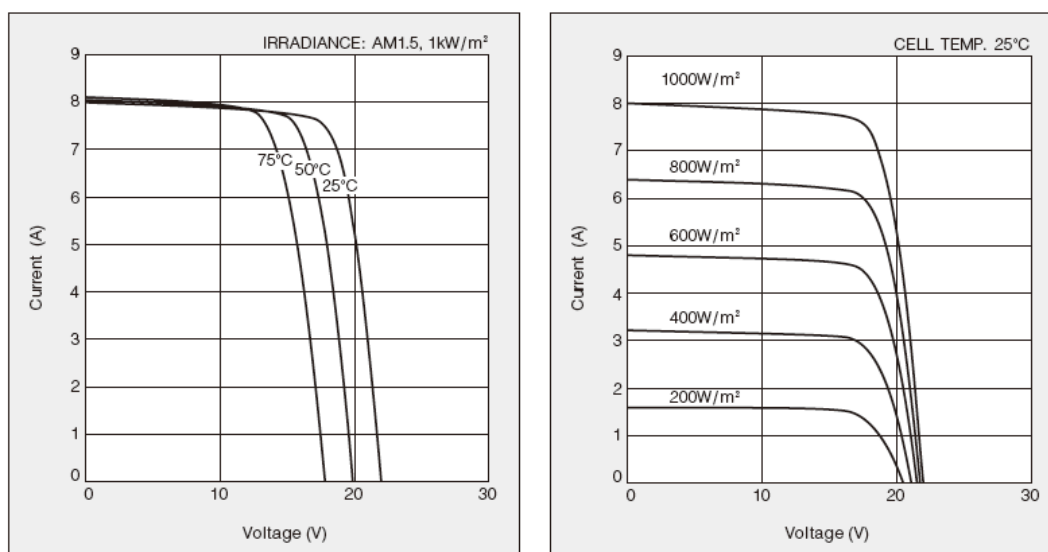


Figura 2.4 - Curvas características do módulo [11].

O gráfico da esquerda da Figura 2.4 apresenta as curvas de corrente e tensão para diferentes temperaturas e radiação constante de 1000 W/m^2 . Por outro lado, a curva da direita mostra a relação entre a corrente e a tensão considerando temperatura constante de 25°C e diferentes níveis de radiação. O fabricante também fornece os valores de pontos específicos nas condições convencionais de teste (1000 W/m^2 e 25°C). Estes pontos específicos são aqueles que fornecem a máxima potência de saída (V_{mp}, I_{mp}), a corrente de curto circuito ($0, I_{cc}$) e a tensão de circuito aberto ($V_{ca}, 0$). A corrente de curto circuito é aquela que circula

pelo módulo quando este tem os seus terminais curto-circuitados e a tensão de circuito aberto é aquela medida entre os terminais quando estão em aberto.

O módulo fotovoltaico, individualmente, não apresenta eficiência muito expressiva; geralmente em torno de 15%. A eficiência do módulo pode ser expressa por:

$$\eta = \frac{P_{elétrica}}{S \cdot área} \quad (2.2)$$

Em que, $P_{elétrica}$ é a potência elétrica gerada pelo módulo; S é a radiação solar incidente sob a área do módulo. Para o caso do módulo Kyocera KM130TM, com $P_{elétrica} = 130W$, $área = 0.9291m^2$ e $S = 1000W/m^2$, temos que:

$$\eta = \frac{130}{1000 * 0.9291} \cong 14\%$$

A partir da Equação 2.2 é fácil perceber que a eficiência do painel é altamente influenciada pelas condições climáticas e pela carga conectada. Por esse motivo se faz necessário a conexão de circuitos auxiliares que sejam capazes de maximizar a potência elétrica gerada; esses circuitos são chamados de Rastreadores de Máxima Potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracker*). Existem três métodos principais para efetuar este rastreamento, são eles: método da Tensão Constante, método Perturba e Observa e o método da Condutância Incremental. Tais métodos serão abordados mais detalhadamente no Capítulo 4.

3. Conversores de Potência

Muitas aplicações de eletrônica de potência exigem que os parâmetros elétricos de entrada de um circuito sejam alterados de acordo com a função desejada para o mesmo. Os conversores de potência são responsáveis por tais alterações e estes dispositivos são classificados em dois grupos: conversores CC-CC e conversores CC-CA. Ambos são operados, basicamente, pelo modo no qual são chaveados e suas filosofias de controle. Os conversores de potência são compostos pelos seguintes elementos: indutores, capacitores, diodo, chaves semicondutoras e resistores.

3.1 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são dispositivos eletrônicos capazes de fornecer uma tensão contínua regulada (superior ou inferior à sua tensão de entrada), tendo como entrada sinais de tensão regulada ou não. Esta regulação, geralmente, é alcançada por uso da modulação por largura de pulso (PWM) com frequência fixa para o chaveamento dos semicondutores de potência. O princípio de operação da modulação PWM pode ser visto na Figura 3.1. Basicamente é feita uma comparação entre o valor de referência V_{cc} e o sinal de uma onda triangular (também chamada de portadora). Quando o valor de referência V_{cc} for maior que o valor da portadora, o sinal de saída resultante é 1 e quando a referência é menor que a portadora, o resultado é 0.

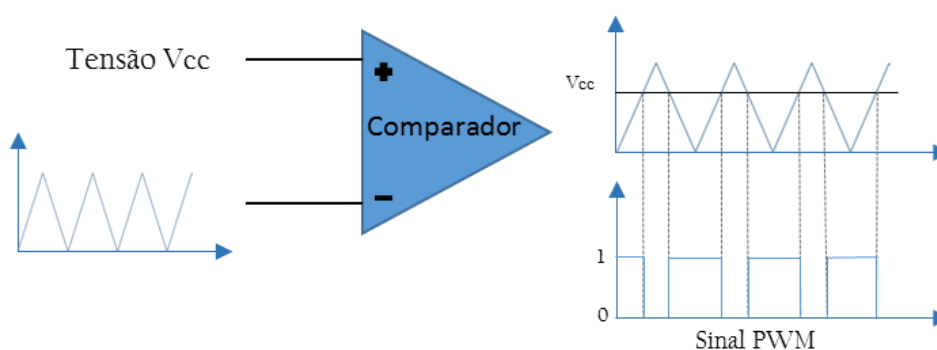


Figura 3.1 – Princípio de funcionamento da modulação por largura de pulso (PWM).

O sinal de comando para operação controlada da chave semicondutora corresponde à função binária estabelecida pela saída da modulação PWM, ou seja, 0 ou 1, que abre ou fecha

a chave de acordo com a frequência estabelecida pelo ciclo de trabalho (D). Portanto, as formas de onda resultantes se repetem proporcionalmente ao período com o ciclo de trabalho.

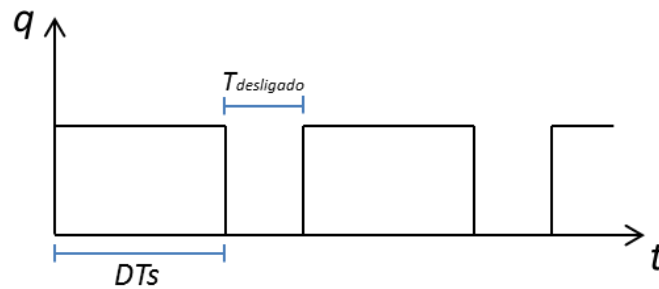


Figura 3.2 - Sinal de controle da modulação PWM.

A Figura 3.2 mostra como funciona o sinal gerado pelo PWM e com isso, pode-se concluir que o período deste sinal é dado por,

$$T_s = DT_s + T_{desligado} \quad (3.1)$$

Em que,

T_s – Período do sinal;

D – Ciclo de Trabalho;

$T_{desligado}$ – Tempo que a chave semicondutora permanece bloqueada.

Os conversores CC-CC podem operar em dois modos: modo contínuo e modo descontínuo. No modo contínuo de operação, a corrente no indutor não atinge valor nulo após um ciclo de trabalho. No modo descontínuo esta corrente geralmente é nula durante pequenos intervalos. Além disso, os conversores podem ainda ser classificados como: isolados ou não isolados. Os conversores isolados, como o Flayback e o Forward, possuem um transformador para isolar a entrada da saída. Esses conversores não serão analisados neste trabalho. Nas análises a seguir, considera-se que todos os conversores estão operando no modo contínuo e são classificados como não isolados.

Os conversores CC/CC, dependendo da sua operação e topologia do circuito de potência, podem ser chamados de:

- Buck ou abaixador de tensão;
- Boost ou elevador de tensão;

- Buck ou abaixador - elevador.

Todos esses tipos de conversores CC-CC serão analisados com mais detalhes nos itens a seguir.

3.1.1 Conversor Buck

O conversor CC-CC tipo Buck, também conhecido como abaixador, gera uma tensão controlada de saída igual ou inferior a de entrada. O circuito elétrico deste tipo de conversor é apresentado na Figura 3.3.

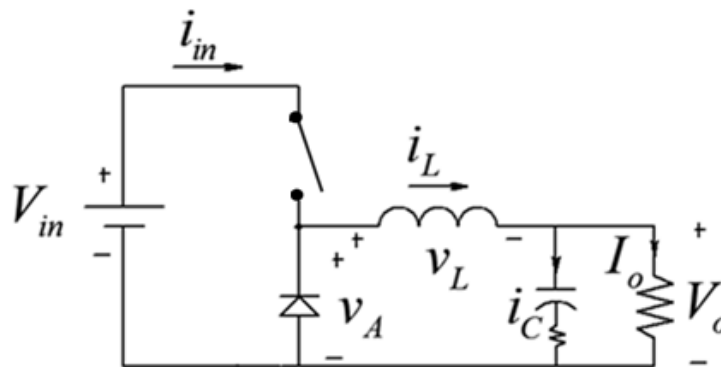


Figura 3. 3 – Circuito do conversor CC tipo Buck [4].

Neste conversor, ao operar no modo contínuo, quando o sinal lógico de controle que chega a chave semicondutora é 1 em $t = 0$, ou seja, quando o chave semicondutora está conduzindo, este passa ao estado de condução. Portanto, a tensão de entrada (V_{in}) passa a ser igual a tensão no diodo (v_A). Neste momento, a corrente i_L passa a magnetizar o indutor. Por outro lado, quando o sinal de comando é 0, em $t = t_1$, a chave semicondutora abre o circuito e o indutor passa a ser uma fonte de corrente com a energia armazenada anteriormente e o diodo passa a conduzir, como pode ser visto na Figura 3.4. Nesse caso, pode ser visualizado que a tensão no indutor será igual a $-V_0$ quando a chave semicondutora estiver aberta. Quando a chave semicondutora estiver fechada, a tensão no indutor assumirá a diferença de potencial entre V_{in} e V_o [1].

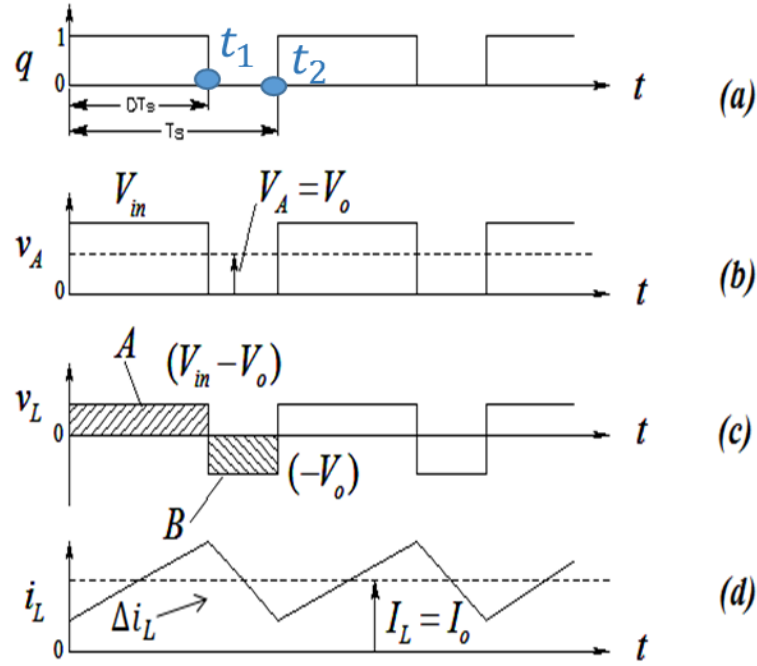


Figura 3.4 - Formas de onda do conversor CC tipo Buck [4].

A tensão no indutor é dada por:

$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad (3.1)$$

Assumindo que as chaves semicondutoras são ideais e que a corrente cresce linearmente de I_{L1} para I_{L2} , no tempo t_1 , de acordo com [1] e a partir dos gráficos da Figura 3.4, temos que:

$$V_{in} - V_o = \frac{L(I_{L2} - I_{L1})}{t_1} = \frac{L\Delta I}{t_1} \quad (3.2)$$

Considerando também que a corrente decresce linearmente de I_{L2} para I_{L1} , em $t = t_2$, é analisado, de maneira semelhante que:

$$V_o = \frac{L\Delta I}{t_2} \quad (3.3)$$

Nesse caso ΔI corresponde a corrente de pico a pico que circula pelo indutor. Como pode ser visto na Figura 3.4 (a), $t_1 = DT_s$ e $t_2 = (1 - D)T_s$. Sendo assim, a relação entre a tensão de entrada (V_{in}) e a tensão de saída (V_o) do conversor CC é dada por:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (3.4)$$

$$\frac{I_{in}}{I_o} = D \quad (3.5)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} DT_s \quad (3.6)$$

Como o ciclo de trabalho (D) pode variar entre os limites de zero e um, pode ser concluído que, por (3.4), a tensão de saída do conversor será sempre menor (ou igual) a tensão de entrada dando essa característica de um equipamento abaixador de tensão.

3.1.2 Conversor Boost

O conversor CC-CC tipo Boost também é chamado de elevador de tensão. Nesse equipamento, a tensão de saída (V_o) será sempre maior ou igual que a sua tensão de entrada (V_{in}). O circuito do conversor tipo Boost é apresentado na Figura 3.5.

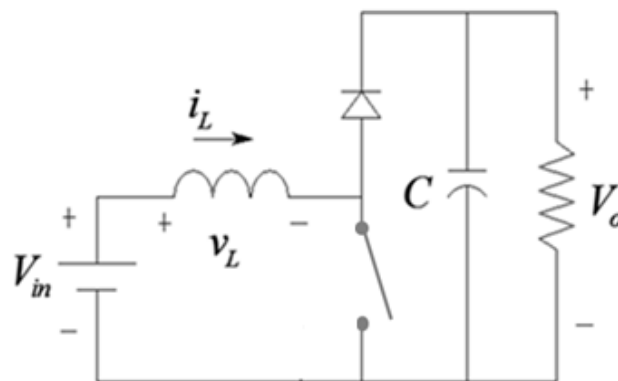


Figura 3. 5 - Circuito do conversor CC tipo Boost [4].

O princípio de funcionamento do conversor CC-CC Boost é o mesmo do conversor CC-CC Buck. No seu estado inicial, com a chave semicondutora operando com sinal de comando q igual a 1, a corrente proveniente da fonte CC flui pela chave semicondutora e também carrega o indutor. Quando a chave semicondutora é desligada, e pelo fato de haver um indutor que não permite variação instantânea na sua corrente, essa corrente que antes circulava pela chave semicondutora vai passar a circular pelo diodo, pelo capacitor e pela

carga. Nesse momento, o indutor vai se desmagnetizando, até que a chave semicondutora é ligada novamente, começando um novo ciclo [1]. Durante o período no qual a chave semicondutora está no estado desligado, a energia armazenada pelo indutor é transferida para a carga e para o capacitor, que, conseqüentemente, eleva a tensão terminal da carga. A Figura 3.6 mostra as formas de onda da operação do conversor tipo Boost.

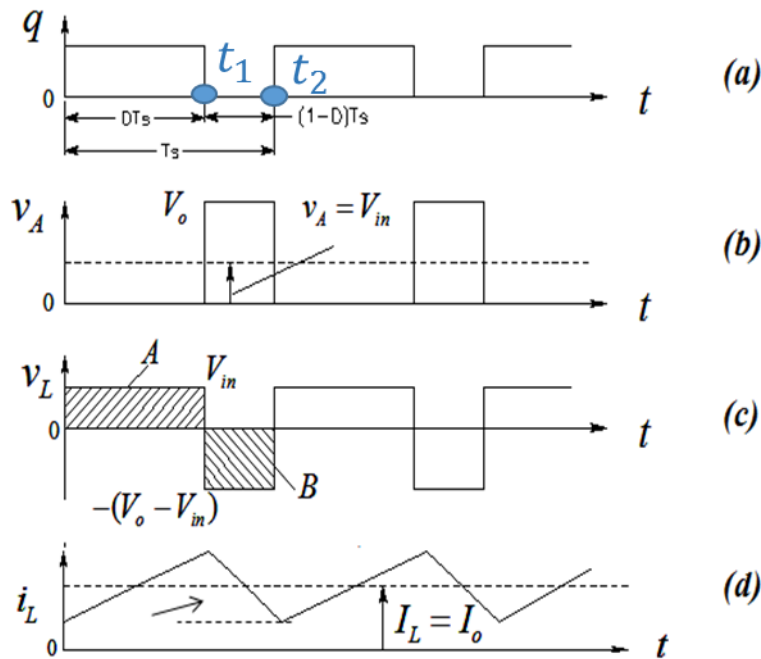


Figura 3. 6 - Formas de onda do conversor CC-CC Boost. [4]

Da mesma forma que o conversor Buck, a tensão no indutor é dada pela Equação 2.1. Assumindo também que a chave semicondutora é ideal e que a corrente cresce linearmente de I_{L1} para I_{L2} , no tempo t_1 , de acordo com [1] e a partir dos gráficos da Figura 3.6, é visualizado que:

$$V_{in} = \frac{L(I_{L2} - I_{L1})}{t_1} = \frac{L\Delta I}{t_1}. \quad (3.7)$$

Assumindo também que a corrente decresce linearmente de I_{L2} para I_{L1} , em $t = t_2$, tem-se que:

$$V_o - V_{in} = \frac{L\Delta I}{t_2}. \quad (3.8)$$

Em (3.8), ΔI é a variação de corrente pico a pico que circula pelo indutor. Como pode ser visto pela Figura 3.6(a), $t_1 = DT_s$ e $t_2 = (1 - D)T_s$. Sendo assim:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.9)$$

$$\frac{I_{in}}{I_o} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.10)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_o - V_{in}}{L} (1 - D)T_s \quad (3.11)$$

Sabendo ainda que o ciclo de trabalho pode variar apenas entre os seus limites de zero e um, conclui-se que, por (3.9), a tensão de saída será sempre maior que a tensão de entrada dando a característica de um conversor elevador de tensão.

3.1.3 Conversores Buck-Boost

O conversor CC-CC Buck-Boost, como o próprio nome descreve, é uma combinação dos dois conversores analisados anteriormente. Este conversor fornece uma tensão de saída com polaridade inversa, que pode ser menor ou maior que a tensão de entrada. O circuito equivalente de um conversor CC-CC Buck-Boost é apresentado na Figura 3.7.

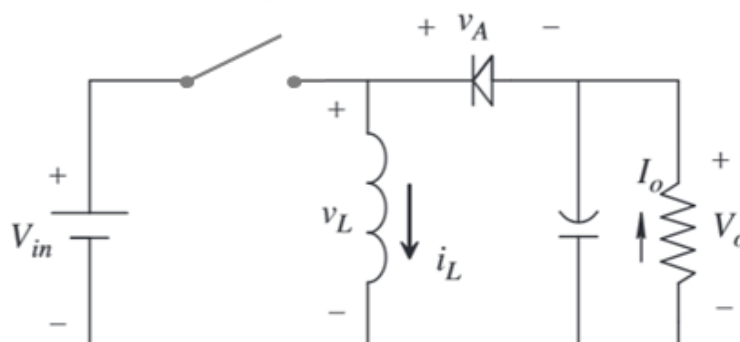


Figura 3. 7 – Circuito do conversor CC-CC Buck-Boost [4].

Assim como nos dois conversores analisados anteriormente, o conversor CC-CC Buck-Boost deve ser analisado em dois momentos: quando a chave semicondutora está ligada

(sinal de comando q igual a 1) e quando a chave semicondutora está desligada (sinal de comando q igual a 0). Quando a chave semicondutora está ligada, a tensão no indutor v_L se iguala a tensão de entrada V_{in} e a corrente do indutor, i_L , tem o comportamento de uma rampa crescente como apresentado na Figura 3.8(d), o que aumenta a energia armazenada no indutor. Quando a chave semicondutora é desligado, a corrente do indutor flui através do diodo, transferindo a energia armazenada obtida no ciclo anterior [4]. A tensão do indutor varia entre V_{in} e $-V_o$, como mostra a Figura 3.8(c).

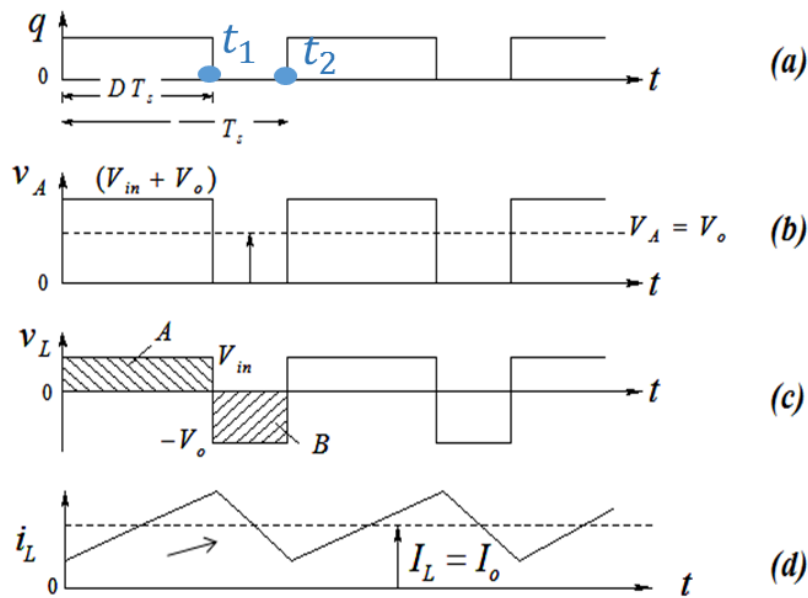


Figura 3.8 - Formas de onda do conversor CC-CC Buck-Boost [4].

Assim, como visto anteriormente, a tensão no indutor é dada por (2.1). Assumindo ainda que a chave semicondutora é ideal e que a corrente cresce linearmente de I_{L1} para I_{L2} , no tempo t_1 , de acordo com [1] e a partir dos gráficos da Figura 3.8, é visto que:

$$V_{in} = \frac{L(I_{L2} - I_{L1})}{t_1} = \frac{L\Delta I}{t_1}. \quad (3.12)$$

Assumindo também que a corrente decresce linearmente de I_{L2} para I_{L1} , em $t = t_2$, de maneira semelhante tem-se que a tensão de saída será dada por:

$$V_o = -\frac{L\Delta I}{t_2}. \quad (3.13)$$

Em (3.13), ΔI é a variação de corrente pico a pico que circula pelo indutor. Como pode ser analisado na Figura 3.8 (a), $t_1 = DT_s$ e $t_2 = (1 - D)T_s$. Sendo assim:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-D}{1 - D} \quad (3.14)$$

$$\frac{I_{in}}{I_o} = \frac{D}{1 - D} \quad (3.15)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{in}}{L} DT_s \quad (3.16)$$

Igualmente aos dois casos anteriores (no Buck e no Boost), o ciclo de trabalho pode variar entre os limites de zero e um. Assim, pelas características apresentadas por esse tipo de conversor e por (3.14), pode ser visualizado que a tensão de saída (V_o) poderá assumir um valor maior ou menor que a tensão de entrada (V_{in}).

3.2 Conversores CC-CA

Os conversores CC-CA (operação como inversor) ou CA-CC (operação como retificador) são dispositivos eletrônicos amplamente utilizados, pois são capazes de converter energia CC em CA ou vice-versa. São aplicados, por exemplo, em sistemas de energia renováveis, acionamento de máquinas elétricas, e em fontes ininterruptas de energia (*Uninterruptible Power Supply- UPS*).

Os inversores podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos e a tensão de saída de um inversor ideal deve ser uma senóide. Na prática, as formas de onda de saída não são completamente senoidais e contêm níveis de distorções harmônicas características. Os inversores monofásicos, geralmente, são usados em aplicações de baixa potência e os trifásicos atendem a aplicações de média e alta potência. Aplicações de baixa e média potência obtêm como saídas aceitáveis ondas quadradas ou quase quadradas [1]. As aplicações dos inversores para alta tensão, por outro lado, devem fornecer ondas senoidais com baixa distorção harmônica para o sistema CA. Os harmônicos da rede CA podem ser reduzidos através do uso de filtros passivos ou ativos na saída CA desses inversores. Os

principais conversores CC-CA trifásicos são os Inversores Fonte de Tensão (VSC – *Voltage Source Converters*) e os Inversores Fonte de Corrente (CSC – *Current Source Converters*).

O conversor estático CSC contém uma fonte primária de energia do tipo fonte de corrente contínua, enquanto o VSC uma fonte de tensão contínua. De uma maneira geral pode-se afirmar que o CSC é um “conversor dual” do VSC. Ambos podem utilizar diferentes tipos de métodos de chaveamento PWM de tal forma que ambos podem atuar como fontes controladas e se comportar na rede CA como fontes de tensão ou corrente controlada. A saída destes conversores deve possuir amplitude, fase e frequência controláveis [6]. Para a conexão do sistema fotovoltaico estudado no sistema CA equivalente fez-se uso de um inversor trifásico tipo VSC com controle PWM de corrente, ou seja, que torna o VSC uma fonte de corrente controlada.

O conversor do tipo VSC trifásico possui seis chaves auto comutadas (*Insulated Gate Bipolar Transistors-IGBT's* ou *Insulated Gate Controlled Thyristors-IGCT's*) com capacidade de condução e corte e diodos em antiparalelo. Esses diodos em antiparalelo permitem a reversão de corrente e fornecem maior flexibilidade operativa para esse sistema [10]. A Figura 3.9 mostra o diagrama esquemático de um inversor VSC trifásico.

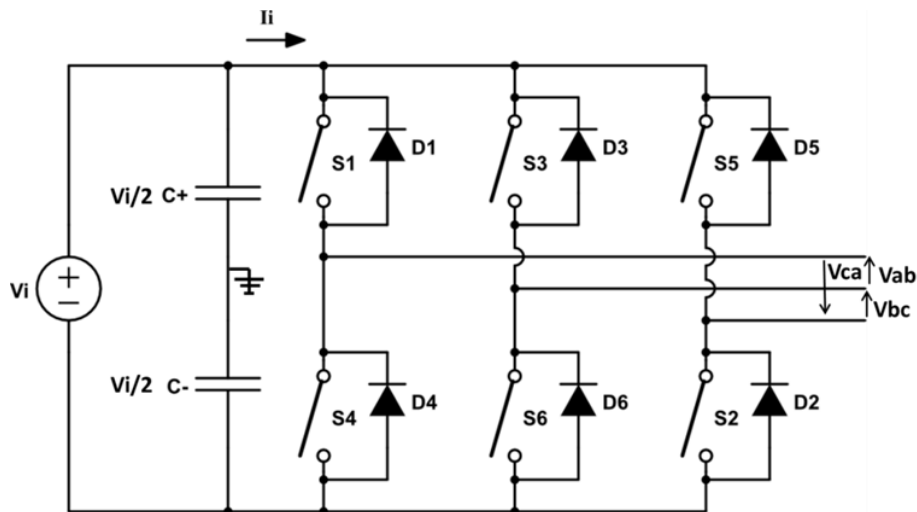


Figura 3.9 - Diagrama esquemático de um inversor VSC trifásico [6].

As chaves S1, S2, S3, S4, S5 e S6 receberão sinais de controle PWM e serão fechadas e abertas de acordo com os mesmos. As chaves S1 e S4, S3 e S6, S5 e S2 operam de forma complementar e não podem ser fechadas simultaneamente, pois esta situação provocaria um curto-circuito no elo CC. A Tabela 3.1 mostra os oito possíveis estados das chaves. O estado 1 fecha a chave e o estado 0 abre a mesma. Dos oito estados analisados, pode-se notar que

dois deles produzem tensões de linha nulas na saída, que correspondem aos estados 7 e 8. Estes estados fecham simultaneamente as três chaves superiores ou as três chaves inferiores, respectivamente. Estes casos produzem tensões de fase iguais à $\pm \frac{V_i}{2}$ nas três fases, e consequentemente, tensões de linha nulas.

Tabela 3. 1 - Chaveamento do inversor [6]

Estado	S1	S2	S3	S4	S5	S6	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
1	1	1	0	0	0	1	V_i	0	$-V_i$
2	1	1	1	0	0	0	0	V_i	$-V_i$
3	0	1	1	1	0	0	$-V_i$	V_i	0
4	0	0	1	1	1	0	$-V_i$	0	V_i
5	0	0	0	1	1	1	0	$-V_i$	V_i
6	1	0	0	0	1	1	V_i	$-V_i$	0
7	1	0	1	0	1	0	0	0	0
8	0	1	0	1	0	1	0	0	0

A Figura 3.10 (a) mostra o sinal das chaves S1 e S3 e a tensão V_{ab} resultante desses chaveamentos. Os sinais das chaves S1 e S3 são resultado do controle PWM a partir de uma onda senoidal, cujo princípio de funcionamento é o mesmo daquele apresentado na Seção 3.1, diferindo apenas na entrada positiva do comparador que passa a ser uma senóide em vez de um sinal de referência CC.

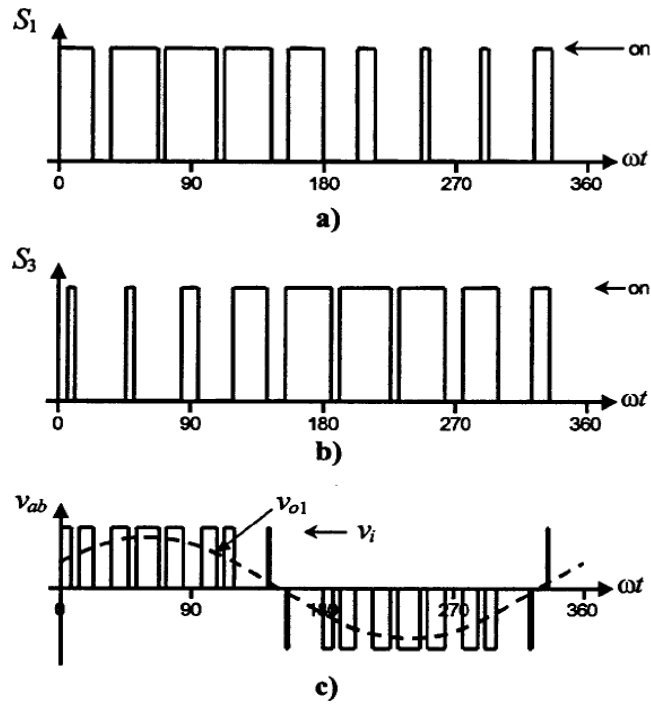


Figura 3. 10 — Sinais do chaveamento de S1(a) e S3 (b), juntamente com a tensão de Saída Vab(c) [6].

É importante destacar nesta seção que a tensão de fase máxima que pode ser retirada do inversor é $\frac{v_i}{2}$ e, portanto, a amplitude máxima da tensão de linha obtida pelo inversor é dada por $\sqrt{3} \frac{v_i}{2}$. De fato, a tensão de saída também será proporcional ao índice de modulação (m_a) que varia entre zero e um, na região linear [6]. Assim:

$$v_{ab} = m_a \sqrt{3} \left(\frac{v_i}{2} \right), \quad 0 < m_a < 1. \quad (3.17)$$

4. Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência

Grandes variações de potência elétrica são resultado das constantes variações de carga e de radiação incidentes no módulo fotovoltaico ao longo do dia.

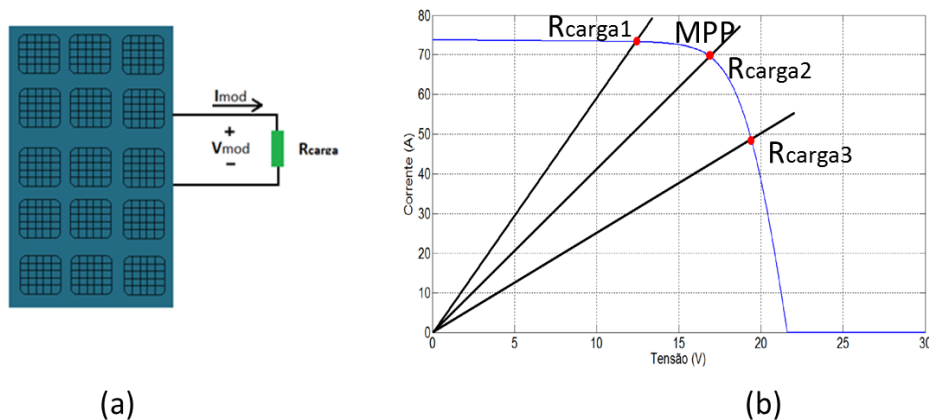


Figura 4.1 - Módulo conectado a uma carga (a) e pontos de operação na curva IV (b).

Se considerarmos a curva de tensão e corrente para radiação e temperatura constantes ($1000\text{W}/\text{m}^2$ e 25°C), o ponto de operação seria dado exclusivamente pela carga R_{carga} (Figura 4.1(b)). Nesse caso, a potência elétrica gerada dependerá apenas da carga a ser alimentada. Porém, como pode ser visto na Figura 4.2, uma curva PV tem apenas um ponto no qual a geração de potência elétrica é máxima. Sendo assim, para diferentes valores de carga, apenas um valor coincidirá com o ponto de máxima potência. Além disso, é preciso considerar que, na prática, as condições climáticas não serão constantes e, portanto, para que a potência seja maximizada, muitos fatores deverão acontecer ao mesmo tempo o que é pouco provável sem que haja um dispositivo que modifique o ponto de operação para aquele cuja potência é máxima.

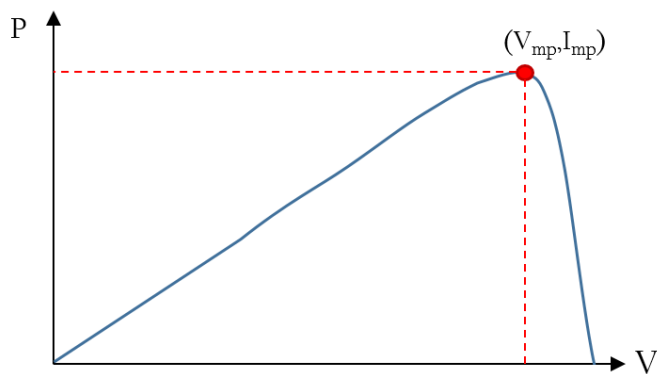


Figura 4.2 - Curva PV de um módulo fotovoltaico considerando radiação e temperatura constantes.

O efeito da aplicação de uma técnica de rastreamento de máxima potência pode ser visualizado na Figura 4.3. Essa figura mostra a diferença entre sistemas com e sem a aplicação de uma técnica de rastreamento de máxima potência. A parte hachurada em verde mostra a quantidade de potência a mais que os sistemas com MPPT conseguem obter.

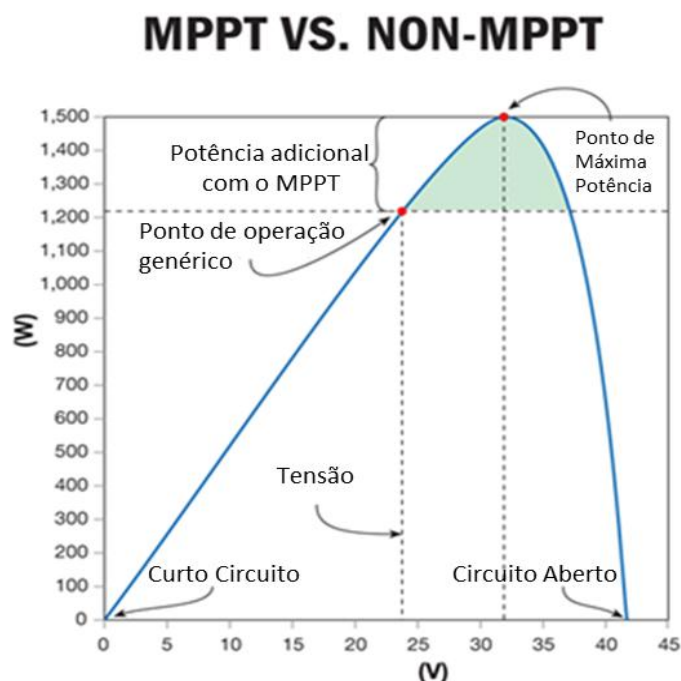


Figura 4. 3 - Ponto de Operação com e sem MPPT [7].

A modificação do ponto de operação do sistema é feita aplicando as técnicas de MPPT no controle dos conversores CC/CC apresentados no Capítulo 3, através da alteração do ciclo de trabalho. As técnicas de rastreamento são diferenciadas de acordo com o nível de complexidade de implementação, velocidade e processamento dos cálculos, variáveis de controle, custo de sensoriamento e velocidade de convergência para o ponto de operação desejado. A seguir será apresentado um comparativo entre as três técnicas de rastreamento de máxima potência mais difundidas atualmente, sejam elas Método da Tensão Constante, Método Perturba e Observa e Método da Condutância Incremental.

4.1 Método da Tensão Constante

O método da Tensão Constante é o método com maior facilidade de implementação e por outro lado é o mais impreciso também. Neste método, a tensão de saída do módulo, V_{modulo} , é pré-determinada e mantida constante no valor V_{mp}^{ref} . Fixando este valor, o ponto de

máxima potência é alcançado para diferentes níveis de radiação como pode ser visto na Figura 4.4(a). Porém, este método considera que a temperatura seja mantida constante. As variações na temperatura geram alterações na tensão V_{mp} que acabam não sendo consideradas neste método [2].

A Figura 4.4(b) mostra que a tensão do ponto de máxima potência pode se afastar consideravelmente da tensão V_{mp}^{ref} . Nesta figura, as variações de temperatura são tais que $T_b > T_a > T^{ref}$ e pode-se perceber que, para curva da temperatura T_b , o ponto de operação que seria mantido neste método está representado pelo ponto d e que este é muito distante do ponto de máxima potência da curva (ponto c).

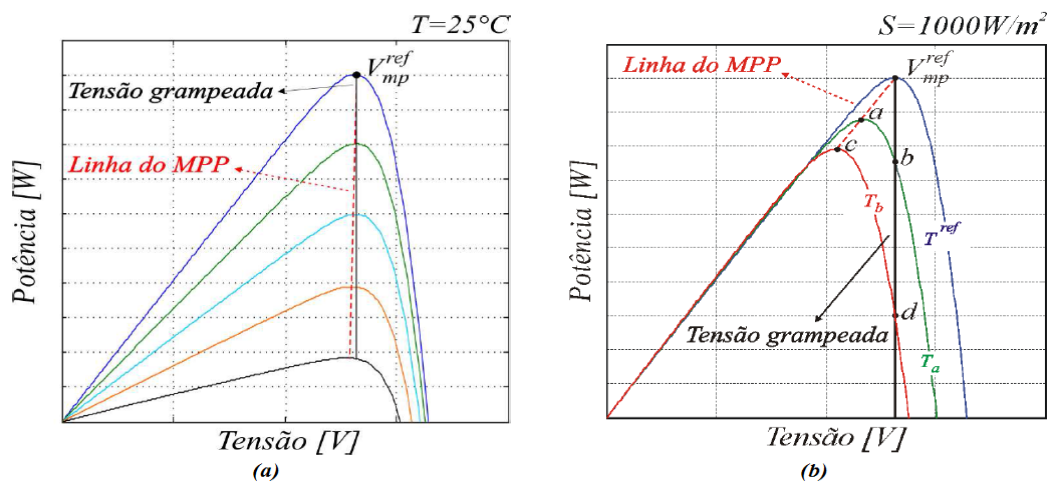


Figura 4. 4 - Representação gráfica dos pontos de operação obtidos no método da Tensão Constante para temperatura constante (a) e para radiação constante (b) [2].

Apesar de não ser um método muito preciso, o método da Tensão Constante é utilizado devido sua facilidade de implementação e baixo custo de sensoriamento, uma vez que só há necessidade de leitura da tensão do módulo.

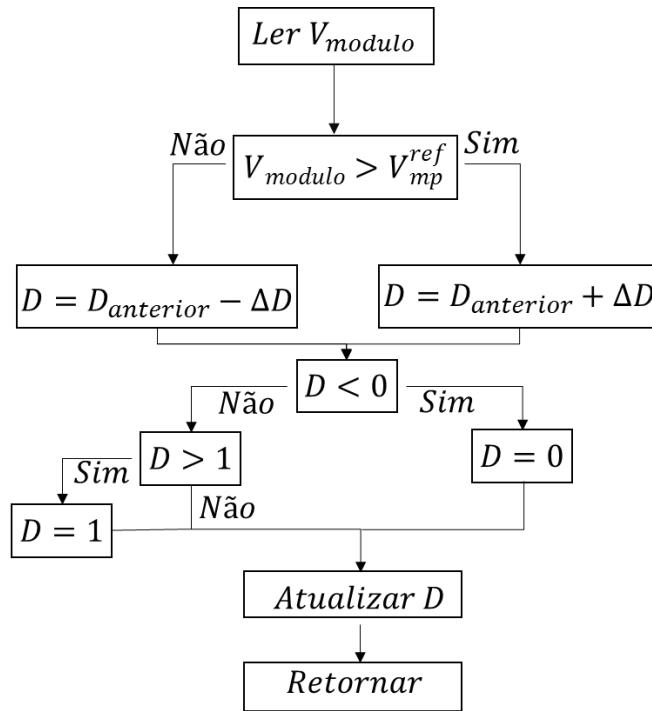


Figura 4.5 – Fluxograma do algoritmo da técnica de rastreamento pelo método da Tensão Constante [2].

A Figura 4.5 apresenta o algoritmo desta técnica, que é relativamente mais simples em relação às outras técnicas. O processo consiste, basicamente, em ler a tensão de saída do módulo V_{modulo} e compará-la com a tensão de referência V_{mp}^{ref} . É importante notar que a tensão de saída do módulo é a tensão de entrada do conversor CC/CC, sendo assim, caso o valor da tensão do módulo seja maior que a de referência, faz-se necessário um incremento ΔD no ciclo de trabalho. Caso contrário, o ciclo de trabalho é decrescido deste mesmo valor. Após analisar o ciclo de trabalho obtido com o acréscimo ou decréscimo de ΔD é preciso confirmar se o novo ciclo de trabalho está dentro dos limites de 0 e 1 para que então seja alterado. O processo é repetido até que V_{modulo} seja igual a V_{mp}^{ref} .

4.2 Método Perturba e Observa (P&O)

O método Perturba e Observa é mais preciso que o método da Tensão Constante, pois considera, além da tensão V_{modulo} , a corrente do módulo, I_{modulo} para rastrear o ponto de máxima potência. Sendo assim, para implementação do método P&O necessita-se de dois sensores, um de tensão e outro de corrente. A técnica utilizada neste método considera duas iterações: a primeira acontece no tempo $t_{anterior}$, e a segunda no tempo t após o sistema sofrer uma pequena perturbação (ΔD) no ciclo de trabalho. São utilizados os seguintes dados:

$V_{\text{modulo}}(t)$, $V_{\text{modulo}}(t_{\text{anterior}})$, $I_{\text{modulo}}(t)$ e $I_{\text{modulo}}(t_{\text{anterior}})$, tornando-se possível calcular a potência do módulo nesses dois instantes de tempo.

Com os dados de potência $P(t)$ e $P(t_{\text{anterior}})$ é possível determinar se o sistema está se aproximando ou se afastando do ponto de máxima potência. Se após o acréscimo ou decréscimo de ΔD , o $\Delta P = P(t) - P(t_{\text{anterior}}) > 0$, ou seja, caso ocorra um incremento de potência fornecida, pode-se concluir que o sistema está caminhando em direção à convergência e, por conseguinte, deve-se manter o acréscimo ou o decréscimo do ciclo de trabalho de acordo com o estabelecido anteriormente.

Se o oposto ocorrer, ou seja, se $\Delta P < 0$, o sistema estará caminhando no sentido oposto ao de máxima potência, sendo assim, a perturbação ΔD deverá ser trocada de sentido. O tamanho da perturbação ΔD influencia diretamente no esforço computacional e na qualidade da resposta. É evidente que uma perturbação pequena fornece uma qualidade maior de resposta em regime (pequeno *ripple* em regime permanente), contudo a um custo de uma velocidade baixa para o ratreamento até ser obtido o MPP. O maior problema desta técnica são as oscilações em torno do ponto de máxima potência. A Figura 4.6 mostra o algoritmo deste método.

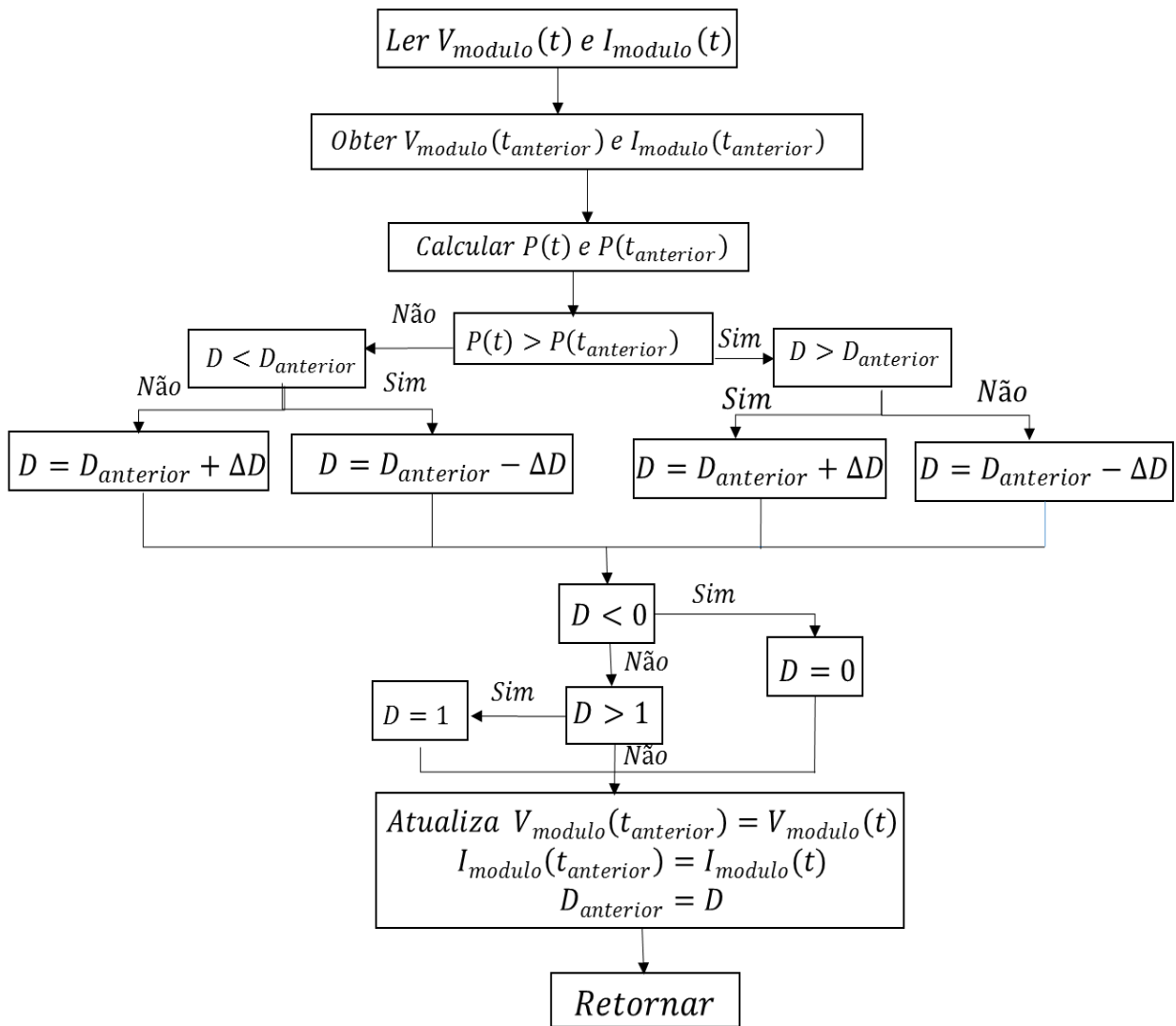


Figura 4. 6 - Fluxograma do algoritmo da técnica de rastreamento pelo método Perturba e Observa [2].

4.3 Método da Condutância Incremental

O método da Condutância Incremental consegue combinar velocidade de rastreamento e qualidade de resposta de regime permanente e por isso é o método mais preciso dos analisados neste trabalho. Porém, este método exige um esforço computacional maior. A variável de análise deste método é a razão entre a variação de potência e a variação de tensão.

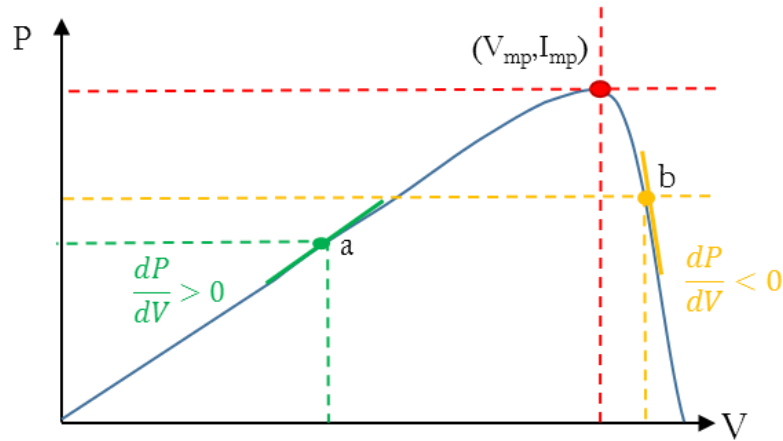


Figura 4.7 -- Curva PV [2].

Ao analisar a curva PV da Figura 4.7, é fácil perceber que o lado esquerdo ao ponto de máxima potência possui derivada de potência em relação a tensão positiva, já do lado direito esta derivada é negativa. Sendo assim, quando $\frac{dP}{dV} > 0$, o módulo fotovoltaico está fornecendo uma potência inferior à máxima e o ponto de operação (ponto *a*) se encontra antes do ponto (V_{mp}, I_{mp}) . Isto significa que o MPPT precisa atuar no sentido de diminuir o ciclo de trabalho, a fim de elevar a tensão de saída do módulo e, conseqüentemente, a tensão de entrada do conversor CC/CC. De maneira semelhante, quando $\frac{dP}{dV} < 0$, a potência fornecida também é menor que a máxima, mas neste caso o ponto de operação (ponto *b*) encontra-se após o ponto (V_{mp}, I_{mp}) , o que exige um incremento no ciclo de trabalho. Apenas quando $\frac{dP}{dV} = 0$, o ponto de operação coincidirá com o ponto de máxima potência [2].

Sabendo que a potência do módulo é dada por:

$$P_{mod} = V_{mod}I_{mod} \quad (4.1)$$

Temos que [2],

$$\frac{dP_{mod}}{dV_{mod}} = I_{mod} + V_{mod} \frac{dI_{mod}}{dV_{mod}} \quad (4.2)$$

No momento em que a máxima potência é atingida, temos que:

$$I_{mod} + V_{mod} \frac{dI_{mod}}{dV_{mod}} = 0 \quad (4.2.1)$$

$$\frac{dI_{mod}}{dV_{mod}} = - \frac{I_{mod}}{V_{mod}} \quad (4.3)$$

Como os valores de tensão e corrente são discretos, a equação 4.3 pode ser reescrita como,

$$\frac{\Delta I_{mod}}{\Delta V_{mod}} = - \frac{I_{mod}}{V_{mod}} \quad (4.4)$$

O método da Condutância Incremental é regido pelas equações (4.1) e (4.4). Diferente dos outros métodos, esta técnica possibilita que o arranjo fotovoltaico opere, de fato, no ponto de máxima potência. Isso ocorre quando a condição descrita pela Equação 4.4 é atingida e o controle deixa de alterar o ciclo de trabalho. Na prática, porém, essa condição raramente é atingida, pois há erros de arredondamento, as grandezas analisadas são discretas, o sensoriamento é impreciso, etc. Consequentemente, o algoritmo de controle considera uma faixa aceitável para qual admite que o sistema esteja operando no ponto de máxima potência, mesmo que o erro de regime não alcance o zero absoluto.

5. Sistema Fotovoltaico

Este Capítulo apresenta o sistema fotovoltaico estudado neste trabalho. Este sistema é composto por um arranjo fotovoltaico com 9 painéis *Kyocera KC130TM*, um conversor de tensão buck-boost, um inversor VSC e um filtro para conexão com a rede. O arranjo fotovoltaico foi representado por uma fonte de corrente variável dependendo dos valores de radiação e a temperatura, essa fonte é descrita pela Equação 2.1. O sistema foi montado e simulado no PSCAD/EMTDC, os resultados obtidos serão apresentados nas próximas seções. A Tabela 5.1 apresenta as especificações para operação em condições ideais (1000W/m^2 e 25°C) do painel *Kyocera KC130TM*.

Tabela 5. 1 - Especificações do painel *Kyocera KC130TM*

Potência máxima P_{\max}	130W (+10%/-5%)
Tensão V_{mpp}	17,6V
Corrente I_{mpp}	7,39A
Tensão V_{oc}	21,9V
Corrente I_{sc}	8,02A
Coefficiente de Temperatura em V_{oc}	$-8,21 \times 10^{-2} \text{ V}/^\circ\text{C}$
Coefficiente de Temperatura em I_{sc}	$3,18 \times 10^{-3} \text{ A}/^\circ\text{C}$

A partir da Tabela 5.1 é possível obter os dados do gerador fotovoltaico composto por nove painéis. Para fins de simulação, este gerador será representado por uma fonte de corrente cujo código pode ser encontrado no Anexo 1 [6]. A Figura 5.1 apresenta o esquemático do sistema simulado no PSCAD/EMTDC. A tensão V_{cc} é a tensão no elo CC, entrada do inversor.

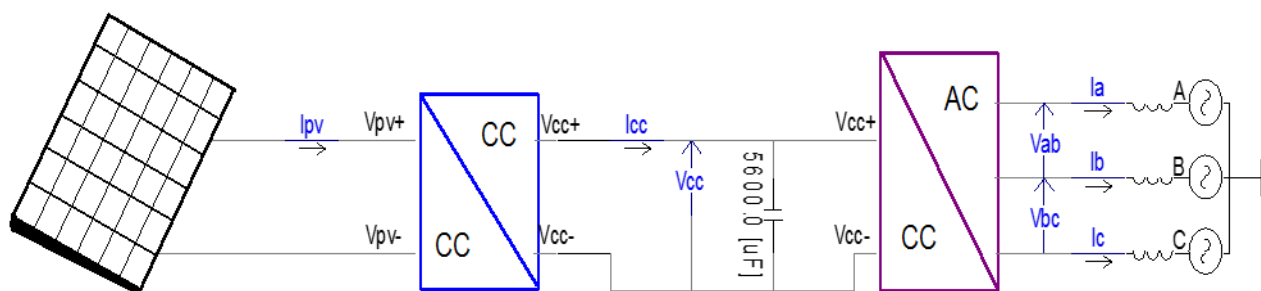


Figura 5. 1- Sistema fotovoltaico conectado à rede modelado no PSCAD/EMTDC [8].

5.1 Parâmetros do Sistema

Esta seção apresenta os parâmetros utilizados na simulação da conexão do gerador fotovoltaico com a rede de distribuição. As informações mais básicas são apresentadas a seguir:

Gerador Fotovoltaico: 9 painéis *Kyocera KC130TM* conectados em série.

$$P_{max} = 1170W$$

$$V_{mpp} = 158,4V$$

$$I_{mpp} = 7,39A$$

$$I_{sh} = 8,02A$$

Rede de Distribuição

Tensão de Linha: 220V

Frequência: 60Hz

É importante acrescentar que, durante a simulação, todos os valores foram transformados para o sistema por unidade (pu) tendo como base os valores acima.

5.1.1 Projeto do Conversor Buck-Boost

O projeto do conversor Buck-Boost foi feito com base no gerador fotovoltaico utilizado. Para que o conversor eleve a tensão de entrada vinda do gerador fotovoltaico, e que esta possa ser invertida, considerar-se-á uma tensão de saída de 450V e uma frequência de operação de 4.86 kHz neste projeto. A resistência de saída pode ser obtida da seguinte forma:

$$P_{max} = \frac{V_o^2}{R} \therefore R = \frac{450^2}{1170} \cong 173\Omega \quad (5.1)$$

A partir da equação 3.14, e considerando uma tensão de entrada como a tensão de circuito aberto, tem-se que:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-D}{1-D} \therefore D = -\frac{450}{-450 - 197.1} = 0,695 \quad (5.2)$$

De acordo com [1] a indutância que determina o limite entre a operação no modo contínuo e no modo descontínuo é dada por,

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 R}{2f} \quad (5.3)$$

Esta equação nos fornece o seguinte valor de indutância:

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,695)^2 \times 173}{2 \times 4860} = 1,7mH \quad (5.4)$$

Ainda de acordo com [1], a capacitância de saída é calculada por:

$$C_{out} = \frac{DV_o}{V_r R f} \quad (5.5)$$

Em (5.5), V_r é o *ripple* admitido na tensão de saída e nesse projeto será considerado o valor de 22,5V, que corresponde a 5% da tensão de saída estabelecida. Assim:

$$C_{out} = \frac{0,695 \times 450}{22,5 \times 173 \times 4860} = 16,5\mu F \quad (5.6)$$

Para obter uma margem de segurança e garantir que o conversor irá operar somente no modo contínuo, a indutância e a capacitância foram ajustadas para 6.2mH e 18 μ F, respectivamente. Além disso, esses são valores comerciais próximos do resultado obtido por meio de cálculo. A configuração do conversor desenvolvido neste trabalho é apresentado na Figura 5.2 e o gráfico da sua tensão de saída, na Figura 5.3. Pode-se perceber que o conversor projetado funciona de maneira satisfatória e fornece os 450V na saída.

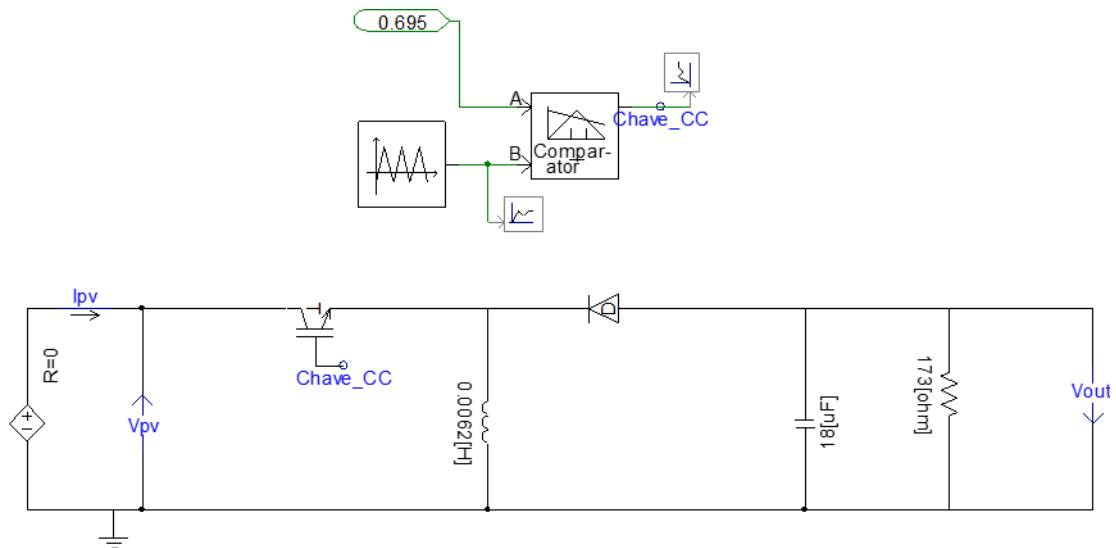


Figura 5. 2 - Conversor Buck-Boost simulado no PSCAD/EMTDC.

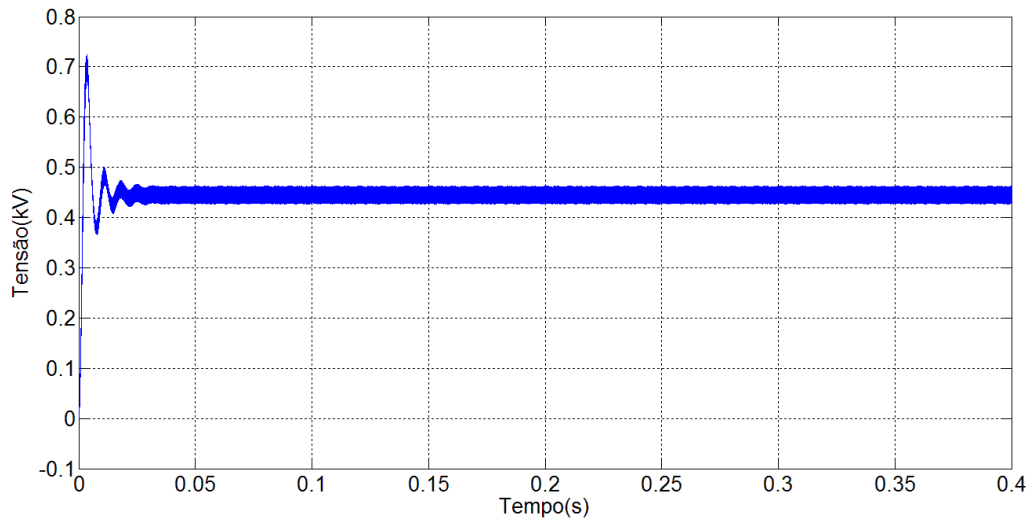


Figura 5. 3 - Tensão de saída do conversor CC-CC Buck- Boost simulado no PSCAD/EMTDC.

Vale ressaltar que o controle usado nesta simulação teve apenas o intuito de modelar o conversor CC-CC Buck-Boost. Nesse trabalho, ainda será necessário desenvolver um dos métodos de rastreamento de máxima potência, apresentados na Seção 4.2, para que o ponto de operação adotado seja sempre aquele onde a potência retirada do módulo é máxima.

5.1.2 Controle do Conversor CC-CC Buck-Boost

O conversor CC-CC deve fornecer uma tensão regulada na saída, mesmo sob condições de carga e tensão de entrada variáveis. Além disso, para que o conversor opere no

ponto de máxima potência, o ciclo de trabalho precisa ser ajustado de acordo com o método de rastreamento de máxima potência mais apropriado. O modelo de rastreamento de máxima potência utilizado para o controle do conversor foi baseado no método Perturba e Observa, conforme apresentado na Seção 4.2. Este método foi escolhido pela facilidade de implementação e a qualidade de resposta associado a um esforço computacional razoável. A Figura 5.4 mostra o diagrama de controle utilizado para este propósito.

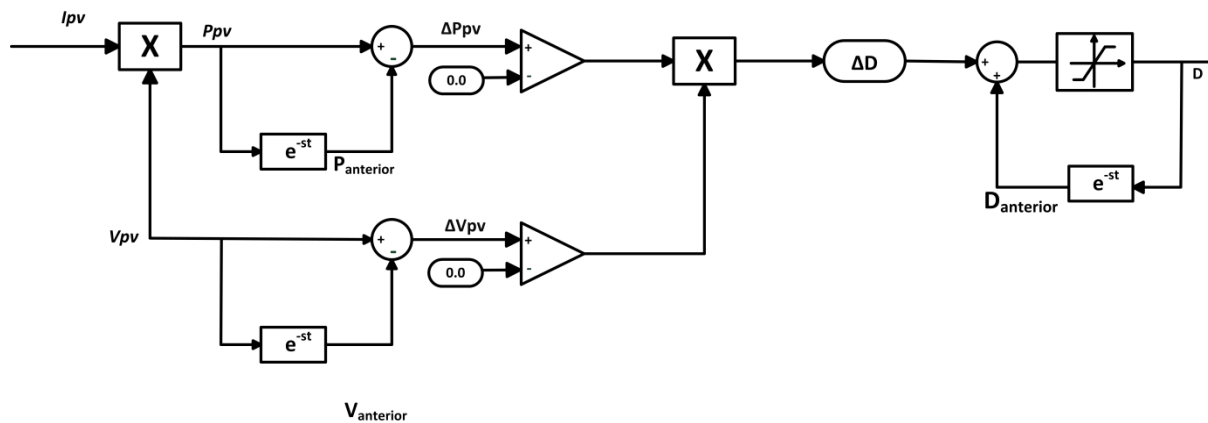


Figura 5.4 - Diagrama de controle para implementação da técnica de rastreamento de máxima potência pelo método de Perturba e Observa.

O diagrama de controle apresentado na Figura 5.4 tem a função de calcular a potência instantânea gerada pelo arranjo, P_{pv} , a partir dos valores medidos de corrente e tensão de saída do módulo I_{pv} e V_{pv} (entrada do conversor), respectivamente. Esta potência é comparada com o seu valor anterior. Caso a potência, P_{pv} , seja maior que o valor de potência no instante anterior ($P_{anterior}$), o comparador retorna o valor 1. Caso P_{pv} seja menor, o valor retornado é -1. Similarmente, o valor da tensão também é comparado com o seu valor anterior ($V_{anterior}$). Porém, nesse caso, o comparador analisa a tensão de forma diferente. Se V_{pv} for maior que $V_{anterior}$, o valor fornecido é -1. Se V_{pv} for menor que $V_{anterior}$, o comparador retorna 1. Assim é feita a análise pelo método de Perturba e Observa.

Essa análise dos valores atuais e anteriores de potência e de tensão permite que o controle aumente ou diminua o ciclo de trabalho de acordo com a Tabela 5.2. A primeira coluna da Tabela 5.2 indica o número de casos possíveis com a associação dos valores retornados pelo comparador. A segunda, terceira, quarta e quinta colunas mostram qual dos casos de potência e tensão estão ocorrendo. A sexta coluna mostra o sinal associado ao ΔD , indicando o aumento ou a redução do ciclo de trabalho. Esse sinal decorre da multiplicação

da saída do comparador para cada caso. Durante a simulação foi admitido que $\Delta D = 0.0001$. Por fim, a sétima coluna apresenta o efeito na tensão de entrada do conversor CC/CC do tipo buck-boost (a tensão de saída do conversor CC/CC é mantida constante e igual a 450V).

Tabela 5. 2 - Sinal de incremento do ciclo de trabalho

Casos	$\Delta P > 0$	$\Delta P < 0$	$\Delta V > 0$	$\Delta V < 0$	ΔD	Vin
1	1		-1		Negativo	Aumenta
2	1			1	Positivo	Diminui
3		-1	-1		Positivo	Diminui
4		-1		1	Negativo	Aumenta

É importante destacar que, após as medições de tensão e corrente de saída do gerador fotovoltaico, o sinal precisa ser tratado de modo que a frequência de interesse que compõe todo o sinal fosse destacada, neste caso, como o sinal que se deseja obter é um sinal CC, utilizou-se um filtro passa baixa do tipo *Butterworth* de 3ª ordem a fim de atenuar os sinais de alta frequência presentes na medição. A Figura 5.5 mostra a diferença entre os sinais de tensão que passam pelo filtro e os que são diretamente medidos.

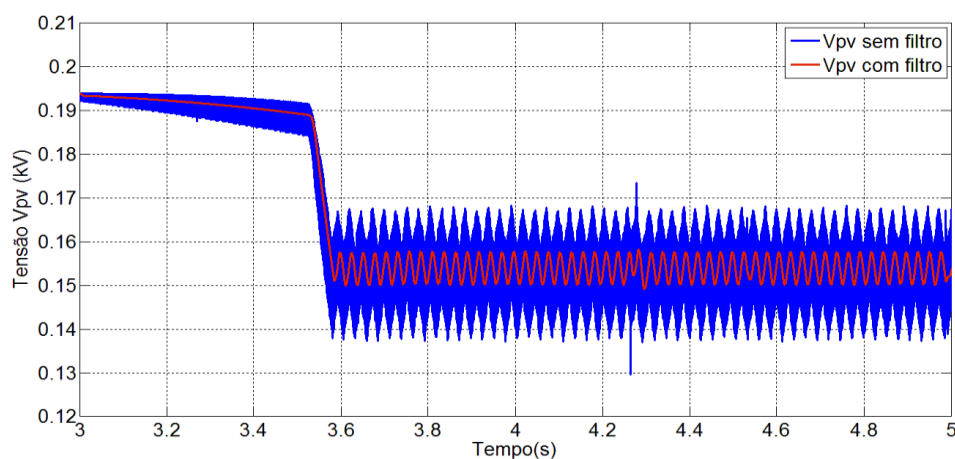


Figura 5. 5 - Efeito do filtro de Butterworth de 3ª ordem em um sinal de tensão.

5.1.3 Controle do Inversor

Neste trabalho, o controle do inversor CC/CA deve atuar no sentido de manter o balanço energético do sistema. Geralmente, em sistemas dessa natureza, o conversor opera com fator de potência unitário, ou seja, ele somente fornece potência ativa, trabalhando com potência reativa nula. A técnica utilizada para o controle do inversor é baseada na modulação

de vetores espaciais, que tem por objetivos gerar as referências para o controle PWM. Todos os vetores das coordenadas estáticas abc podem ser representados em um plano complexo por vetores com componentes reais (α) e complexas (β) [6]. Isto é feito por meio da Transformada de Clarke. Um sistema trifásico é definido por três vetores de tensão (ou corrente) em função da frequência angular ω e do tempo t , como pode ser visto na Figura 5.6. A Transformada de Clarke define este sistema nos eixos ortogonais α e β , conforme também é mostrado na Figura 5.6.

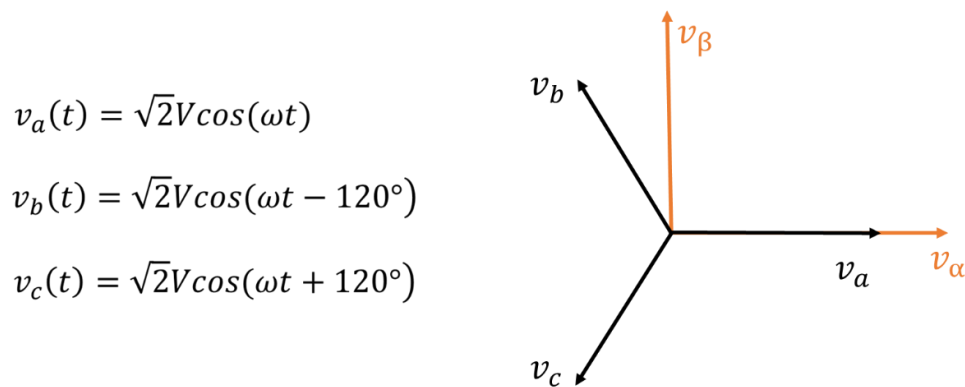


Figura 5. 6 - Vetores de um sistema trifásico abc e ortogonal $\alpha\beta$.

Os vetores das coordenadas $\alpha\beta$ são definidos por [6],

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Se os vetores das tensões de linha são três formas de onda balanceadas com amplitude \hat{v}_c e frequência angular ω , o resultado da modulação de sinais nas coordenadas $\alpha\beta$ é um vetor com módulo fixo \hat{v}_c que gira com frequência angular ω , como pode ser visto na Figura 5.7 [6].

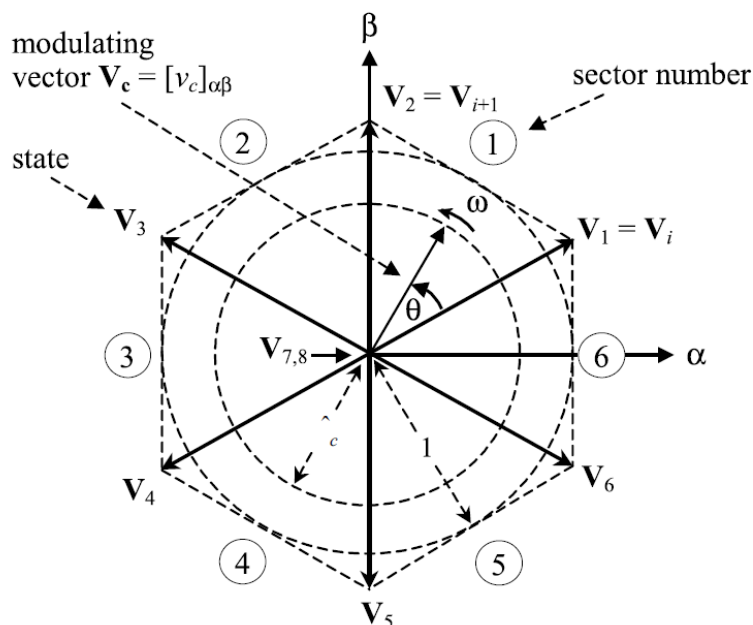


Figura 5.7 – Representação dos vetores espaciais [6].

Para realizar a Transformada de Clark é preciso detectar a referência do controle da modulação do inversor, ou seja, é necessário identificar a fase dos vetores de tensão. O *Phase-Locked-Loop* (PLL) tem como objetivo principal gerar um sinal sincronizado com a componente fundamental de um sinal de referência. Tal sinal deve seguir a frequência e o ângulo de fase da referência, mesmo durante defeitos [10]. Portanto, para identificar a fase dos vetores v_α e v_β , fez-se uso do diagrama de blocos apresentado na Figura 5.8.

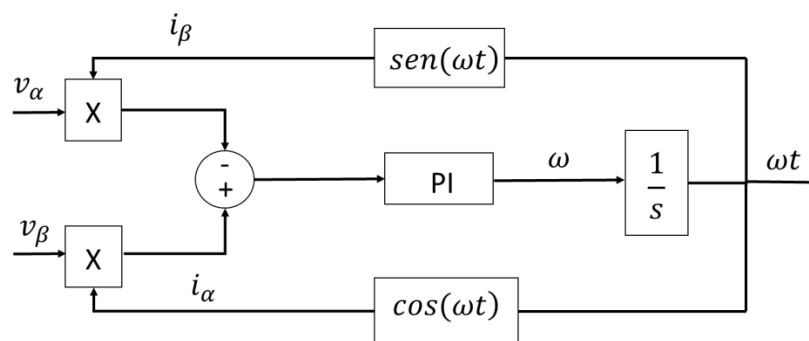


Figura 5.8 – Diagrama do q - PLL [9].

O controlador proporcional e integral (PI) presente no diagrama do PLL apresentado na Figura 5.8 é descrito por $F(s) = K_p + \frac{1}{\tau_i s}$, em que $K_p = 800$ e $\tau_i = 0.0003s$. Esses ganhos foram obtidos empiricamente. O PLL simulado forneceu uma rampa ($\omega(t)$) exibida em vermelho na Figura 5.9 que foi obtida através de simulação na ferramenta computacional

PSCAD/EMTDC. A curva em azul é a senóide v_α . Pode-se perceber que o sinal ωt está sincronizado com a fase da tensão v_α , ou seja, o período e o ângulo da rampa e da senóide são equivalentes.

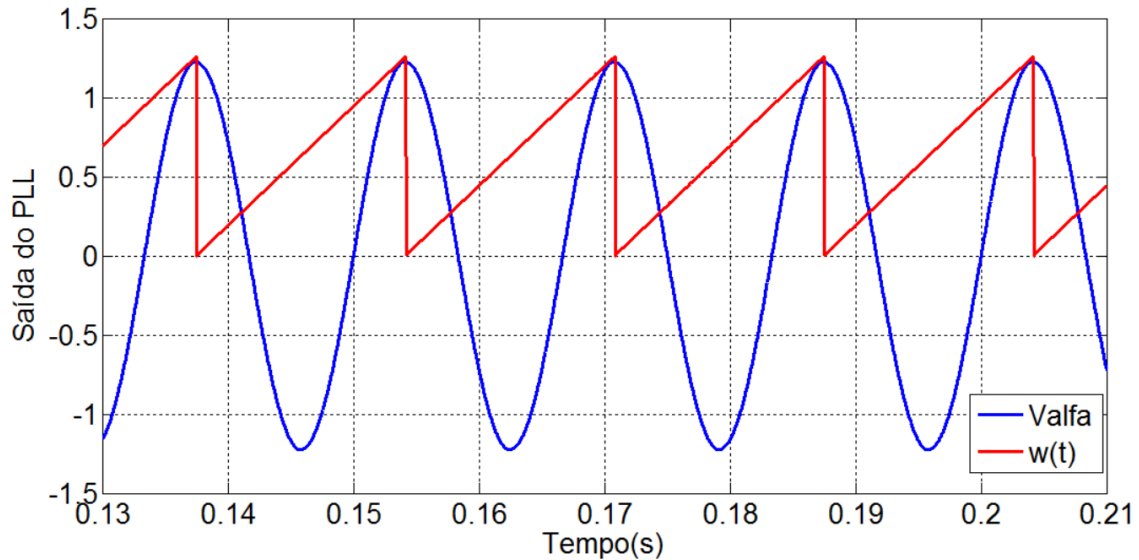


Figura 5.9 – Sinal de saída do q-PLL.

Com a detecção da fase do sistema, montou-se o diagrama de controle do inversor que está apresentado na Figura 5.10.

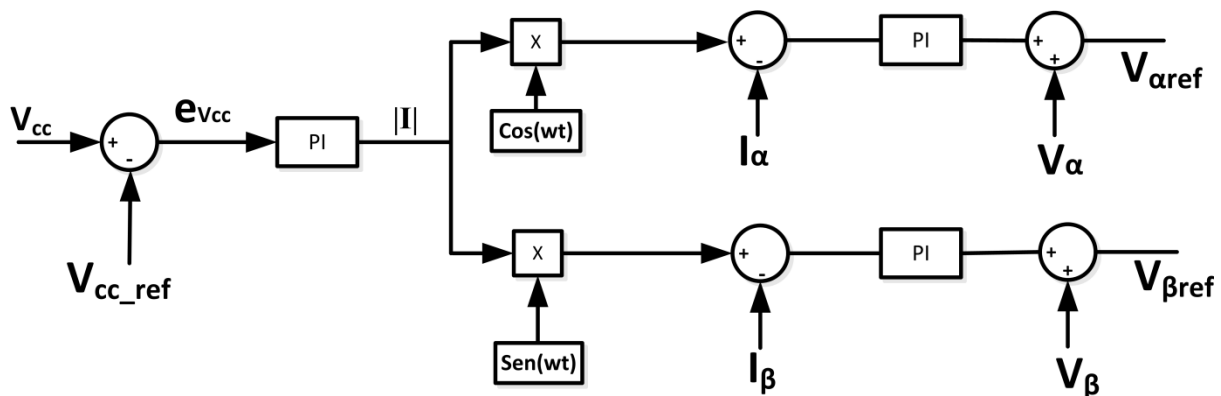


Figura 5.10 - Diagrama de blocos do controle do inversor.

Este controle é feito a partir da leitura da tensão no elo CC e a sua comparação com a tensão de referência, neste caso, 450V. O resultado desta comparação é o erro $e_{V_{cc}}$. O controle do inversor tem a função de fornecer a referência nas coordenadas $\alpha\beta$ para o seu chaveamento. A tensão $V_{\alpha_{ref}}$ é dada por (5.9) e a tensão $V_{\beta_{ref}}$ é dada de maneira análoga.

$$V_{\alpha_{ref}} = (e_{V_{cc}} \cdot G(s) \cdot \cos(\omega t) - I_{\alpha}) \cdot G_2(s) + V_{\alpha} \quad (5.9)$$

Sendo $G(s) = K_p + \frac{1}{\tau_1 s}$, a função de transferência do primeiro controlador PI e $G_2(s) = K_{p2} + \frac{1}{\tau_2 s}$, a função de transferência do segundo controlador PI. Os ganhos K_p, K_{p2}, τ_1 e τ_2 , são os ganhos proporcionais e integrais. Esses ganhos foram obtidos empiricamente e os valores obtidos foram:

$$K_p = 10;$$

$$K_{p2} = 3;$$

$$\tau_1 = 0.001s;$$

$$\tau_2 = 0.003s.$$

Com a obtenção das tensões de referência nas coordenadas $\alpha\beta$, aplica-se a Transformada Inversa de Clark para obter as respectivas referências nas coordenadas abc . Estas referências são aplicadas ao PWM do controle das chaves do inversor.

6. Resultados

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos com a simulação do circuito de conexão do gerador fotovoltaico na rede de distribuição no programa de simulação computacional PSCAD/EMTDC. Para a análise do comportamento desse sistema serão consideradas as seguintes condições operativas:

- Sistema fotovoltaico operando em condições de regime permanente;
- Variações na radiação e na temperatura incidentes no arranjo fotovoltaico;
- Falta trifásica na rede de distribuição, na saída do inversor CC/CA.

6.1 Operação em regime permanente

Como foi exposto anteriormente, a potência máxima que o gerador fotovoltaico pode fornecer nas suas condições ideais é 1170W. A potência reativa deve permanecer nula, uma vez que o sistema foi projetado para operar com fator de potência unitário. Para melhor entender a operação do sistema, a sua sequência de partida deve ser analisada. Geralmente, sistemas elétricos de alta complexidade têm determinados procedimentos operativos de partida do sistema de potência, ou seja, procedimentos para operar esse sistema da potência nula até o seu valor nominal em regime permanente. A sequência de partida desse sistema será descrita a seguir.

O chaveamento do inversor é o primeiro a ser acionado pois o inversor é o equipamento responsável pelo controle da tensão no elo CC. Além disso, o capacitor presente neste elo necessita de algum tempo para se carregar. Assim, o chaveamento do inversor foi definido para começar no tempo $t = 0,5s$, com referência de tensão constante. Antes deste instante, o capacitor é carregado exclusivamente pela rede de distribuição atingindo aproximadamente 0,7pu. O controle do inversor começa a operar 0,3s após o início do chaveamento do inversor, em $t = 0,8s$, elevando a tensão do elo para 1pu depois de algumas oscilações. Em $t = 2,5s$, quando a tensão no elo CC está constante e igual a 1,0pu, o transistor do conversor CC-CC começa a chavear com um ciclo de trabalho constante e igual a 0,01. Depois de 0,5s, em $t = 3,0s$ o controle do conversor CC-CC, com o MPPT, começa a operar. Este processo é apresentado resumidamente na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Coordenação de partida dos controles.

	Tempo
Inversor ($V_{ref} = \text{constante}$)	0,5s
Controle do Inversor	0,8s
Conversor ($D=\text{constante}$)	2,5s
Controle do Conversor	3,0s

Considerando a coordenação descrita, a Figura 6.1 apresenta, em verde, a tensão no elo CC. Na curva em vermelho é mostrado o módulo da corrente que foi gerada pelo controlador proporcional integral a partir do erro entre a tensão V_{cc} e a tensão de referência. Na Figura 5.10, apresentada no Capítulo 5, esse sinal de corrente está representado por $|I|$. Tais variáveis foram discutidas na Seção 5.1.3 deste trabalho. A Figura 6.2 mostra mais detalhadamente o efeito desta coordenação de controles no elo CC. Pode-se perceber que antes do chaveamento do inversor se iniciar, a tensão do elo já está parcialmente carregada pela rede de distribuição. Quando o inversor e seu respectivo controle entram em operação a tensão do elo oscila por alguns segundos até se estabilizar no valor de regime. Os efeitos causados no ciclo de trabalho e na potência gerada pelo arranjo fotovoltaico serão analisados posteriormente.

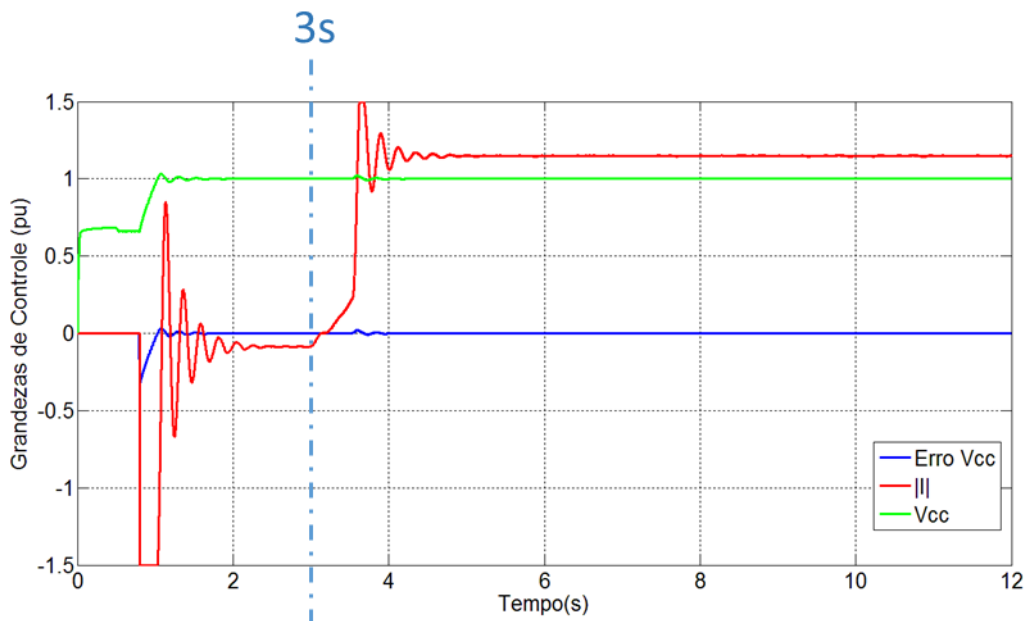


Figura 6. 1 - Resposta das grandezas do controle do inversor.

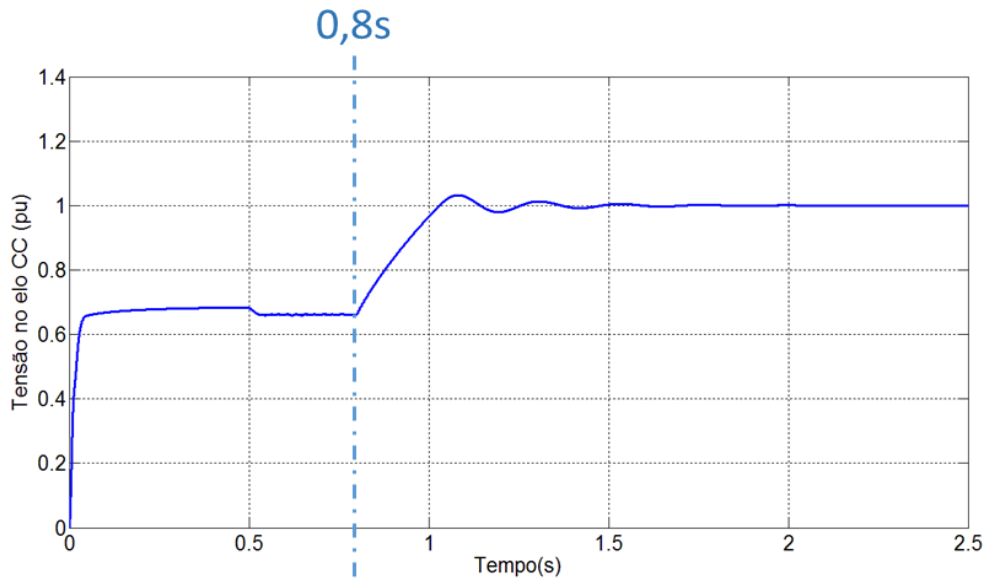


Figura 6. 2 - Detalhamento da tensão no elo CC.

Como pode ser visto na Figura 6.1, o erro entre a tensão do elo CC e a tensão de regime permanente atinge zero logo após o início da operação do controle do inversor, ou seja, a tensão V_{CC} atinge seu valor de referência, 1pu. A amplitude da corrente oscila por cerca de 1s até atingir um valor contínuo bem pequeno, uma vez que o conversor Buck-Boost ainda se encontra desligado. Quando o controle do conversor CC-CC é inicializado, em $t = 3s$, a amplitude de corrente se eleva para cerca de 1pu, atingindo seu valor nominal. A Figura 6.3 mostra os sinais de referências das coordenadas ortogonais $\alpha\beta$ gerados pelo controle do inversor logo após todos os controles entrarem em operação de regime permanente.

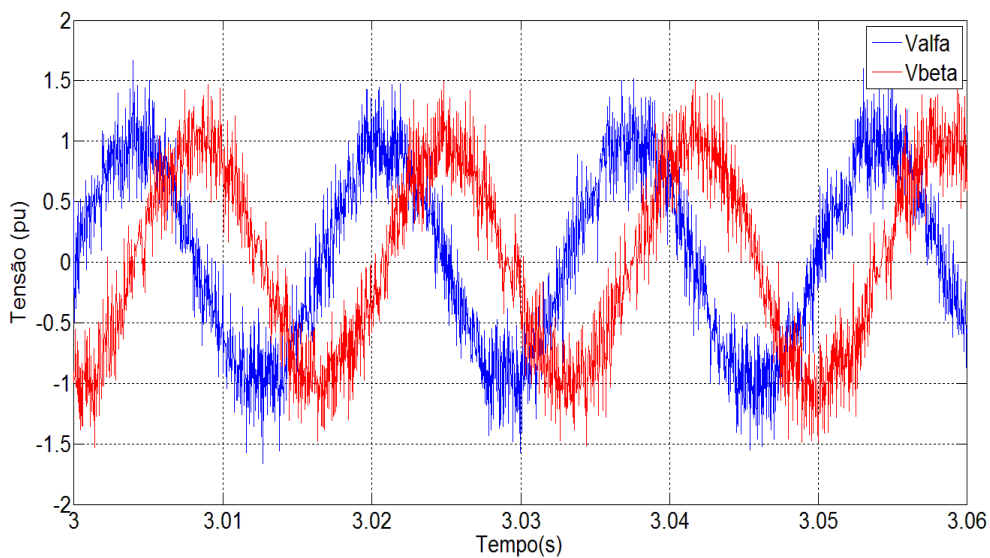


Figura 6. 3 - Referências de tensão nas coordenadas ortogonais $\alpha\beta$.

Em posse das referências nas coordenadas $\alpha\beta$ e a partir da Transformada Inversa de Clarke foi possível obter as referências de tensão nos eixos abc . O comportamento destas referências é mostrado na Figura 6.4. Nesse caso, apesar do conteúdo harmônico em altas frequências apresentado, são obtidas as três ondas senoidais defasadas de 120° .

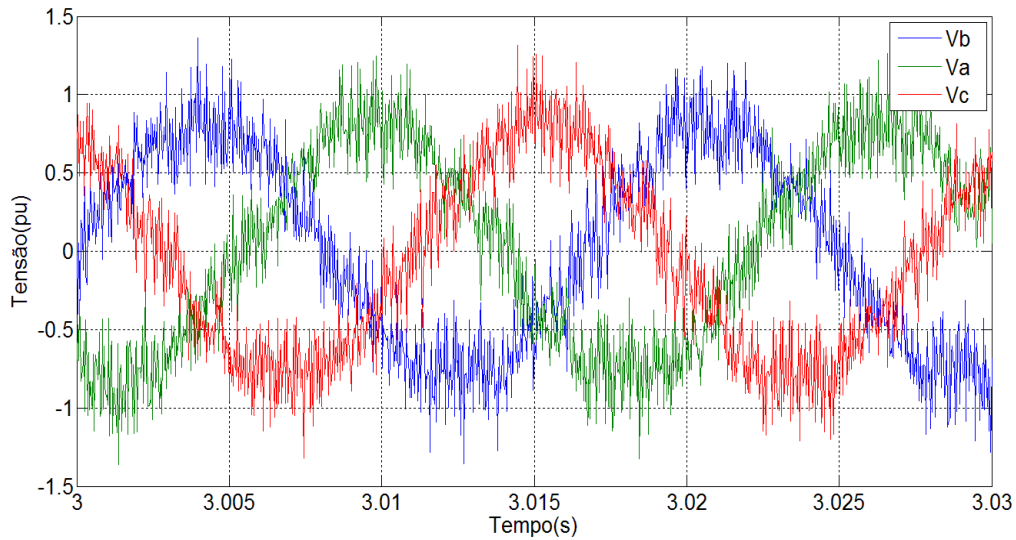


Figura 6.4 - Referência de tensão das coordenadas abc.

A partir das referências obtidas, foi possível obter as respostas de saída do sistema, ou seja, as grandezas de tensão e corrente na rede CA. Essas grandezas são apresentadas nas Figuras 6.5 e 6.6, respectivamente.

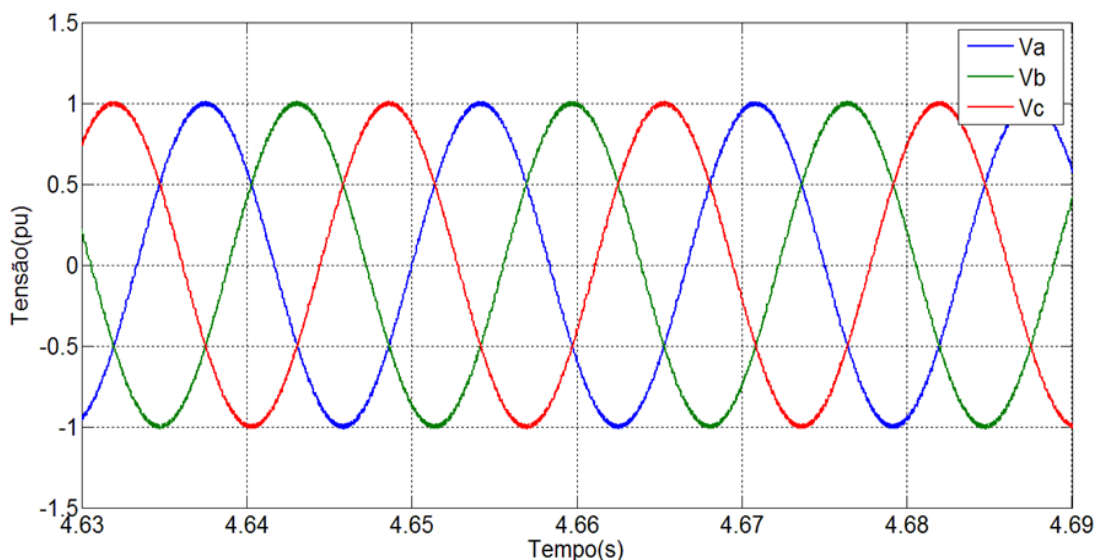


Figura 6.5 – Tensão na rede CA.

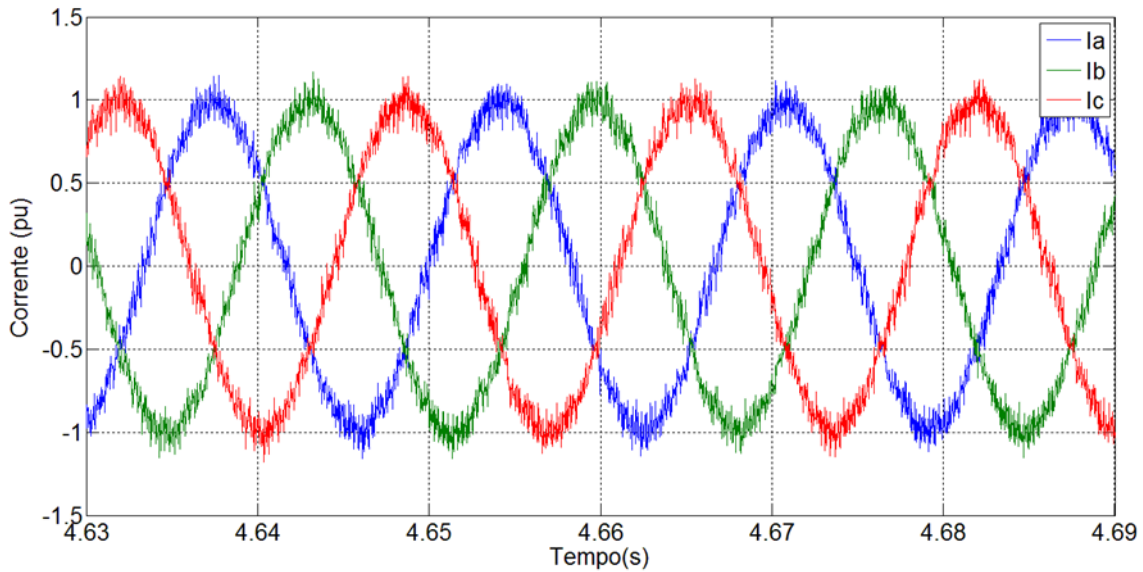


Figura 6. 6 – Corrente na rede CA.

O sistema fotovoltaico estudado tem o ponto de operação de máxima potência dado por $V_{pv} = 158,4V$ e $P = 1170W$. Sendo assim, considerando a tensão de saída mantida constante e igual a $450V$ e a partir da Equação 3.14, o ciclo de trabalho pode ser estimado. Assim:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-D}{1 - D} \therefore D = -\frac{450}{-450 - 158,4} = 0,7396 \quad (6.1)$$

O gráfico da Figura 6.7 mostra o ciclo de trabalho do conversor CC-CC e sua coerência entre o valor analítico estimado e o valor encontrado na simulação, durante regime permanente. Nessa figura é possível visualizar que o valor obtido em regime é de aproximadamente 0.7398. Sendo assim, o valor medido está de acordo com o valor calculado em (6.1). Isso mostra que o controle MPPT modelado no PSCAD funcionou de maneira apropriada e coerente. Pode-se perceber, também, que antes do controle MPPT entrar em operação (em $t = 3s$) o ciclo de trabalho estava constante e igual a 0.01, como mencionado anteriormente.

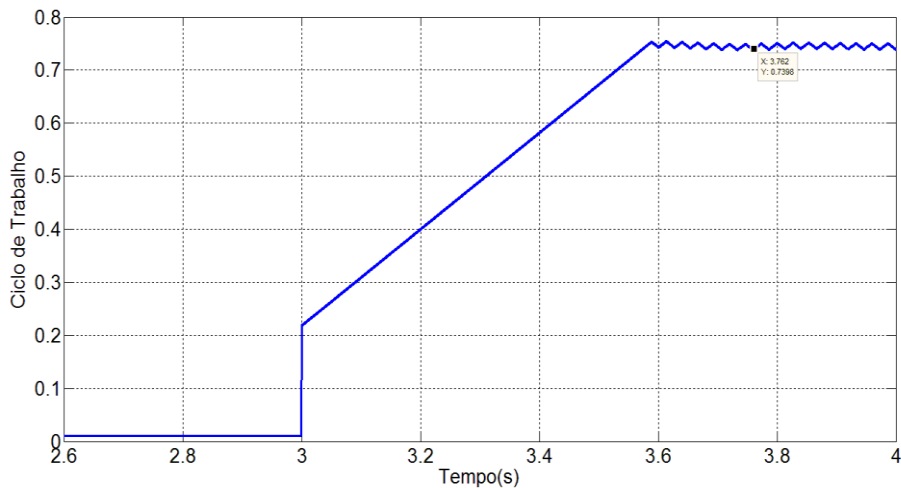


Figura 6.7 - Ciclo de Trabalho

A Figura 6.8 apresenta a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico. Pode-se perceber que a potência começa a se elevar em $t = 3s$, tempo em que o controle MPPT começa a atuar. Antes deste controle entrar em operação, o ciclo de trabalho estava fixado em 0,01 e por esta razão a potência gerada permanece praticamente nula (tensão de saída do conversor CC muito baixa). O valor de regime permanente obtido nas condições ideais ($1000W/m^2$ e $25^{\circ}C$) foi de $P = 1141W$. Este valor também é considerado satisfatório e apresenta um erro menor que 3% em relação ao seu ponto de operação de máxima potência ($P = 1170W$).

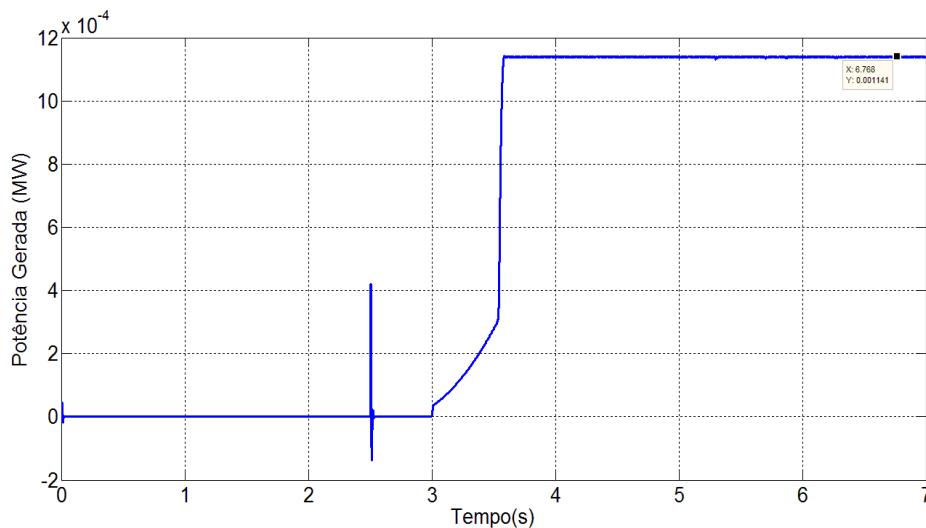


Figura 6.8 - Potência gerada pelo arranjo fotovoltaico

Além da potência ativa gerada pelo arranjo fotovoltaico, pode-se analisar o comportamento das potências ativa e reativa entregues pelo inversor à rede CA receptora. As respostas das potências podem ser vistas na Figura 6.9. Como esperado, a potência reativa do inversor é nula durante a sua operação em regime permanente. A potência ativa entregue à carga pelo inversor se estabiliza em cerca de 1s após o controle MPPT atuar, em $t = 3s$.

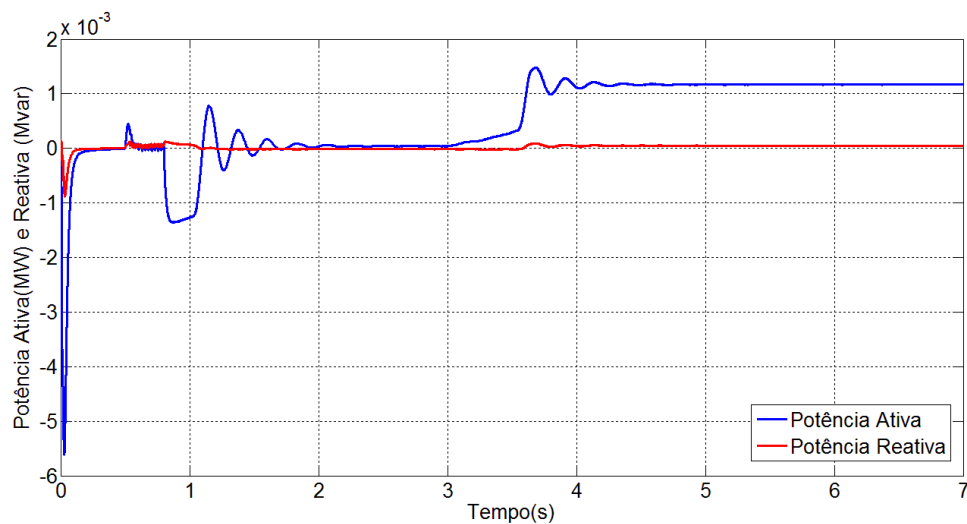


Figura 6. 9- Potências ativa e reativa entregue à rede CA receptora pelo inversor.

Os resultados referentes à operação em regime permanente mostraram que o sistema fotovoltaico desenvolvido nesse trabalho apresentou um desempenho satisfatório. Os valores obtidos nas simulações ficaram bem próximos aos valores teóricos calculados, o que mostra que o sistema está bem projetado e que apresenta um comportamento normal.

As respostas apresentadas nesse item contemplam apenas a operação em regime permanente e não consideram variações na radiação e na temperatura, o que na prática não acontece. Por esse motivo, as seções a seguir apresentam os resultados provenientes deste sistema após sofrer algumas perturbações dessa natureza.

6.2 Efeito de Variações na Radiação e na Temperatura

Com o objetivo de analisar se o sistema fotovoltaico desenvolvido resiste a variações na radiação e na temperatura, esta seção apresenta as respostas do sistema quando este é submetido a 1300 W/m^2 com 30°C e quando submetido a 700 W/m^2 com 20°C . O sistema permanece com a mesma coordenação de controle apresentada na seção anterior.

Primeiramente, as Figuras 6.10, 6.11 e 6.12 apresentam as curvas PV do módulo estudado obtidas a partir do software MATLAB através do código exposto no Anexo 2 [5].

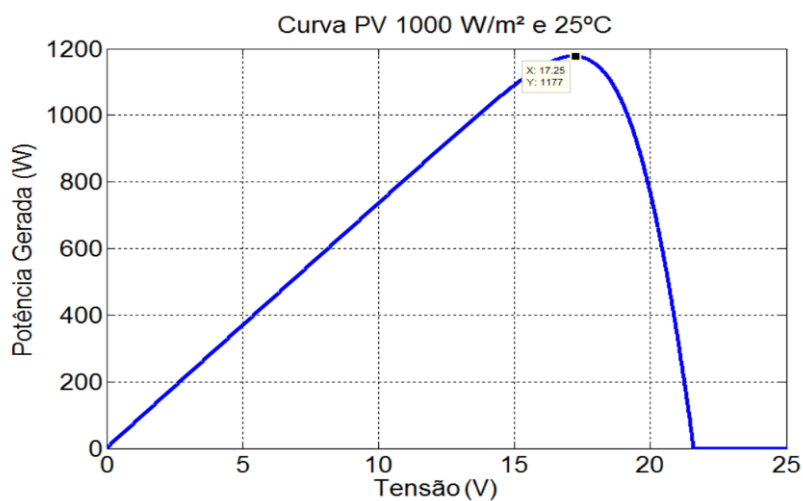


Figura 6. 10 - Curva PV para 1000W/m² e 25°C

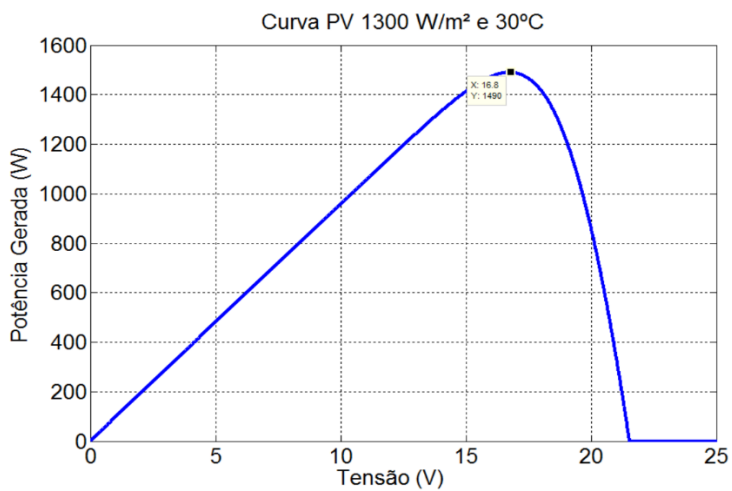


Figura 6. 11- Curva PV para 1300W/m² e 30°C

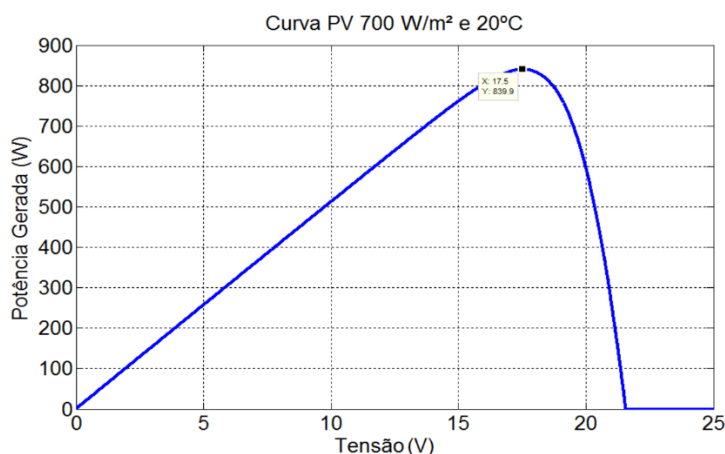


Figura 6. 12 - Curva PV para 700W/m² e 20°C

As Figuras 6.10, 6.11 e 6.12 mostram que a tensão de saída da célula fotovoltaica não se altera muito com as variações de radiação e potência. Os pontos de operação para os diferentes valores de radiação e a temperatura são expostos na Tabela 6.2.

Tabela 6. 2 - Pontos de operação para diferentes valores de radiação e temperatura

<i>Radiação (W/m²)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tensão (V)</i>	<i>Potência (W)</i>
1000	25	17,25	1177
1300	30	16,8	1490
700	20	17.5	839.9

A tensão equivalente do sistema corresponde a tensão de 9 painéis em série. Como pode ser visto, a tensão de saída do sistema não se altera muito com as variações de radiação e temperatura. Isto refletirá diretamente no comportamento do ciclo de trabalho de cada caso, uma vez que este é função direta das tensões de entrada e saída do conversor CC-CC tipo Buck Boost como exposto na Equação 3.14.

6.2.1 Variação nas Condições de Radiação e Temperatura para 1300 W/m² e 30°C

Variações nas condições de radiação e temperatura sobre o arranjo fotovoltaico exercem influência na geração de energia elétrica desse arranjo. Assim, a Figura 6.13 apresenta a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico quando este é exposto a uma mudança para as condições de 1300W/m² e 30°C em $t = 5.55s$. A potência obtida foi $P = 1436W$ em regime.

A Figura 6.14 mostra que a dinâmica até que a potência gerada atinja o novo ponto de operação é consideravelmente rápida.

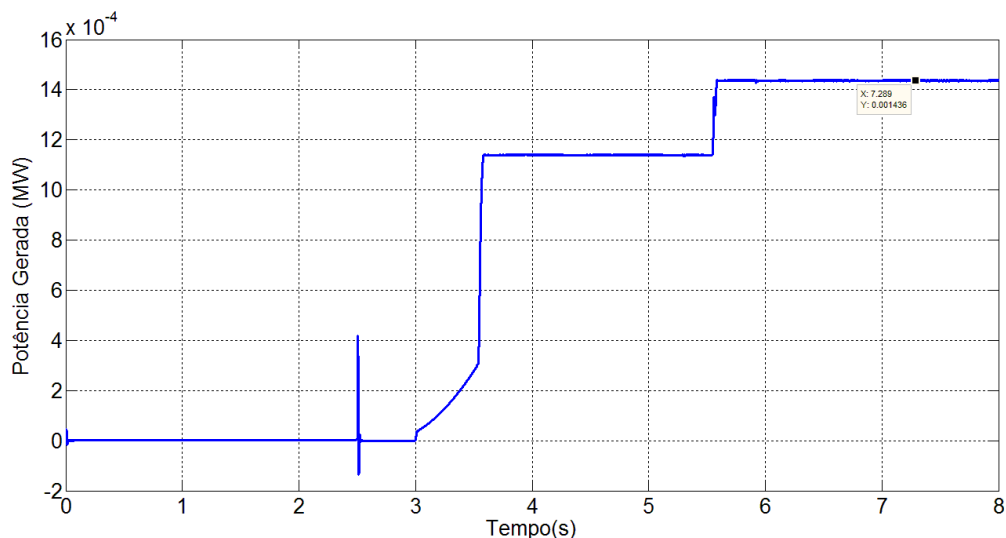


Figura 6. 13 – Comportamento da potência gerada pelo arranjo fotovoltaico nas condições de 1300 W/m² e 30°C.

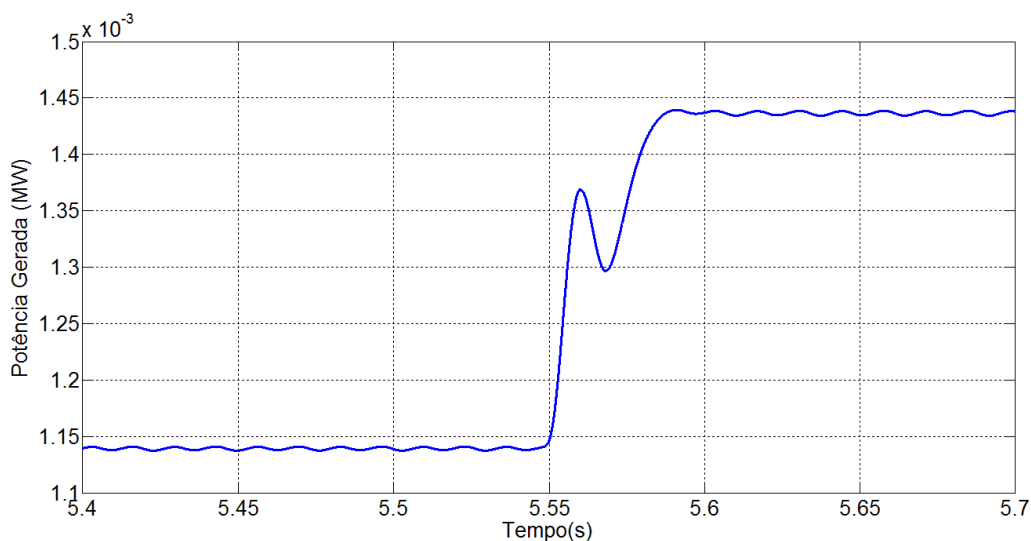


Figura 6. 14 – Dinâmica da potência gerada nas condições de 1300 W/m² e 30°C.

O efeito da variação da radiação e da temperatura no ciclo de trabalho é apresentado nas Figuras 6.15 e 6.16. A Figura 6.14 mostra com maior clareza que o ciclo de trabalho não aumenta muito sob essas condições, isto porque a curva PV não se altera muito com a variação de radiação. Isso significa que a tensão de saída do painel não muda muito e, portanto o ciclo de trabalho tem apenas pequenas variações.

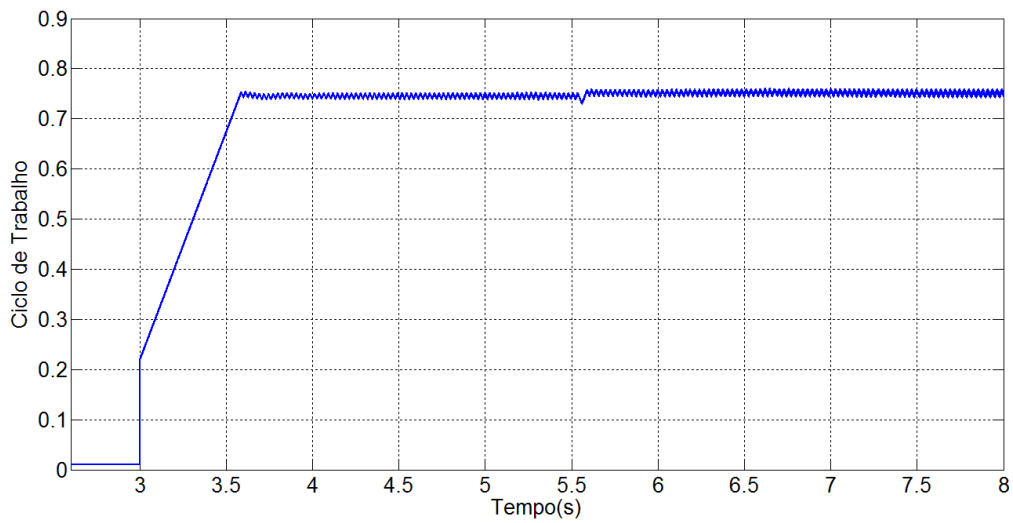


Figura 6. 15 - Ciclo de Trabalho nas condições de 1300 W/m² e 30°C

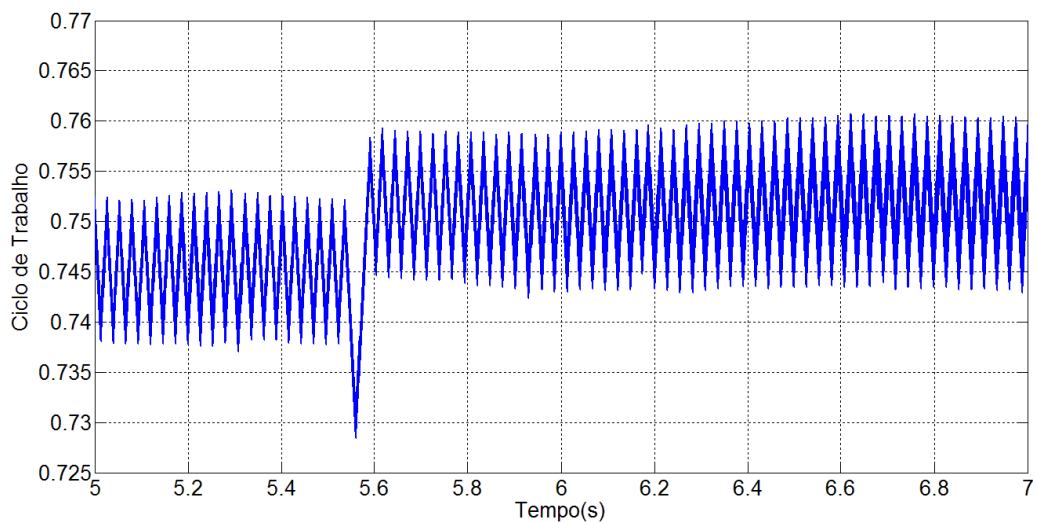


Figura 6. 2– Detalhamento da resposta do ciclo de Trabalho nas condições de 1300 W/m² e 30°C

As potências entregues a rede são apresentadas na Figura 6.17. A potência ativa sofre uma elevação para o novo ponto de operação e se estabiliza em um pouco mais de 0.5s. Conforme pode ser observado, a potência reativa ainda apresenta valor nulo nessas condições.

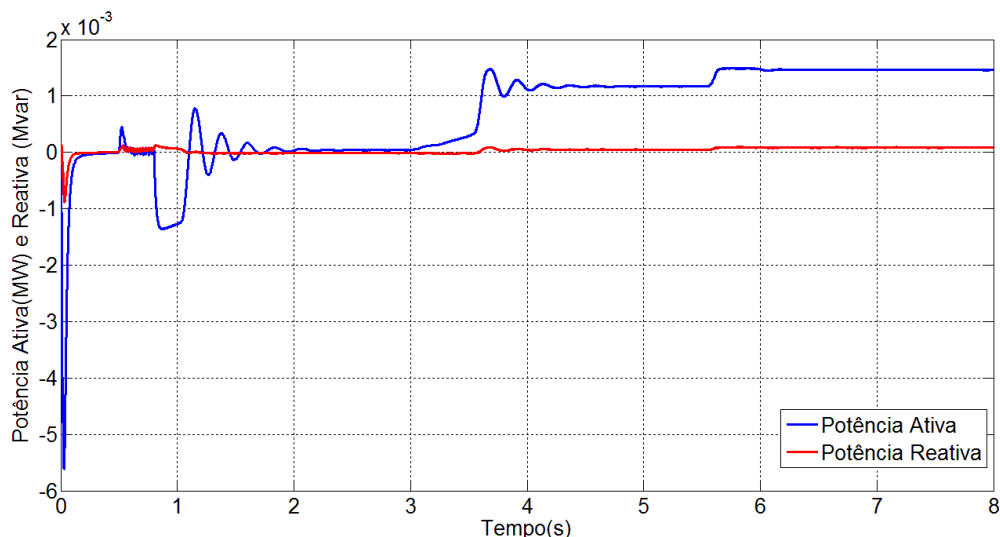


Figura 6. 37 - Potência entregue à rede nas condições de 1300 W/m² e 30°C

6.2.2 Variação nas Condições de Radiação e Temperatura para 700 W/m² e 20°C

De maneira similar, as condições de radiação e temperatura foram alteradas para 700W/m² e 20°C em $t = 5.55s$. O comportamento do sistema foi o mesmo; respostas dinâmicas muito rápidas para a alteração do ponto de operação do sistema. As Figuras 6.18 e 6.19 mostram o comportamento da potência gerada pelo arranjo. Como pode ser visto, a potência possui pouca oscilação até atingir o novo ponto de operação com $P = 815,9 W$. As Figuras 6.20 e 6.21 evidenciam o comportamento do ciclo de trabalho que, como era de se esperar, não sofreu grandes alterações.

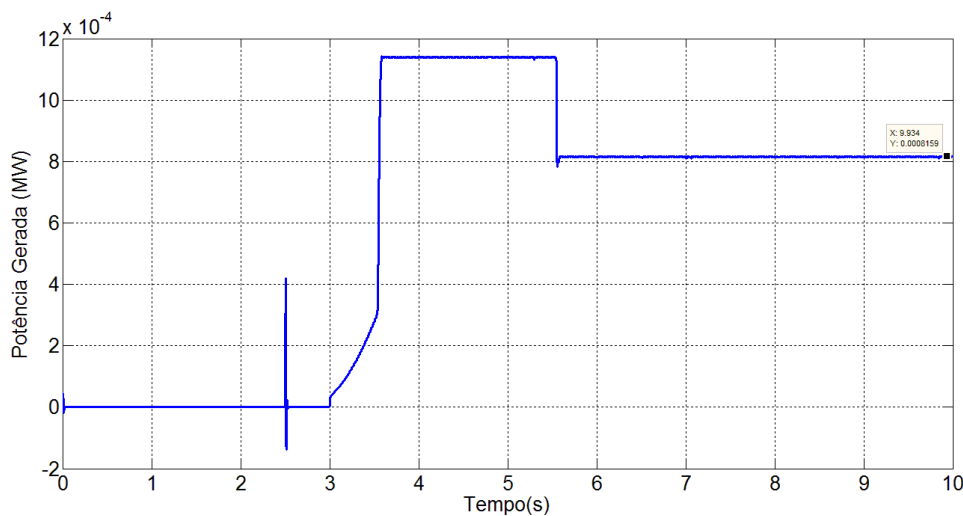


Figura 6. 4 - Potência gerada nas condições de 700 W/m² e 20°C

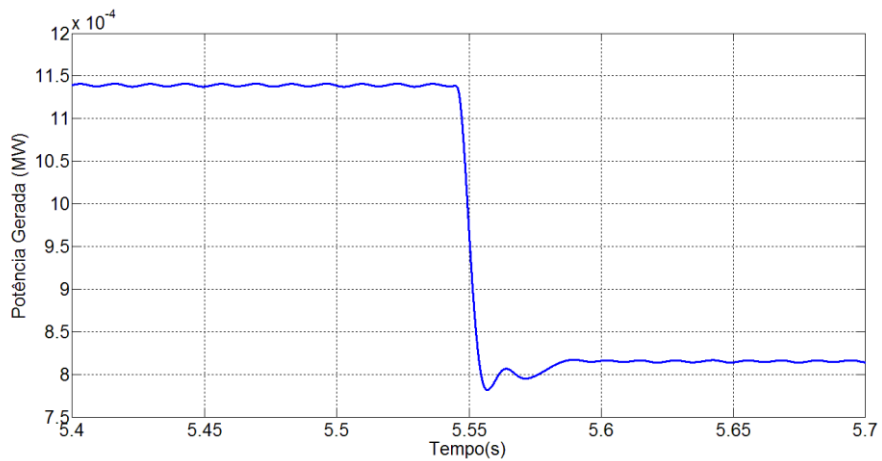


Figura 6. 19 - Detalhamento da potência gerada nas condições de 700 W/m² e 20°C

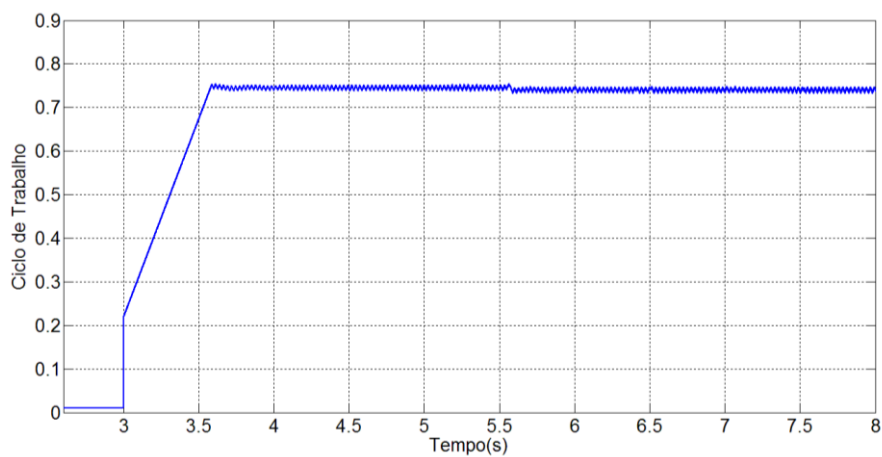


Figura 6. 20– Ciclo de Trabalho nas condições de 700 W/m² e 20°C

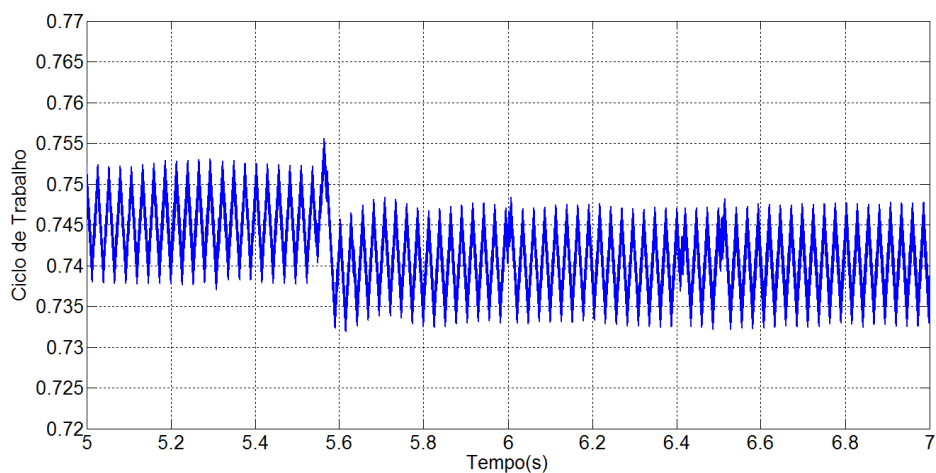


Figura 6. 21 - Detalhamento da resposta do ciclo de Trabalho nas condições de 700 W/m² e 20°C.

Similarmente ao caso em que a radiação e a temperatura foram elevadas, a Figura 6.22 mostra o efeito causado nas potências entregues à rede ao diminuir a radiação e a temperatura de exposição do arranjo fotovoltaico.

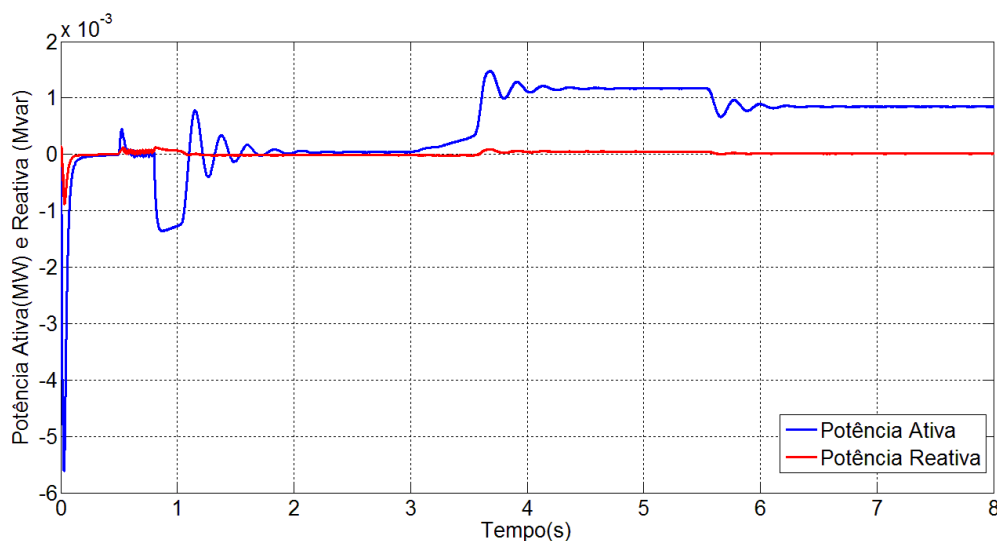


Figura 6. 22 – Potência entregue à nas condições de 700 W/m^2 e 20°C

Através da análise das respostas apresentadas nos três casos estudados nesta seção, o sistema fotovoltaico desenvolvido não apresentou problemas para atingir os novos pontos de operação, descritos na Tabela 6.2. As potências ativas geradas atingiram, rapidamente, valores próximos aos calculados e as pequenas alterações no ciclo de trabalho indicam a pouca variação na tensão de saída do arranjo fotovoltaico decorrente dessas variações.

6.3 Efeito de um curto-circuito trifásico na Rede CA do lado inversor.

O curto-circuito trifásico é um dos mais severos que pode atingir um sistema de potência. Apesar de não apresentar nenhum dispositivo de proteção o comportamento do sistema nesse tipo de curto foi avaliado.

Esta seção tem por objetivo analisar as respostas do sistema estudado quando este sofre um curto-circuito trifásico no lado da rede de distribuição. A falta foi aplicada em $t = 6\text{s}$ com duração de $0,1\text{s}$. A Figura 6.23 mostra o comportamento da tensão na rede CA do lado inversor para esse tipo de curto-circuito. Durante a falta, a tensão quase vai a zero e retorna ao seu valor de regime permanente (220V) em cerca de $0,2\text{s}$.

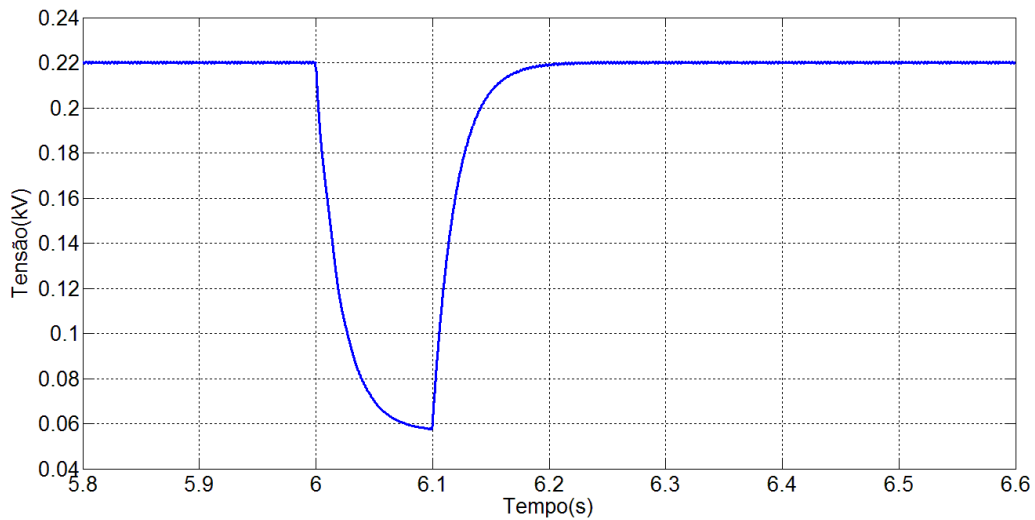


Figura 6. 23 – Tensão da rede durante uma falta trifásica

A Figura 6.24 mostra o comportamento da tensão do elo CC nessa condição de curto-circuito.

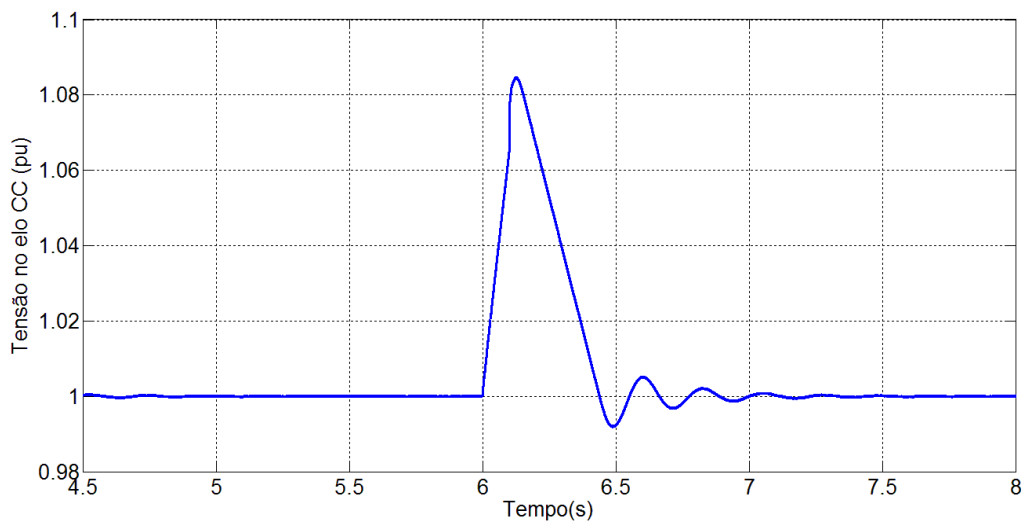


Figura 6. 24 – Tensão no elo CC durante um curto circuito trifásico

Quando há um curto-circuito trifásico no sistema CA, a potência ativa do inversor é interrompida transitoriamente e ocasiona um desequilíbrio de potência no lado CC. Esse desequilíbrio de potência no lado CC será drenado pelo capacitor CC, ocasionando sobretensões transitórias no lado CC do sistema como pode ser visto na Figura 6.24. Além

disso, pode ser visualizado os efeitos dessa sobretensão nas potências entregues à rede CA, na Figura 6.25.

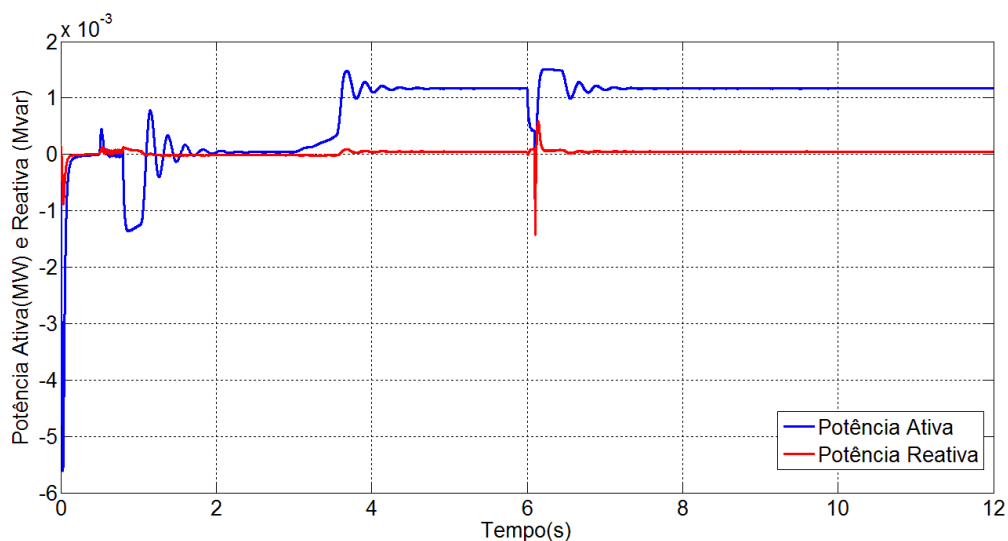


Figura 6. 25 – Comportamento da potência entregue à rede CA durante o curto-circuito trifásico.

A potência ativa gerada pelo arranjo fotovoltaico, durante o curto-circuito trifásico, é apresentada com mais detalhes em uma janela de tempo de 2s na Figura 6.26. Pode-se perceber que não houve variação significativa na potência ativa gerada pelo arranjo fotovoltaico.

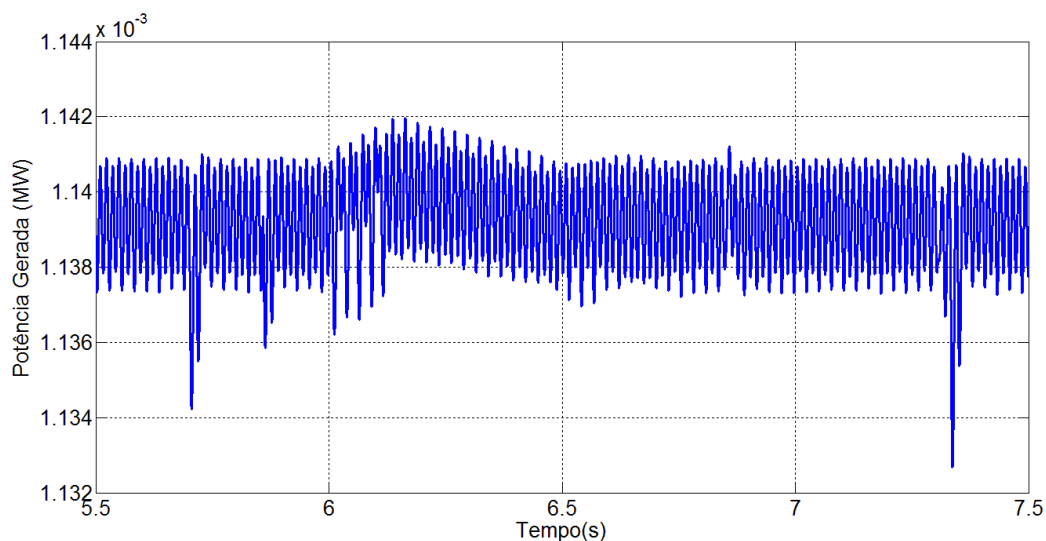


Figura 6. 56 – Comportamento da potência ativa gerada pelo arranjo fotovoltaico durante o curto-circuito trifásico na rede CA do inversor.

A Figura 6.27 e 6.28 mostra o comportamento do ciclo de trabalho do conversor CC-CC durante o curto-circuito. Nesse caso, o ciclo de trabalho também não apresenta variações significativas em torno do seu valor de regime permanente, apenas um pequeno pico no instante da falta.

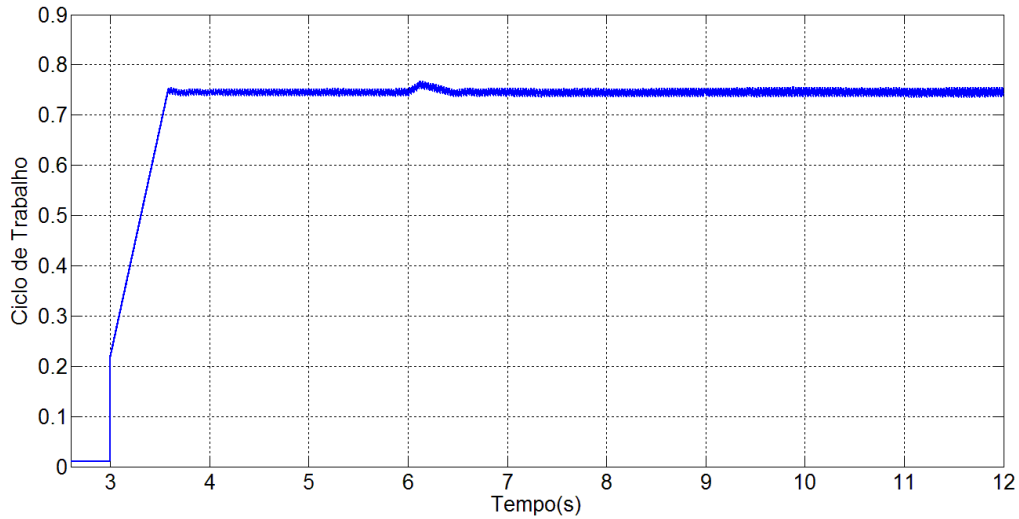


Figura 6. 27 – Comportamento do ciclo de trabalho do conversor CC-CC durante o curto-circuito trifásico.

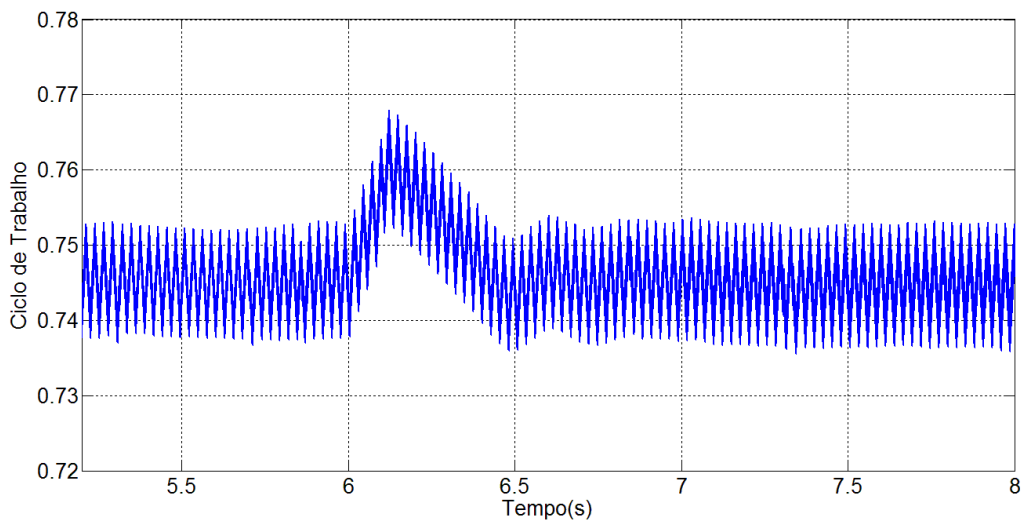


Figura 6. 28 – Detalhamento do do ciclo de trabalho do conversor CC-CC durante o curto-circuito trifásico.

A Figura 6.29 apresenta a corrente de falta, sendo esta a soma das contribuições do sistema de distribuição e do sistema fotovoltaico. Como pode ser visto, a corrente de falta só

aparece durante os 100ms de duração da mesma e logo após a extinção do curto retorna a zero.

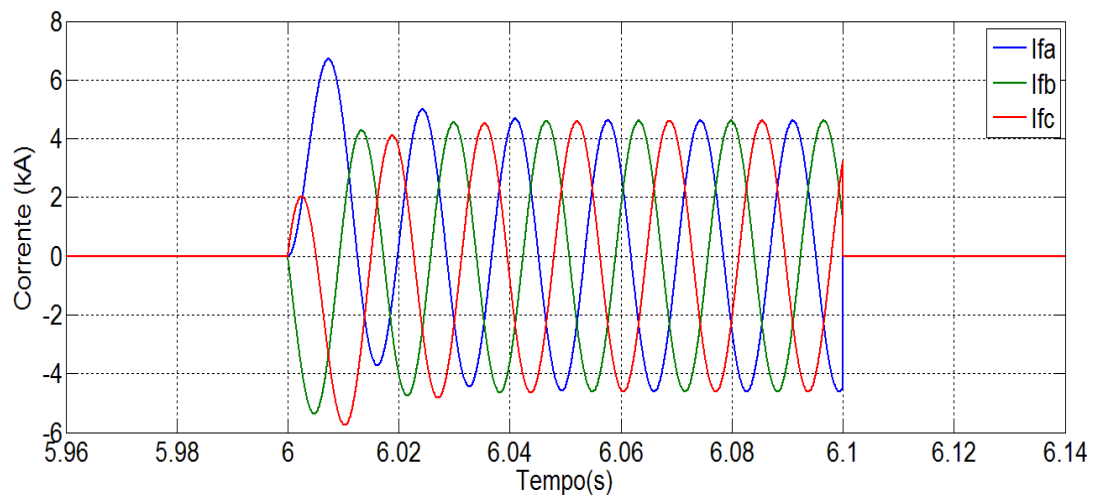


Figura 6. 29 – Comportamentos da corrente de falta.

6. Conclusão

Este trabalho de conclusão de curso desenvolveu um estudo sobre a conexão de um gerador fotovoltaico em uma rede de distribuição. Foram apresentados e projetados os componentes necessários para tal conexão e explicados os respectivos princípios de funcionamento. Como conclusão geral do estudo desenvolvido aqui, o gerador fotovoltaico e o seu sistema de conexão à rede de distribuição apresentaram um bom comportamento nas três condições operativas analisadas.

As simulações para a análise do sistema fotovoltaico foram desenvolvidas na ferramenta computacional PSCAD/EMTDC. Basicamente, este sistema é composto por uma fonte de corrente equivalente a conexão de 9 painéis fotovoltaicos Kyocera KC130TM, um conversor CC-CC do tipo Buck-Boost, um conversor CC-CA para inversão da tensão CC gerada pelos painéis e um modelo de rede CA equivalente a um sistema de distribuição de 220V.

Inicialmente o sistema foi exposto às condições ideais, considerando a radiação de 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C . A Tabela 6.2 mostra que a potência ativa que se espera obter do módulo fotovoltaico estudado nessas condições é de 1177W . Este valor é um pouco diferente daquele fornecido pelo fabricante do módulo fotovoltaico que é 1170W . Como é apresentado na Figura 6.5, a potência gerada pelo arranjo, nas simulações, foi de 1141W , o que corresponde a 97% do valor apresentado na Tabela 6.2 e aproximadamente 97,5% do valor fornecido pelo fabricante. Assim, através dessas análises, é possível concluir que a operação deste arranjo fotovoltaico é considerada adequada para as suas condições ideais e ficou dentro de uma margem de erro aceitável.

Na Seção 6.2 são feitas algumas análises que mostram o comportamento do módulo fotovoltaico e o seu sistema de conexão, considerando a aplicação de algumas alterações nas condições de radiação e temperatura. Quando o sistema foi submetido a uma radiação de 1300 W/m^2 , com temperatura de 30°C , a potência gerada pelos painéis atingiu rapidamente o novo ponto de operação, elevando-se para 1436W , como pode ser visto na Figura 6.11. Apesar do valor esperado para estas condições ser de 1490W , pode-se considerar que a resposta obtida foi bastante adequada, uma vez que o erro foi inferior a 4%. Houve, ainda, necessidade de diminuir a janela de tempo para cerca de 0.3s para que a dinâmica da potência gerada por esta alteração pudesse ser observada, o que indica a rapidez com que o sistema se

adaptou a tal mudança. Além disso, a Figura 6.15 e a Figura 6.16 mostram que não houve mudança significativa no ciclo de trabalho, mesmo nessa nova condição operativa, indicando a pouca variação da tensão de saída do arranjo.

Similarmente ao caso em que a radiação e a temperatura de exposição dos módulos foram elevadas, quando o sistema sofreu uma redução nos valores destas variáveis para 700 W/m^2 e 20°C a potência gerada pelo arranjo caiu para 815.9W . Nesse caso era esperado que o arranjo fornecesse 839.9W de acordo com a Tabela 6.2, ocasionando um erro inferior a 3%. O ciclo de trabalho não sofreu variações significativas nessa nova condição operativa, pela mesma razão do caso anterior.

A Seção 6.3 apresentou a análise do sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição trifásica, quando esta sofre um curto-circuito trifásico com duração de 100 ms. Mesmo nessa condição operativa, que é considerada bem drástica para o sistema, é possível observar que o sistema apresenta um comportamento dinâmico estável. A tensão na rede CA retornou ao seu valor nominal após 200ms do início do curto-circuito. Durante o período do curto-circuito trifásico, a tensão CC aumenta devido ao desequilíbrio de potência no elo CC, que será drenado pelo capacitor CC. Conforme pode ser visualizado na Figura 6.25, a potência ativa despachada pelo inversor é interrompida transitoriamente durante o curto-circuito. Após a eliminação do curto-circuito, a potência ativa despachada pelo inversor oscila durante alguns milissegundos e depois volta ao seu valor de regime permanente. Esse comportamento mostra que o sistema é estável. Além disso, a Figura 6.29 mostra que a corrente de falta dura apenas os 100ms correspondentes à duração desta.

Os resultados obtidos nas análises desenvolvidas neste trabalho podem ser considerados satisfatórios, uma vez que o sistema fotovoltaico apresentou comportamento estável em todas as condições operativas as quais foi submetido. O sistema desenvolvido foi capaz de atingir novos pontos de operação de máxima potência quando submetido a variações de temperatura e radiação, assim como a distúrbios trifásicos na rede de distribuição.

Baseando-se nas análises desenvolvidas neste trabalho é possível dizer que o arranjo fotovoltaico e o seu sistema de conexão fornecem uma base de estudo para uma futura aplicação prática desse tipo de equipamento numa rede de distribuição. Com o clamor da sociedade em geral pelo uso de fontes alternativas de energia nos sistemas de potência, os estudos desenvolvidos nesse trabalho se tornam valiosos para a sociedade técnica e acadêmica.

Bibliografia

- [1] Rashid Muhamamad H., "POWER ELECTRONICS: CIRCUITS, DEVICES AND APPLICATIONS", U.S.A Prentice Hall International Inc., 1988.
- [2] Coelho, Roberto Francisco, 2008. 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, 2010.
- [3] <http://www.electronica-pt.com/painel-solar-fotovoltaico/> acessado em 10/08/2015.
- [4] Mohan, Ned. "Power Electronics – A First Course", John Wiley & Sons, Inc. EUA, 2012.
- [5] Mendes Casaro, Marcio; Cruz Martins, Denizar, 2008. Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análise em Eletrônica de Potência via Simulação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [6] Rashid Muhamamad H., "POWER ELECTRONICS HANDBOOK", 2ª Edição, USA, Elsevier Inc., 2007.
- [7] <http://www.homepower.com/maximum-power-point-tracking-mppt> acessado em 10/08/2015.
- [8] M. A. Aredes, B. W. França, L. G. B. Rolim, M. Aredes. "P&O method controls applied to grid connected PV systems". Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão (LEMT), Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, ISIE 2015.
- [9] Maurício Aredes – Notas de Aula de Eletrônica de Potência 2, 2014 – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [10] Portugal, Paulo Max Maciel. "Transmissão em Corrente Contínua com Tecnologia Híbrida Multiterminal de Conversores Fonte de Tensão e Corrente". Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)/COPPE, 2015.
- [11] Kyocera Corporation, High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module, Model KC130TM datasheet.

Anexo 1

Código executado no PSCAD/EMTDC para representação do gerador fotovoltaico [5].

```
#include<math.h>

voidtest_csub__(double* IN1,double* IN2,double* IN3,double* OUT)
{
doubleIpa=0.0, Vpa=0.0, Psun=0.0, Ta=0.0, Rs=0.005, Rp=7., Ms=9.0, Mp=1.0,
Ns=36.0, Voc=0.0, Isc=8.02, a=3.18e-3, n=1.2, k=1.38e-23, q=1.6e-19,
EG=1.1, Tr=0.0, Vt=0.0, V=0.0, Iph=0.0, Irr=0.0, Ir=0.0, I=0.0, j=0.0;
Vpa = *IN3;
Psun = *IN1;
Voc=21.6/Ns;
Ta = *IN2;
Tr = 273.0+25.0;
Ta = 273.0+Ta;
Vt = n*k*Ta/q;
V = Vpa/Ns/Ms;
Iph = (Isc+a*(Ta-Tr))*Psun/1000.0;
Irr = (Isc-Voc/Rp)/(exp(q*Voc/n/k/Tr)-1.0);
Ir = Irr*pow((Ta/Tr),3.0)*exp(q*EG/n/k*(1.0/Tr-1.0/Ta));
for (j=1;j<6;j++)
I = I-(Iph-I-Ir*(exp((V+I*Rs)/Vt)-1.0)-(V+I*Rs)/Rp)/(-1.0-
Ir*exp((V+I*Rs)/Vt)*Rs/Vt-Rs/Rp);
if (I<0) I=0;
Ipa = I*Mp;
*OUT=Ipa;
}
```

Anexo 2

Código executado no MATLAB para obtenção das curvas PV do gerador fotovoltaico [5].

```
% VARIÁVEIS DE ENTRADA
Psun = 1000;
T = 25;
Vpa = 0:0.01:40;

% AJUSTE DA CARACTERÍSTICA I-V
Rs = 0.005;
Rp = 7;
Ms = 1;
Mp = 9;

% DADOS DE CATÁLOGO
Ns = 36;
Voc = 21.6/Ns;
Isc = 8.21;
a = 3.18e-3;

% CONSTANTES
n = 1.2;
k = 1.38e-23;
q = 1.60e-19;
EG = 1.1;
Tr = 273 + 25;

% CÁLCULOS
T = 273 + T;
Vt = n*k*T/q;
V = Vpa/Ns/Ms;
Iph = (Isc+a*(T-Tr))*Psun/1000;
Irr = (Isc-Voc/Rp) / (exp(q*Voc/n/k/Tr)-1);
Ir = Irr*(T/Tr)^3*exp(q*EG/n/k*(1/Tr-1/T));
I = zeros(size(V));
for j=1:5;
    I = I - (Iph-I-Ir.*(exp((V+I.*Rs)./Vt)-1) - (V+I.*Rs)./Rp) ./ (-1-
    Ir.*exp((V+I.*Rs)./Vt).*Rs./Vt-Rs./Rp);
end
for j=1:length(I);
    if I(j)<0
        I(j)=0;
    end
end
Ipa = I*Mp;
for j=1:length(I);
    Ppa(j)=Vpa(j)*Ipa(j);
end

% GERAÇÃO DE CURVA P-V
figure(1);
plot(Vpa,Ppa);
grid on;
hold on;
```