



MODELAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA INVERSOR TRIFÁSICO PARA INJEÇÃO DE ENERGIA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS DO TIPO FV

MARIO SCHUROFF RODRIGUES

Novembro de 2015

MODELAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA INVERSOR TRIFÁSICO PARA INJEÇÃO DE ENERGIA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS DO TIPO FV

MARIO SCHUROFF RODRIGUES



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2015

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Mario Schuroff Rodrigues, Nº 1141051, 1141051@isep.ipp.pt

Orientação científica: Moacyr Aureliano Gomes de Brito, mbrito@utfpr.edu.br

Teresa Alexandra Nogueira, tan@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2015

Dedico este trabalho aos meus pais e a minha familia.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para concluir este trabalho.

Agradeço aos meus pais, Evilazio e Marit por me proporcionarem a oportunidade de chegar onde eu cheguei e ser apto a escrever esta dissertação, pois sem eles não haveria este momento.

Agradeço muito a todos os professores que já tive ao longo da minha jornada acadêmica, tanto no Brasil como em Portugal por fazerem de mim o que sou hoje. Não posso deixar de citar a professora Teresa Nogueira que me auxiliou muito aqui em Portugal, e principalmente ao Professor Dr. Moacyr Brito que foi fundamental para mim e para a realização deste trabalho.

Ainda aqui quero agradecer a todos meus amigos e familiares que estiveram comigo, ajudando ou apoiando de alguma forma para que a conclusão desta fase da minha graduação chegasse.

Resumo

Este trabalho baseia-se na necessidade de aumentar as fontes renováveis de energia, reduzindo assim a dependência de fontes não renováveis, principalmente as poluentes como as provenientes de combustíveis fósseis. A fonte de energia renovável explorada neste trabalho é a advinda de energia solar, com a utilização de painéis solares e métodos de extração para converter esta energia em energia elétrica e assim poder utilizar esta energia de forma eficiente.

A energia produzida por painéis fotovoltaicos se apresenta em forma de corrente contínua, tendo assim a necessidade do uso de conversores CC-CA, ou ditos inversores de tensão, para utilização da mesma, já que a maioria dos equipamentos que utilizam energia elétrica são construídos em forma de serem abastecidos com energia elétrica em corrente alternada. Como este trabalho foca na injeção da energia produzida pelos painéis FV na rede de distribuição de baixa tensão, faz-se necessário o uso de um PLL para garantir que o sistema inversor esteja em sincronismo com a rede de distribuição e possa garantir a entrega de energia ativa. Por fim, mas não menos importante, é utilizado neste projeto técnicas de MPPT para garantir um maior aproveitamento da energia proveniente dos painéis FV, ajudando assim a melhorar a eficácia deste tipo de energia, sendo mais fiável e viável.

Palavras-Chave

Conversão fotovoltaica. Inversores integrados. MPPT.

Abstract

This work is based on the need of increase the renewable energy sources, decreasing in this way the dependence of non-renewable energy sources, mostly the pollutants like the coming from fossil fuels. The renewable energy source explored on this work is from solar energy, counting with the use of solar panels and extraction methods to convert this energy in electrical energy, and this way can use this energy in a simple form.

he produced energy by photovoltaic panels is in continuous current form, having the need of the use of DC-AC conversers, or also known as voltage inverters, to the use of this energy, because most of the electrical equipments are built to operate in alternate current. As this work is focused on the injection of the produced energy by the PV panels on the distribution grid, is needed a PLL to make sure that the injected power on the grid and the grid are in the same phase, making sure the delivery of active energy. Finally and yet importantly, it is used on this project the MPPT tecnichals to ensure the best utilization of the energy coming from the PV panels, helping that way to improve the effectiveness of this kind of energy, making it to be more reliable and viable.

Keywords

Photovoltaic converters, integrated inverters, MPPT.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ACRÓNIMOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJECTIVOS.....	2
1.3.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	3
2. EQUIPAMENTOS E TECNOLOGIAS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	5
2.1.CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	5
2.2.INFLUENCIAS DE CARGAS E GERADORES NA REDE ELÉTRICA DE ENERGIA.....	7
2.3.ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	11
2.4.INVERSOR DE TENSÃO.....	13
2.5.PHASE-LOCKED LOOP.....	19
3. ALGORITMOS MPPT E MODELAGEM MATEMÁTICA.....	21
3.1.ALGORITMOS DE MPPT.....	21
3.2.MODELAGEM MATEMÁTICA.....	28
4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS.....	49
4.1.ESTUDO DE CASO.....	49
4.2.RESULTADOS.....	53
4.3.ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	62
5. CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	67

Índice de Figuras

Figura 1 - Consumo elétrico em Portugal [4].	7
Figura 2 - Classificação dos vários fenómenos que influenciam a QEE [5]	9
Figura 3 - Característica de saída dos conversores para operação em conexão com à rede [1].	15
Figura 4 - Circuito Inversor de tensão trifásico	15
Figura 5 - Onda de referência, portadora e sinal PWM e dois níveis [19].	16
Figura 6 - Formas de onda da tensão de fase e de linha em inversor trifásico. Indicam-se ainda os respectivos sinais PWM filtrados [19]	17
Figura 7 - Modulação por largura de pulso de sinal trifásico.	18
Figura 8 - Diagrama básico do PLL [25] [26].	20
Figura 9 - Evoluções da potência em um painel FV [33]	23
Figura 10 - Fluxograma do método P&O [35]	24
Figura 11 - Pontos de divergência do método P&O devido às alterações climáticas [36]25	
Figura 12 - Fluxograma método da Condutância Incremental [39]	26
Figura 13 - Método da tensão constante [33]	27
Figura 14 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica [43].	29
Figura 15 - Modelo do arranjo fotovoltaico implementado em Simulink.	33
Figura 16 - Característica I-V do arranjo fotovoltaico.	34
Figura 17 - Característica P-V do arranjo fotovoltaico	34

Figura 18 - Modelo implementado em MatLab/Simulink®, para simulação do algoritmo P&O	35
Figura 19 - Modelo implementado em MatLab/Simulink®, para simulação do algoritmo da Tensão Constante.	36
Figura 20 - Circuito de Potência do Inversor Trifásico	37
Figura 21 - Circuito de potência da fase A do Inversor.	40
Figura 22 - Circuito de controle responsável pelo sincronismo do Inversor via PLL	42
Figura 23 - Diagramas de bode do sistema não compensado.	43
Figura 24 - Diagramas de bode do sistema compensado	43
Figura 25 - Circuito de realimentação contendo os controladores PIs	44
Figura 26 - Circuito de controlo responsável pela PWM do sinal de referência.	45
Figura 27 - Inversor Trifasico Alimentado pelo Painel FV	50
Figura 28 - MPPT P&O acima e CV abaixo.	51
Figura 29 - Bloco PLL no circuito de controlo do inversor.	51
Figura 30 - Circuito comparador e razões cíclicas.	52
Figura 31 - Comparador das razões cíclicas com a portados a fim de gerar o PWM.	53
Figura 32 - Tensão da rede e Corrente injetada, considerando uma fase.	54
Figura 33 - Potência fornecida pelo painel FV	54
Figura 34- Potencia injetada na rede	55
Figura 35 - Potencia injetada na rede com foco na linha de regime permanente	55
Figura 36 - Tensão do arranjo FV	56
Figura 37 - Tensão do arranjo FV e da tensão de referência do método MPPT	57

Figura 38 - Corrente do arranjo FV	57
Figura 39 - Potencia fornecida pelo arranjo FV	58
Figura 40 - Potencia fornecida pelo arranjo FV com ênfase antes do aumento de radiação	59
Figura 41 - Potencia fornecida pelo arranjo FV com ênfase depois do aumento de radiação	59
Figura 42 - Corrente trifásica injetada na rede antes e depois do degrau.	60
Figura 43 - Tensão da rede e Corrente injetada em uma fase antes e depois do degrau	60
Figura 44 - Gráfico fator de rastreamento.	61
Figura 45 - Rendimento do circuito.	62

Acrónimos

CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Continua
CC-CA	–	Corrente Continua – Corrente Alternada
CC-CC	–	Corrente Continua – Corrente Continua.
CO ₂	–	Dióxido de Carbono.
MPPT	–	Maximum Power Point Tracking
SEE	–	Sistema Elétricos de Energia.
QEE	–	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	–	Root Mean Square
MPOP	–	Ponto de Operação de Máxima Potencia
CV	–	Constante Voltage
FV	–	Fotovoltaico
IC	–	Incremental Conductance
P&O	–	Perturb and Observe
PI	–	Proporcional Integrador
PLL	–	Phase-Locked Loop
PWM	–	Pulse Width Modulation
STC	–	Standard Test Conditions

TF – Tracking Factor

VSI – Voltage Source Inverter

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo é dedicado para fazer uma introdução geral do que será visto ao longo do trabalho, tanto em parte teórica como em parte prática (modelação e simulação) e está dividido em três partes: A Contextualização, Objetivos do Trabalho e a Organização do Relatório.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A oferta de energia, bem como de seu aproveitamento, se encontra no pilar da sociedade moderna. A disponibilidade de um abastecimento energético confiável proporcionou às nações ocidentais o nível de industrialização e padrão de vida elevados. Atualmente é impossível retroceder a esta qualidade de vida obtida pela industrialização mundial. No entanto, a crescente demanda energética aliada à possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais, junto com a crescente preocupação com a preservação ambiental, tem impulsionado pesquisas e desenvolvimento de fontes de energia alternativas menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental. Dentre as fontes alternativas, a energia elétrica proveniente dos painéis solares fotovoltaicos (FVs) tem tido um grande destaque à nível mundial, tanto nas pesquisas como em incentivos governamentais. Além é claro da grande quantidade de empresas interessadas no desenvolvimento de soluções cada vez mais competitivas na área de inversores solares. Isso decorre do potencial que a energia solar proporciona, já que se apresenta como a fonte de energia natural mais útil, uma vez que é livre, abundante, não poluente, distribuída ao longo

da Terra e participa como fator primário de todos os outros processos de obtenção de energia na terra [1].

Outros pontos favoráveis que interessam muitos aos países são a vida útil média e a confiabilidade [1]. Em contrapartida a isso, alguns fatores com relação ao comportamento das células fotovoltaicas devem ser considerados. Segundo [2], as condições climáticas e de instalação de painéis influenciam diretamente na potência energética gerada; além destes, a eficiência de uma célula comercializável padrão atinge um máximo de 18%. Se avaliada a hipótese de um investimento em que reaver o capital inserido em sistemas de geração fotovoltaica é o objetivo e, considerando que a durabilidade média de um sistema como esse é de 25 anos, maximizar a eficiência para um retorno financeiro acelerado é algo desejado e perfeitamente possível com a utilização de técnicas de rastreamento do máximo ponto potência.

Como em sistemas conectados à rede quanto nos independentes a utilização de um método de MPPT é mandatório, deve-se considerar o fato de que para sua implementação é requerido um conversor eletrônico de potência.

1.2. OBJECTIVOS

No desenvolvimento deste trabalho será estudado um conversor CC-CA trifásico para a injeção de energia elétrica na rede de distribuição, em 127 V e 60 Hz, a partir de fontes renováveis fotovoltaicas.

Para o estudo deste determinado conversor foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- I. Desenvolver um modelo para simulação de painéis FV, considerando condições nominais padrão.
- II. Desenvolver algum algoritmo de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) que rastreie o ponto de máxima potência do sistema FV.
- III. Desenvolver um inversor trifásico para injeção de potência ativa na rede trifásica de baixa tensão (127V - 60 Hz).
- IV. Modelagem matemática dos sistemas e desenvolvimento dos mesmos no ambiente Matlab/Simulink®.
- V. Testes finais e conclusões.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Os diferentes passos efetuados para o desenvolvimento do modelo do inversor trifásico para injeção de potência na rede de distribuição a partir de fontes fotovoltaicas foram divididos em quatro capítulos.

O capítulo 1 faz uma breve introdução às fontes renováveis de energia fotovoltaicas bem como ao que será visto no decorrer do trabalho.

No capítulo 2 é tratado os fundamentos teóricos para melhor entendimento do que se dá na parte prática. Sendo apresentadas de forma sucinta os métodos de conversão de energia fotovoltaica, os inversores de potência e os principais componentes que permitem a interconexão dos conversores CC-CA com a rede de distribuição.

No capítulo 3 são estudados os principais algoritmos de MPPT para aplicação no trabalho em questão. Ainda neste capítulo é feita a modelagem matemática do projeto, passando pelos painéis FV, métodos de MPPT, inversor de tensão e interconexão com a rede de distribuição.

O estudo de caso, bem como seus resultados são trazidos no capítulo 4 que conta com a explicação do estudo de caso e resultados simulados do mesmo.

No capítulo 5 tem-se o término do trabalho, com as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento, bem como propostas de sugestões para trabalhos futuros com o intuito de aperfeiçoar o projeto desenvolvido.

2. EQUIPAMENTOS E TECNOLOGIAS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Neste capítulo tratar-se-á todas as componentes teóricas do trabalho com o intuito de demonstrar a base do projeto em si.

2.1. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

No que se diz respeito ao consumo, umas das preocupações que tem crescido ao longo dos anos é a redução do mesmo, sendo fundamental mostrar aos consumidores pensamentos e comportamentos que permitam atingir objetivos importantes no que se trata de sustentabilidade ambiental [3].

Ao longo dos anos é notado um aumento progressivo no consumo por residências, de modo que para poder atingir as metas estabelecidas de redução de emissões de CO₂ para a atmosfera, há uma necessidade de estabilizar este crescimento notado.

A eletricidade gasta em um domicílio está, na maior parte das vezes, ligada a hábitos e rotinas de cada consumidor, sem qualquer preocupação na mudança de hábitos de consumo. A mudança de comportamento dos consumidores é uma meta difícil a ser atingida, devido a fatores de infraestrutura, fatores culturais e influências externas [3].

Em Portugal o consumo de eletricidade das indústrias é inferior ao consumo de outras atividades, no ano de 2013 a indústria foi responsável por um consumo de 16.47 TWh enquanto residências e escritórios tiveram no mesmo período um consumo de 24.59 TWh, vide Figura 1.

Portanto a geração de energia elétrica através da energia solar em residências, mesmo que pequena caso a caso, poderia fazer grande diferença no que se diz respeito a necessidade de energia elétrica global. Ademais, é imprescindível que o consumidor faça o esforço da redução do consumo, mas mesmo assim, a necessidade de aumento da oferta de energia via fontes alternativas e renováveis é extremamente importante.

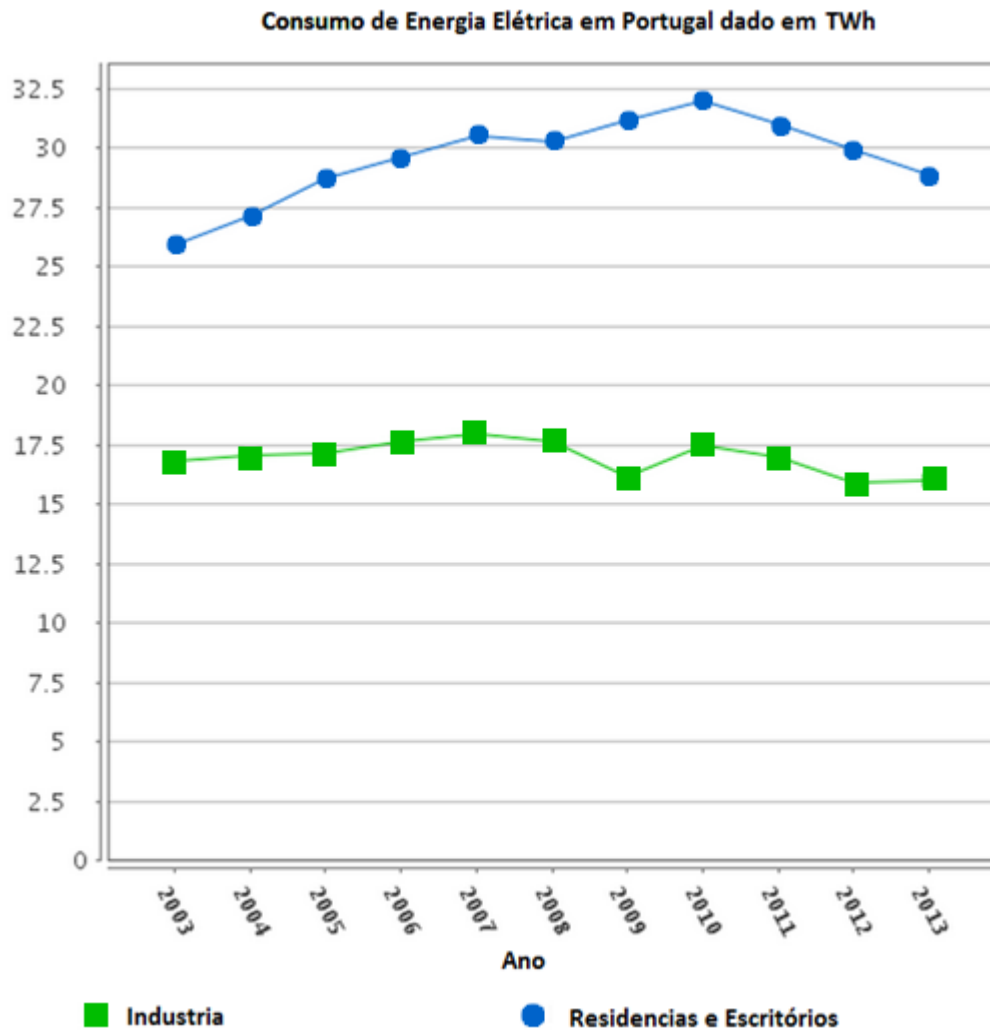


Figura 1 - Consumo elétrico em Portugal [4].

2.2. INFLUENCIAS DE CARGAS E GERADORES NA REDE ELÉTRICA DE ENERGIA

A rede, também conhecida como Sistema Elétrico de Energia (SEE) tem como função adaptar a energia produzida em determinado ponto e entrega-la aos pontos de consumo. Esta forma possui a vantagem de fazer a energia ser transportada e controlada com uma certa facilidade e elevado grau de eficiência, como reduzidas perdas por condução [5].

As influências na rede vêm de cargas e geradores, no que se diz respeito a geradores essa influência pode ser dividida em pelo menos dois grandes grupos, nomeadamente são eles as influências da central de produção e as influências da produção distribuída ao longo da rede.

Voltando à influência dos consumidores, essa por sua vez pode ser separada na influência de grandes consumidores, na maioria das vezes indústrias, e na influência de pequenos consumidores que engloba em geral residências e pequenos escritórios.

2.2.1. INFLUÊNCIA DA PRODUÇÃO DISTRIBUÍDA NA REDE

O principal objetivo de um SEE, do ponto de vista técnico, é sempre atender a demanda. Deste modo, com inclusão da geração distribuída, a demanda ainda precisa ser cumprida, isto traz enormes desafios pois com a inclusão da produção distribuída na rede podem ocorrer variações na tensão e na qualidade da energia dependendo de fatores como tipo, porte e localização do gerador, capacidade do gerador em relação ao sistema, o tamanho das cargas próximas a esses geradores e também a estratégia de regulação de tensão do alimentador de distribuição [6].

A qualidade de energia elétrica (QEE) perfeita significa que a forma de onda da tensão deve ser sempre senoidal, com amplitude e frequência constante [7] [8] [9].

A QEE pode ser expressa na forma de características físicas e propriedades da eletricidade. Usualmente é descrita na forma de tensão, frequência e interrupções. Pode se observar alguns dos fenômenos que influencia a QEE na Figura 2. A QEE deve respeitar padrões estipulados em normas nacionais e internacionais [5].

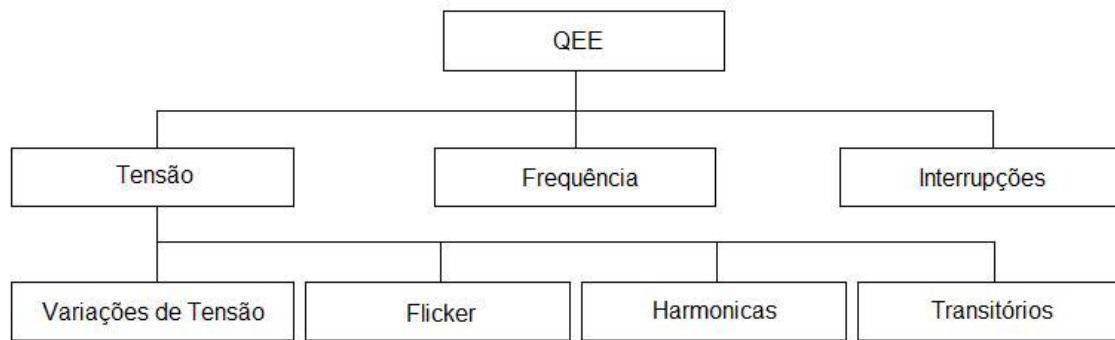


Figura 2 - Classificação dos vários fenómenos que influenciam a QEE [5]

A ligação de parques eólicos ou grandes geradores FV na rede, bem como a ligação de produção distribuída em geral afeta a QEE que depende da interação entre a produção distribuída e a rede. Entre os aspectos que podem influenciar a QEE estão variações de tensão, efeito *flicker* (tremulação), distorções harmônicas e transitórios.

Variações de tensão são definidas como alterações no valor RMS (*Root Mean Square* - raiz quadrada média) da tensão que ocorre em um determinado período de tempo. Segundo a norma NO EM 50 160, 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos para cada período de uma semana, no ponto de entrega ao consumidor devem situar-se dentro de uma variação de 10% do valor perfeito, isto sem considerar as interrupções [10].

Os principais causadores destas variações de tensão são as variações na produção ou nas cargas. As variações na produção de energia são, geralmente, dadas por fatores referentes aos recursos utilizados, como por exemplo em parques eólicos a variação de produção é uma consequência da variação nas condições do vento. Podendo ainda haver variações de plena carga a vazio e vice-versa devido a desligamentos de emergência ou religamentos em condição ideal de vento respectivamente.

O efeito *flicker* é uma variação aleatória rápida da tensão alternada ocasionando flutuações no valor eficaz da tensão. Este efeito pode ser notado principalmente em lâmpadas incandescentes, em que se pode notar possíveis variações repentinas na sua luminosidade, trazendo em muitos casos desconforto aos usuários, além de fadiga física e psicológica [5] [11].

Os principais causadores desta tremulação são geralmente cargas muito pesadas ligadas repentinamente como fornos elétricos, máquinas de solda, britadeiras, betoneiras etc. [12].

Os transitórios são desvios significativos de tensão e/ou corrente na rede comparados aos valores nominais, porém são de curta duração, a nível de micro ou mili segundos [9]. Estes transitórios muitas vezes causam distúrbios a equipamentos sensíveis que estejam ligados na mesma parte da rede elétrica.

As Harmônicas são ondas senoidais de tensão ou corrente com frequência múltipla da frequência da rede [13]. Para casos como o do Brasil ou EUA, as harmônicas de tensão têm frequências na faixa de 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, e assim sucessivamente. Tipicamente a grande maioria das redes têm grandes influências de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas. Já para o caso de Portugal e da Europa as frequências das harmônicas se situam na faixa de 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, etc. As harmônicas trazem consigo perdas adicionais que são contadas em um parâmetro conhecido como potência deformante (ou de distorção). As harmônicas aumentam o valor eficaz das correntes circulantes provocando aumento de perdas por efeito joule e sobreaquecimentos, além de problemas até mais sérios, como ressonâncias, circulação de corrente de neutro, dentre outros. Desta forma, a potência aparente (S) passa a ser definida pelos termos da potência ativa (P), potência reativa (Q) e a potência deformante (D), influenciando deste modo o fator de potência, como mostram as equações (1) e (2) [5].

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1)$$

$$F_p = \frac{P}{S} \neq \cos \phi \quad (2)$$

Um dos principais problemas da produção distribuída em relação às harmônicas, está em seus conversores eletrônicos de potência, que por sua vez são grandes injetores de harmônicas na rede e são de fundamental importância na produção de energética eólica, fotovoltaica, micro turbinas, células de combustível etc. Os conversores eletrônicos de potência são fundamentais para a geração distribuída renovável visto que estas fontes

produzem energia em amplitude, frequência e valores muito diferentes dos necessários para as cargas e para a injeção na rede de distribuição. Diversas normas versam sobre a conexão de geradores distribuídos e da distorção permitida das correntes injetadas pelos inversores solares e ou eólicos [14]

2.3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Cada vez mais cresce a demanda por energia elétrica e em contrapartida cresce a necessidade de não depender de combustíveis fósseis, pelo fato dos mesmos serem altamente poluentes e também pelo fato de serem uma fonte limitada de energia. Neste contexto entram as fontes renováveis de energia e entre elas está a energia solar que pode ser convertida em energia elétrica através das células fotovoltaicas (FV). Estima-se que a energia solar que incide sobre a superfície da terra, apesar dos fenômenos de absorção e reflexão dos raios pela atmosfera, seja algo em torno de 10 mil vezes a demanda energética mundial [15]. Com isto, a ideia de produção distribuída de energia elétrica a partir da radiação solar tornou-se uma possibilidade técnica real e atual, trazendo estímulo para diversas pesquisas e normatizações pelo mundo [1].

As células fotovoltaicas são constituídas em sua maioria por silício, um material semicondutor, ao qual é submetido um processo de dopagem para estabelecer um meio adequado para o efeito fotovoltaico [16].

O silício é considerado um mau condutor elétrico, pois cada átomo de silício possui 4 elétrons livres na última camada de valência, e a fim de se manter estável o átomo de silício este é associado com quatro átomos vizinhos através de ligações covalentes, completando assim 8 elétrons na última camada de valência e formando assim uma rede cristalina estável [17].

Uma célula fotovoltaica não conseguiria produzir energia elétrica se fosse composta em sua totalidade por cristais de silício puro. Para que haja corrente elétrica, é necessário a presença de um campo elétrico, que nada mais é do que a diferença de potencial entre

duas zonas da célula. Através da introdução de elementos estranhos nos cristais de silício com o intuito de alterar suas propriedades elétricas, processo chamado de dopagem, é possível criar duas camadas distintas na célula, que comparadas ao silício puro, uma com excesso de cargas positivas, conhecida como camada tipo p , e a outra com excesso de cargas negativas, conhecida como camada tipo n [16].

Os dopantes mais utilizados são o fosforo e o boro. Quando dopa-se o silício com átomos de fosforo, é criado um semicondutor carregado negativamente, ou seja do tipo n , isto acontece pelo fato do fosforo contar com um elétron a mais na camada de valência em comparação ao silício. Porém, quando o processo de dopagem é dado através do átomo de boro, que é um elemento com um elétron a menos na última camada de valência em comparação ao silício, são originadas lacunas na rede cristalina, formando assim um semicondutor do tipo p . Ao juntar camadas de semicondutores do tipo p e n , será produzida uma região de transição pn [17].

Ao expor uma junção pn a radiação solar, os elétrons absorverão a energia dos fótons, quebrando as ligações entre si. Assim os elétrons livres serão direcionados para a camada n , por meio do campo elétrico e as lacunas farão o caminho contrário, sendo direcionadas para a camada p , dando-se origem a uma corrente elétrica. Caso o circuito da célula fotovoltaica esteja fechado, a eletricidade fluirá a fim de alimentar um receptor, caso esteja e circuito aberto, pode ser mensurada a tensão da célula [17].

A transformação direta de radiação solar em energia elétrica é conhecida como efeito fotovoltaico, que é possível utilizando as células fotovoltaicas. A radiação solar é uma corrente de fótons com diferentes comprimentos de onda. A incidência destes fótons nas células fotovoltaicas possui a capacidade de entregar sua energia a um elétron, que por sua vez a utiliza para atingir um estado energético mais elevado. Apenas uma pequena porcentagem destes fótons que atingem as células possuem energia suficiente para excitar os elétrons e conseqüentemente gerar corrente elétrica. Esta é uma das razões da conversão energética relativamente baixa, muitos fótons são desperdiçados por terem energia insuficiente. Por mais energia que contenha, por cada fóton absorvido, a célula fornece apenas energia a diferenças de potencial, entre seu eletrodos, menores do que $D/e = 1,1V$, (onde D é a diferença de energia entre a banda de valência e a de condução do material, e e é a carga elementar do elétron) [18].

As células fotovoltaicas são, em quase todos os casos, agrupadas em série a paralelo a fim de fazer um arranjo ou painel fotovoltaico (FV) para assim facilitar o aproveitamento deste tipo de energia. Os painéis FV possuem um ponto de operação de máxima potência (MPOP), não fixo, variando, principalmente, de acordo com as condições climáticas.

A utilização dos painéis FV em MPOP faz com que haja um maior rendimento de energia e então faz se necessário o uso de técnicas *de Maximum Power Point Tracking* (MPPT) que nada mais é do que o rastreamento do ponto de máxima potência durante a operação do sistema, que serão melhor explicadas no capítulo 3.

2.4. INVERSOR DE TENSÃO

A energia proveniente dos painéis fotovoltaicos, como dito previamente, é em forma de corrente contínua, que varia de acordo com a irradiação solar e a temperatura da superfície de cada módulo. Para o melhor aproveitamento desta energia foi visto no tópico anterior a necessidade de se utilizar algum método de MPPT, porém para que esta energia possa ser direcionada à rede ou ao abastecimento convencional de residências, faz se necessário o uso de conversores eletrônicos de potência (os ditos inversores).

Um inversor tem a função de fornecer uma corrente ou tensão alternada, com algum sistema de controle definindo sua amplitude, forma e frequência. A saída do inversor, é suposta a ser independente de possíveis variações na entrada CC, na rede CA ou até mesmo na carga quando operando em situação de ilhamento. Os inversores são aplicados em interligação à rede de fornecimento, mas pelo fato da maioria das cargas serem alimentadas por tensão alternada, esses conversores podem ser utilizados em sistemas isolados também [19].

No caso de operação interligado a rede, a tensão é determinada pela rede, ficando a cargo do inversor fazer uma injeção ou absorção de corrente, e conseqüentemente, potência na rede. Para o caso de sistemas isolados, o inversor deve fornecer uma tensão de qualidade aceitável, o nível desta qualidade pode variar dependendo do tipo de carga em que o

conversor será ligado [19], mas normas versão que a distorção harmônica total de tensão não deve ultrapassar os 5%, isto para cargas em baixa tensão. Quando existe a absorção de corrente o inversor também consegue regular a tensão no ponto de acoplamento (CA) visto que consegue realizar a injeção também de reativo (indutivo ou capacitivo). No atual cenário, a premissa básica de um inversor fotovoltaico é injetar toda a energia proveniente dos painéis FV na rede na forma de energia ativa (corrente e tensão em fase). Num cenário não muito distante, este mesmo inversor operará como auxílio ao sistema, operando também na regulação de tensão (injeção de reativo) e até mesmo na supressão de harmônicos (filtro ativo).

Os inversores são em sua maioria compostos por transistores para fazer o chaveamento da corrente contínua, porem pode ser utilizado qualquer tipo de interruptor que seja controlado pra ligar e desligar e que apresente tempo de comutação necessários pra cada tipo de inversor. Atualmente, os IGBTs têm sido os interruptores preferíveis em aplicações fotovoltaicas, visto a uma gama de alternativas, que podem interromper facilmente tensões na casa de quilovolts e conduzir correntes de centenas de amperes, apresentando baixas perdas e frequências elevadas de comutação.

Os inversores podem ser do tipo fonte de tensão ou do tipo fonte de corrente. Isto depende basicamente do filtro de saída de cada topologia. A topologia mais usual é a do inversor fonte de tensão. No inversor fonte de tensão, a saída é um filtro LC para atender a cargas isoladas ou um único filtro L para a conexão com a rede. Já o uso de um filtro LCL permite a alimentação simultânea de cargas isoladas e também a injeção de energia na rede. No entanto, quando o propósito é apenas injetar energia na rede, o inversor VSI (*Voltage Source Inverter*) necessita apenas de um filtro indutivo L (destacado na Figura 3).

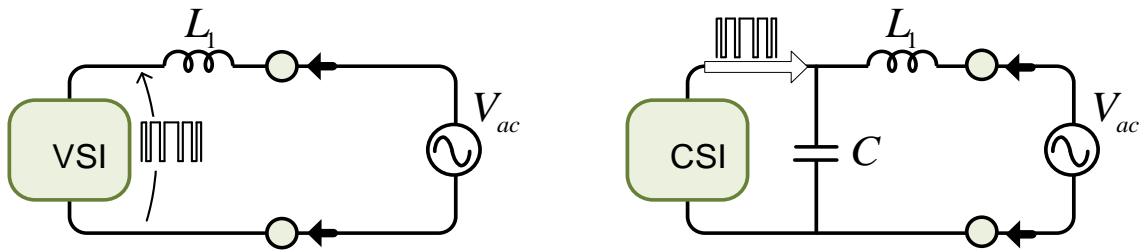


Figura 3 - Característica de saída dos conversores para operação em conexão com à rede [1].

O modelo básico de um inversor de tensão é dado na Figura 4 em forma trifásica. Para obter uma tensão monofásica, basta utilizar apenas dois ramos do mesmo. O chaveamento dos transistores é feito por sinais que vêm de um circuito de controle que faz com que o circuito alterne a tensão contínua de entrada para a saída.

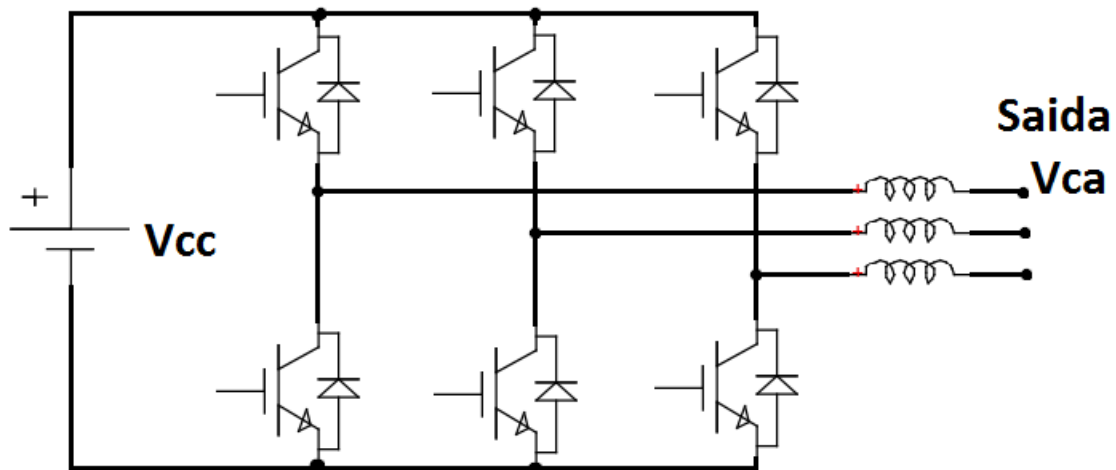


Figura 4 - Circuito Inversor de tensão trifásico

Os diodos presentes no circuito garantem a bidirecionalidade no sentido da corrente, o que é necessário para uma correta operação do conversor.

A maneira de se obter o sinal alternado de baixa frequência (inversão da tensão) é através da modulação das chaves do conversor em alta frequência. É possível obter este tipo de modulação ao comparar uma tensão de referência (que seja imagem da tensão de saída buscada), com um sinal triangular simétrico cuja frequência determine a frequência de

chaveamento. A frequência da onda triangular (chamada portadora) deve ser, no mínimo 20 vezes superior à máxima frequência da onda de referência, para que se obtenha uma reprodução aceitável da forma de onda sobre a carga, depois de efetuada a filtragem. Em sistemas práticos, esta frequência deve ser par para se evitar o aparecimento de harmônicas triplens (terceira e seus múltiplos) e também deve ser inteiro para evitar o aparecimento de subharmônicas. A largura do pulso de saída do modulador varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora (triangular). Tem-se, assim, uma Modulação por Largura de Pulso, e, para o caso dos inversores a modulação básica é a modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) senoidal. Onde cada fase é modulada defasada da outra em 120 graus elétricos.

Através da Figura 5 é possível notar a modulação de uma onda senoidal, que produz na saída uma tensão com dois níveis na mesma frequência da portadora.

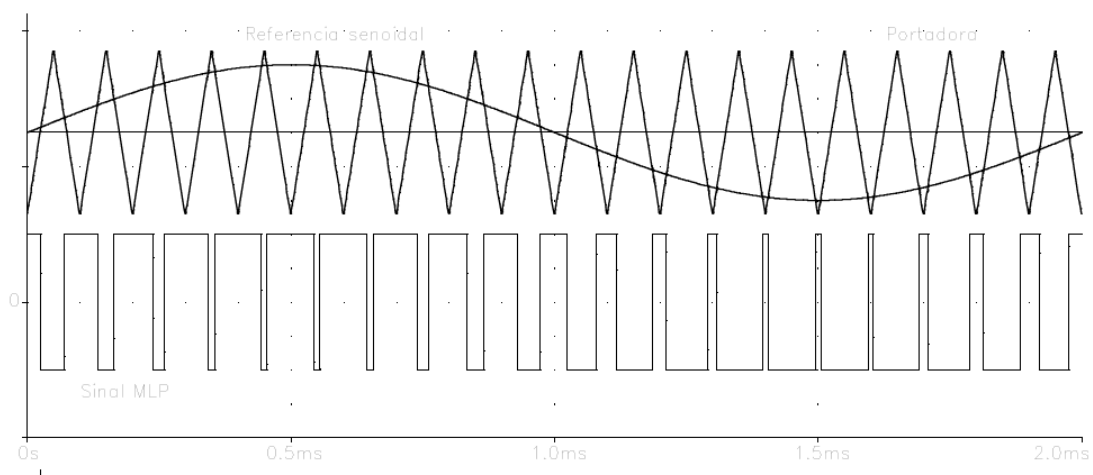


Figura 5 - Onda de referência, portadora e sinal PWM e dois níveis [19].

Ainda é possível obter uma modulação a três níveis (positivo, zero, negativo) através do comando adequado dos interruptores. Para o caso dos inversores trifásicos, mesmo que a tensão em um dos ramos seja de apenas dois níveis, a tensão entre as linhas será de três níveis, como pode se notar na Figura 6.

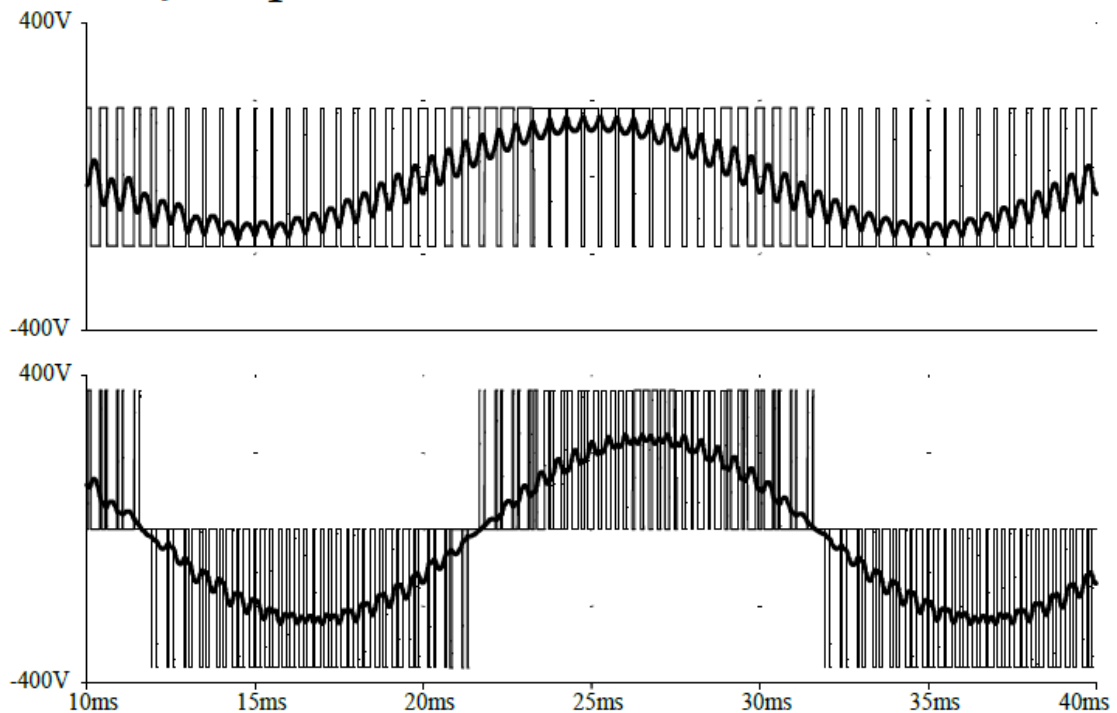


Figura 6 - Formas de onda da tensão de fase e de linha em inversor trifásico. Indicam-se ainda os respectivos sinais PWM filtrados [19]

Para obter uma onda senoidal que recupere a onda de referência a partir do sinal modulado utiliza-se um filtro passa baixo com frequência de corte acima de 50/60Hz, que é capaz de produzir uma atenuação efetiva em componentes na faixa de kHz.

Seguindo com detalhes da modulação PWM senoidal trifásica, é necessário defasar as ondas de referência (modulantes) em 120 graus elétricos. Para que cada modulante seja responsável por gerar a tensão de fase. A tensão de linha é obtida pela subtração das tensões de fase, conforme pode ser observado Figura 7.

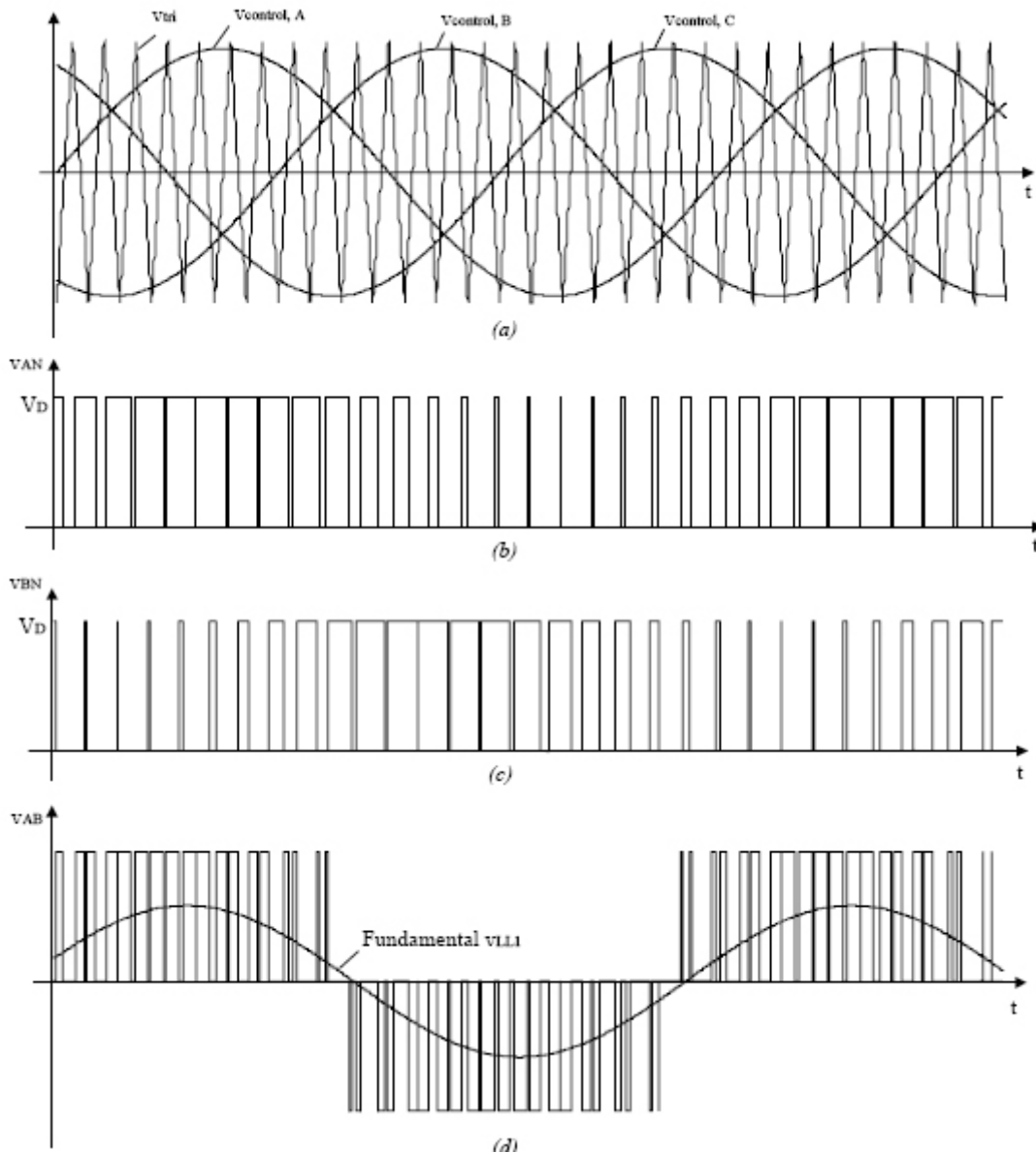


Figura 7 - Modulação por largura de pulso de sinal trifásico.

Conforme verificado pelas figuras, a tensão de saída, que é aplicada à carga, é formada por uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão de alimentação CC e duração variável. A obtenção de uma onda senoidal que recupere a onda de referência é facilitada pela espectro da onda resultante. Note-se que, após a componente espectral relativa à referência (50/60Hz), aparecem componentes nas vizinhanças da frequência de chaveamento e de seus múltiplos. Ou seja, um filtro passa baixas com frequência de corte acima de 50/60 Hz, normalmente sintonizada uma década abaixo da frequência de chaveamento, é perfeitamente capaz de produzir uma atenuação bastante efetiva em componentes na faixa de kHz. Quando o inversor fonte de tensão alimenta uma carga

local o filtro LC é sintonizado deste modo, no entanto, quando o este inversor é utilizado para injeção de energia na rede, o filtro L, é projetado para atenuar o *ripple* (ondulação) de corrente. Desta forma, alimenta-se as cargas com tensões adequadas e/ou se injeta energia na rede com correntes adequadas.

2.5. *PHASE-LOCKED LOOP*

Para que seja possível realizar o sincronismo da tensão oriunda do inversor de tensão com a rede de distribuição faz-se necessário o uso de técnicas baseadas em algoritmos de PLL (*Phase-Locked Loop*) [20] [21] [22] [23] [24].

Os algoritmos PLL, apesar de haverem diferenças, possuem uma estrutura padrão que pode ser dividida em três seções principais, são elas o detector de fase, o filtro passa baixa e o oscilador controlado em tensão, vide Figura 8, sendo este oscilador o responsável pelo sinal que será comparado com o sinal de entrada no detector de fase. Estes podem ser considerados como dispositivos que fazem com que um sinal acompanhe o outro. Através de um sinal de referência de entrada, o algoritmo faz com que o sinal de saída seja síncrono com a referência, tanto em frequência como em fase. Isto é feito de forma que o erro de fase entre o sinal de saída e a referência seja reduzido a um erro mínimo. As principais diferenças encontradas entre os algoritmos PLL estão focadas no detector de fase, que na maioria das vezes é não linear. Dependendo do sistema e do tipo de controle usados, faz-se necessário, na utilização do PLL, o uso de outro algoritmo para o cálculo da amplitude da componente fundamental, sendo este robusto o suficiente para lidar com tensões distorcidas. Os ganhos do controlador PI (Proporcional Integrador), ligado a estrutura do PLL, são diretamente relacionados à resposta dinâmica e eficácia do sistema, fazendo-se necessário uma certa precaução para se obter uma boa filtragem e resposta rápida [20] [21] [24].

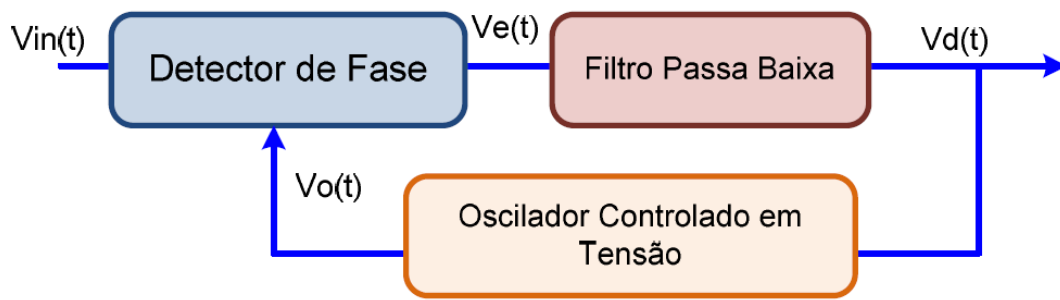


Figura 8 - Diagrama básico do PLL [25] [26].

3. ALGORITMOS MPPT E MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1. ALGORITMOS DE MPPT

Há vários métodos de MPPT conhecidos pela literatura específica da área. São apresentados um resumo e as principais características de vários métodos em [27]. A grande e principal importância destes algoritmos está na otimização da conversão da energia solar disponível em energia elétrica. O objetivo do algoritmo de MPPT é determinar o ponto de maior geração de energia elétrica na célula, módulo, painel ou arranjo fotovoltaico mesmo sob variações constantes de irradiação solar e temperatura [28]. Dentre os métodos existentes, há dois métodos usualmente mais utilizados, e são eles o método de perturbação e observação (P&O) [29] e o método da Condutância Incremental [30]. que em associação com outros algoritmos também pode elevar a eficiência do método.

3.1.1. MÉTODO DA PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O)

O método P&O (*Perturb and Observe*) identifica o ponto de operação do módulo comparando valores atuais e imediatamente anteriores de potência e tensão. A ideia básica do algoritmo é que se uma perturbação (variação na tensão ou qualquer outro parâmetro) alterar a potência para um valor maior, na próxima iteração, o ponto de operação é alterado nesta direção. Caso haja uma redução da potência o ponto de operação é alterado

na direção inversa. Em outras palavras, a perturbação introduzida na tensão do arranjo FV provocará alterações no valor de potência da saída do arranjo FV com o intuito de sempre aumentar a potência fornecida pelo modulo FV [31].

Este método utiliza de dois sensores, um sensor de corrente e outro de tensão, e como há o cômputo real da potência extraída, este algoritmo tem a grande vantagem de independer do tipo de painel utilizado.

Este método possui desvantagens quando submetido à rápidas mudanças de irradiação sobre o modulo fotovoltaico, podendo levar o ponto de operação a uma direção contrária ao de MPOP, fazendo assim o método demorar a convergir. Além disso, o ponto de operação deste MPPT permanece oscilando em torno do MPOP [27]. Desta forma, o arranjo FV não será capaz de alcançar o MPOP, pois a tensão está em constante perturbação. Assim, em regime permanente, ocorre o desperdício de uma pequena quantidade de energia devido a oscilação da potência em torno do MPOP. Entretanto, há uma maneira de melhorar este rendimento, trata-se da redução do tamanho da perturbação, esta por sua vez não deve ser muito pequena pois faz com que o método fique lento, demorando mais tempo para alcançar o MPOP. Na Figura 9 notam-se os quatro casos da evolução da potência no painel FV dependendo das condições climáticas [32].

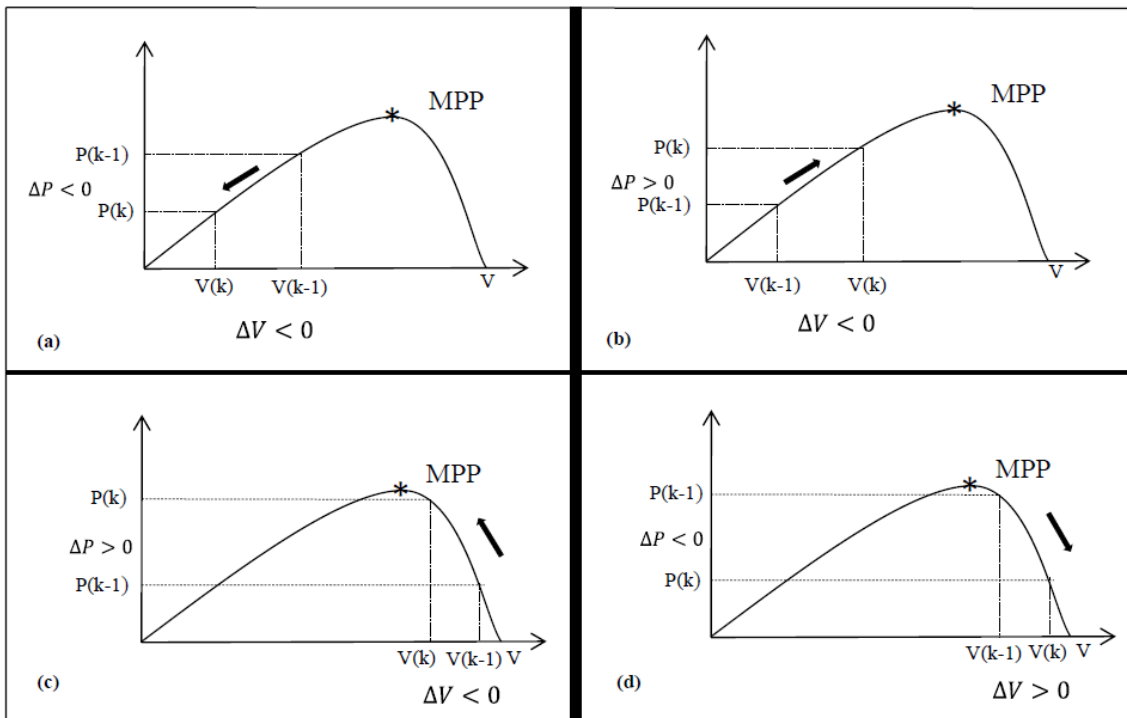


Figura 9 - Evoluções da potência em um painel FV [33]

Na Figura 9 tem-se quatro possíveis variações entre tensão e potencia. No item (a) observa-se que após uma perturbação negativa na tensão do painel FV, a potencia também sofre uma redução, portando na próxima iteração o algoritmo faz um perturbação no sentido oposto, portando aumentando o valor da tensão. No item (b) nota-se uma perturbação positiva na tensão e, conseqüentemente, positiva na potencia também, mantendo o sentido da perturbação na próxima iteração. No item (c) há uma perturbação negativa na tensão e como ocorre um aumento no valor de potencia, mantem-se o sentido da perturbação, diminuindo o valor da tensão. No quarto cenário, item (d) há uma perturbação positiva na tensão e como a potencia diminui, o algoritmo inverte o sentido da perturbação, fazendo com que a mesma diminua na próxima iteração.

Outra grande vantagem deste método é a simplicidade e a necessidade de baixo processamento, pelo fato de utilizar apenas instruções de comparação, soma e subtração como se pode notar no fluxograma da Figura 10 [34].

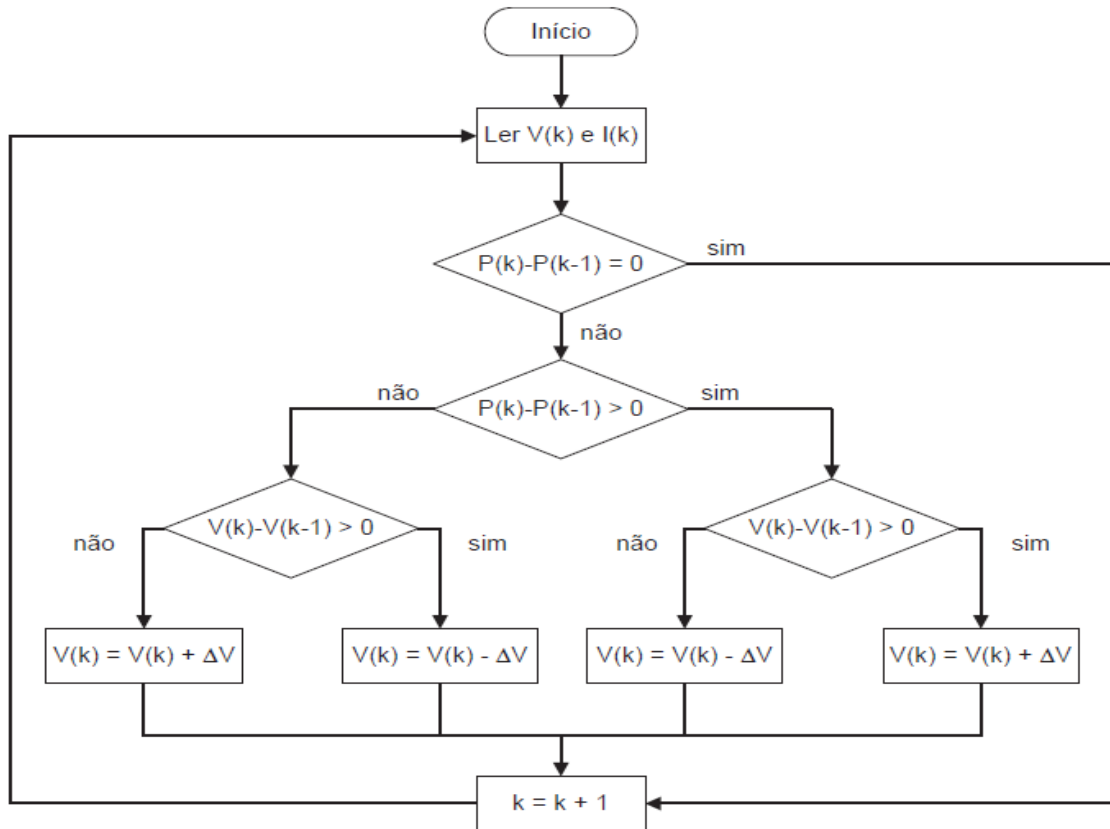


Figura 10 - Fluxograma do método P&O [35]

O método P&O é passível de falha quando ocorrem alterações bruscas nas condições de radiação solar e temperatura. Acompanhando na Figura 11, com as condições [34] atmosféricas constantes e o sistema operando no ponto A, é aplicada uma perturbação na tensão do painel, fazendo com que o ponto de operação se desloque para B. Desta forma, a potência diminuirá, causando uma inversão no sentido da perturbação. Porém, se ocorrer um aumento repentino, de radiação solar, a curva de potência irá se deslocar de P1 para P2, dentro do período de amostragem, e o ponto de operação que estava em A passara para o ponto C. Como está mudança de ponto representa um aumento na potência, a perturbação é mantida no mesmo sentido, fazendo assim o ponto de operação divergir do MPOP e assim se manterá até que a radiação solar diminua [36].

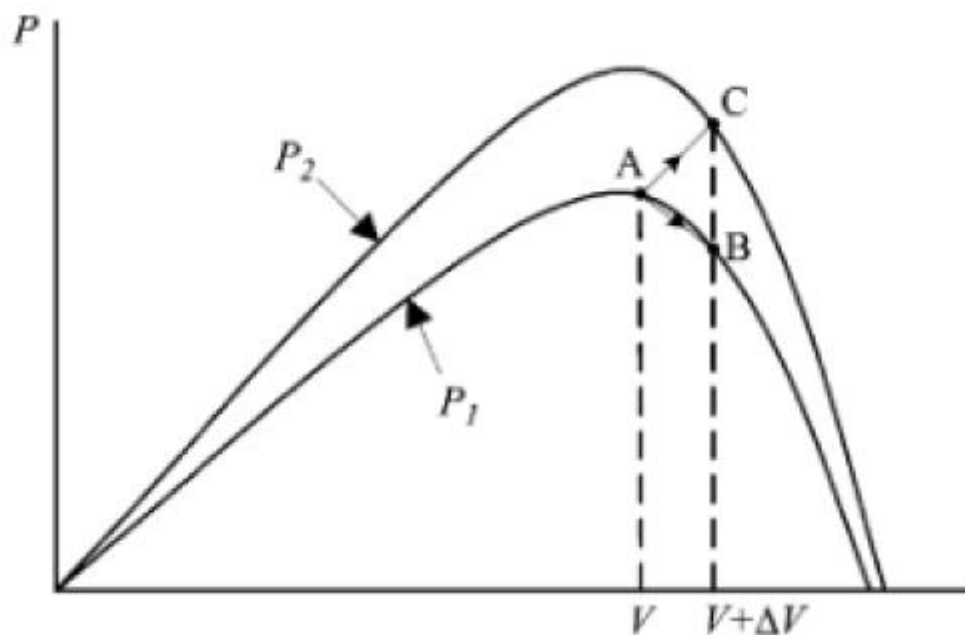


Figura 11 - Pontos de divergência do método P&O devido às alterações climáticas [36]

3.1.2. MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL (IC)

A Condutância Incremental, quando comparada ao método P&O, possui melhor precisão, pelo fato de ser um método mais complexo, porém isto o deixa lento [37]. Entretanto, estes dois métodos, P&O e Condutância Incremental, atuam com maior proximidade ao MPOP do que os outros métodos conhecidos, como por exemplo o método da tensão constante [38]. No que se trata sobre a eficiência dos métodos, a Condutância Incremental é a que tem maior aproveitamento, cerca de 98%, seguido do método P&O com 96.5%, lembrando que estes dois métodos são dependentes do intervalo de amostragem. Os métodos restantes possuem uma eficiência inferior a 95% [27]. No entanto, quando os métodos são combinados com a da tensão constante, seu desempenho fica muito superior.

A maior dificuldade deste método está em realizar as divisões requeridas pelo método como se pode observar na Figura 12 que mostra o fluxograma do método da condutância incremental.

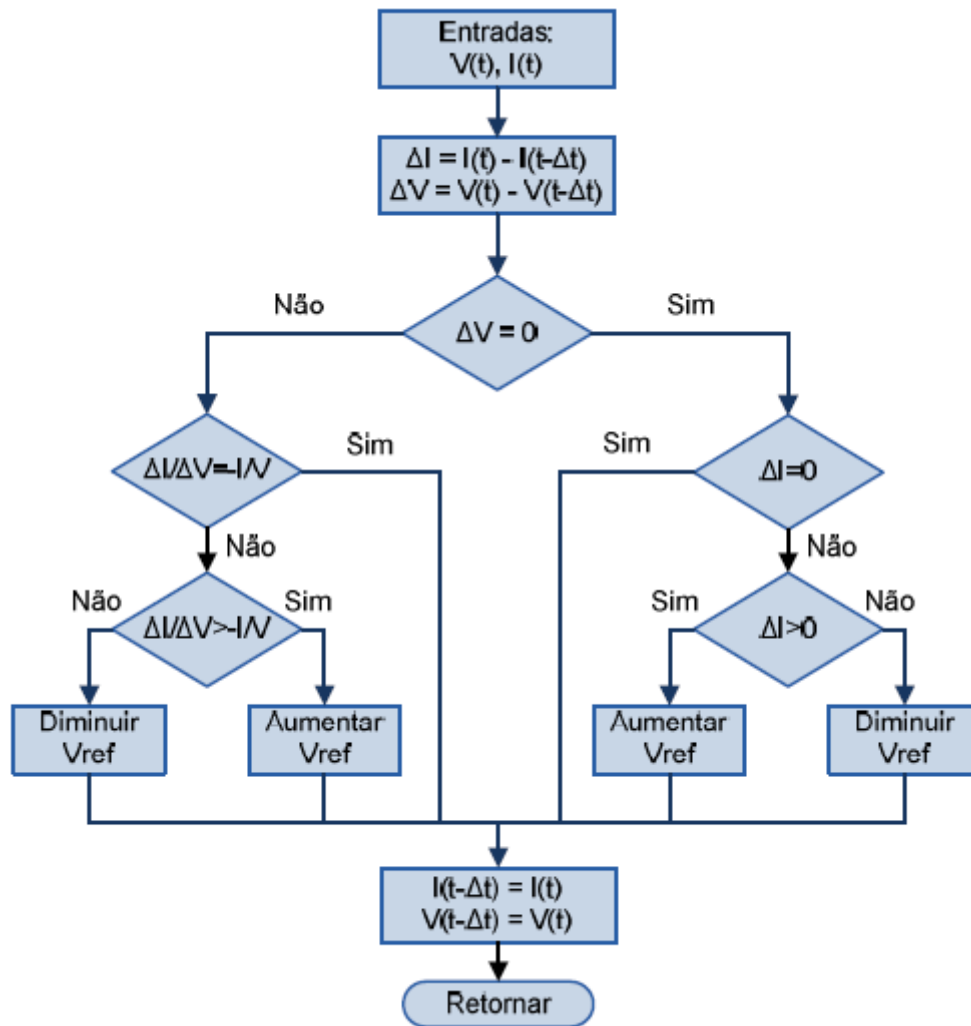


Figura 12 - Fluxograma método da Condutância Incremental [39]

3.1.3. MÉTODO DA TENSÃO CONSTANTE (CV)

O método da tensão constante é também citado na literatura com o nome de método da razão de tensão do circuito aberto [40]. Este método explora o fato da tensão de máxima potência (V_{mp}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}) possuírem uma relação, independentemente da radiação solar e da temperatura, aproximadamente linear, como é possível notar na Figura 13 [36] [41] [39].

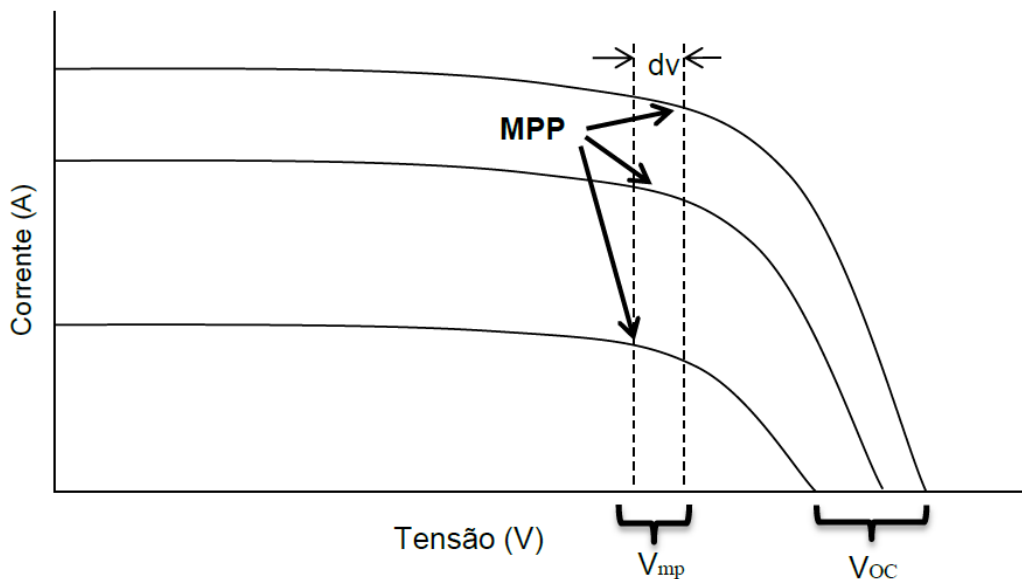


Figura 13 - Método da tensão constante [33]

Uma forma de descrever a relação entre a tensão de máxima potência e a tensão de circuito aberto é através da equação (3).

$$V_{mp} = k_1 \cdot V_{oc} \quad (3)$$

Onde k_1 é uma constante de proporcionalidade determinada pelo fator de tensão, e dependente das características da célula fotovoltaica usada. Este valor é calculado previamente de forma empírica utilizando-se de V_{mp} e de V_{oc} , do arranjo fotovoltaico específico. O seu valor é sempre inferior a 1 e na maioria dos casos varia entre 0,73 e 0,82. O Valor mais comumente utilizado é o 0.76, fazendo com que este algoritmo seja também conhecido como algoritmo dos 76% [33].

Através de uma interrupção na ligação entre o módulo fotovoltaico e o conversor de potência, é possível realizar medições a fim de determinar o valor da tensão de circuito aberto, que por sua vez com o valor do fator de tensão (k_1) conhecido, calcula-se o valor de V_{mp} através da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, conduzindo ao ponto de máxima potência do arranjo ou módulo fotovoltaico [36] [42]. No entanto, adicionar uma chave para desconectar o sistema fotovoltaico do conversor, para realizar a leitura da

tensão de circuito aberto, faz com que não haja produção de energia no instante da desconexão.

Uma desvantagem deste método é que os valores de circuito aberto do arranjo FV se alteram com a variação da temperatura, acarretando assim em uma baixa precisão no que compete a atingir o MPOP. Entretanto a principal desvantagem desta técnica esta no erro em regime permanente, provocado pela relação não constante entre V_{mp} e V_{oc} , fazendo com que o arranjo FV nunca opere em cima do MPOP, porem em torno dele [33].

Neste projeto utilizar-se-á o método da tensão constante para auxiliar o uso do método da perturbação e observação sem a necessidade de um conversor CC-CC e sim apenas a utilização de um inversor CC-CA. No Capítulo 4, este algoritmo será melhor detalhado.

3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste tópico serão demonstrados os modelos matemáticos pertinentes para a compreensão do modelo completo do sistema FV para a injeção de energia na rede, modelo este construído em MatLab/Simulink.

3.2.1. ARRANJO FOTOVOLTAICO

É comum a utilização de um circuito elétrico equivalente para entender o comportamento da célula fotovoltaica. O circuito com uma fonte de corrente em paralelo com um diodo é considerado o mais simples circuito equivalente. Para uma maior precisão da modelagem, as idealidades são consideradas, e representadas em forma de resistências paralela e serie, verificado através da Figura 14 [43].

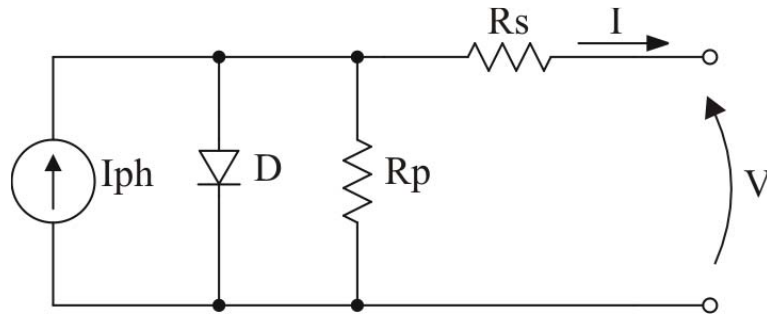


Figura 14 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica [43].

Baseando-se no trabalho apresentado em [44], realiza-se o equacionamento do circuito da Figura 14, obtendo-se a equação (4), que representa a corrente de saída da célula fotovoltaica [43]:

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[e^{q \frac{V + I \cdot R_s}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (4)$$

Onde:

V, I – Tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula solar.

I_{ph} – Fotocorrente.

I_r – Corrente de saturação reversa da célula.

R_s, R_p – Resistências série e paralela da célula.

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

η – Fator de qualidade da junção p-n.

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

T – Temperatura ambiente, K. Observando a equação (4), verifica-se a impossibilidade da corrente I ser obtida algebricamente, uma vez que esta incógnita não pode ser isolada.

Os outros parâmetros como a radiação e a temperatura são parâmetros de entrada do modelo matemático.

Para o cálculos dos valores de I_{ph} e I_r , foram utilizadas as equações (5) e (6) [45].

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{P_{sun}}{1000} \quad (5)$$

$$I_r = I_{rr} \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q \cdot E_G}{\eta \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (6)$$

Onde:

I_{sc} – Corrente de curto-circuito por célula.

α – Coeficiente de temperatura de I_{sc} .

T_r – Temperatura de referência, 298K.

P_{sun} – Intensidade de radiação solar, W/m^2 .

I_{rr} – Corrente de saturação reversa de referência.

E_G – Energia da banda proibida, 1,1eV.

I_{rr} é a única incógnita que ainda precisa ser calculada pelo fato de as demais serem estimadas ou obtidas diretamente de catalogo. Ao utilizar a tensão de circuito aberto $V = V_{oc}$ quando $I = 0$, da característica estática I-V e adotando $T = T_r$, obtém-se a equação (7) a partir da equação (4) [43].

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{\eta \cdot k \cdot T_r}} - 1} \quad (7)$$

A equação 4 pode ser modificada de forma a representar uma raiz nula quando a corrente se tornar a própria corrente da célula. Desta forma, I é determinado através do método de Newton (método numérico), empregado com sucesso para um modelo simplificado em [46]. Iniciada em valor 0, a variável I é utilizada em um processo iterativo que aproxima a equação (4) de sua raiz. A notação matemática do método numérico é demonstrada na equação (8).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (8)$$

Onde n é a n-ésima iteração do algoritmo e f'(x_n) a derivada de f(x_n).

Assim, nota-se que a equação (4) ao ser modificada fica representada pela equação (9).

$$f(I) = Iph - I - Ir \cdot \left[e^{q \frac{V+I \cdot Rs}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot Rs}{Rp} \quad (9)$$

Em seguida é apresentada a equação (10) que é a derivada da equação (9).

$$f'(I) = -1 - Ir \cdot e^{q \frac{V+I \cdot Rs}{\eta \cdot k \cdot T}} \cdot \frac{q \cdot Rs}{\eta \cdot k \cdot T} - \frac{Rs}{Rp} \quad (10)$$

De posse do modelamento matemático acima exposto, pode-se elaborar um modelo de simulação. Para realizar o levantamento das características de um modulo FV, é utilizado o *Standard Test Conditions* (STC), que é um teste sobre condições padronizadas. Este teste consiste em um conjunto de referências usadas em medições determinadas por P_{sun}, AM e T, que são respectivamente a densidade de potência padrão solar, dada por 1kW/m², referência de radiação de massa de ar, dada por 1,5 e a temperatura dos painéis dada por 25°C.

Escolheu-se para as simulações o módulo policristalino KC200GT da Kyocera com 54 células fotovoltaicas. Em STC, possui um ponto de operação de máxima potência (MPOP) que fornece 200 watts em seus terminais. Dos dados do catálogo, vale a pena destacar [43]:

$$\text{Tensão no MPOP (STC)} = 26,3 \text{ V.}$$

$$\text{Corrente no MPOP (STC)} = 7,91 \text{ A.}$$

$$\text{Tensão de circuito aberto (STC)} = 32,9 \text{ V.}$$

$$\text{Corrente de curto-circuito (STC)} = 8,21 \text{ A.}$$

$$\text{Coeficiente de temperatura de } I_{sc} = 3,18 \times 10^{-3} \text{ A}^\circ\text{C.}$$

Quanto aos parâmetros não definidos, foram fixados com a ajuda das recomendações de [47], e são os seguintes:

$$\eta = 1,2.$$

$$R_s < 10 \text{ m}\Omega.$$

$$R_p < 20 \Omega.$$

Um arranjo fotovoltaico é o agrupamento de módulos fotovoltaicos, tanto em série como em paralelo, a fim de suprir tensão e corrente necessária para as aplicações. As equações vistas anteriormente para a célula fotovoltaica podem ser utilizadas no arranjo considerando as múltiplas associações [44]. Utilizou-se de um arranjo fotovoltaico composto por 15 painéis em série (M_s) e 2 em paralelo (M_p). Este arranjo fotovoltaico possui uma potência de 6kW, com a corrente de curto circuito de 16,4A e com a tensão de circuito aberto de 493V. Na Figura 15 nota se o bloco programável, *PV_Array*, que através do programa implementado por [43] e analisado matematicamente neste capítulo, fornece a corrente do arranjo fotovoltaico. Esta corrente é utilizada como entrada para a

fonte de corrente em paralelo com o capacitor C. A fim de caracterizar o modelo proposto, foi conectado um capacitor de 100 μF em paralelo com a fonte de corrente.

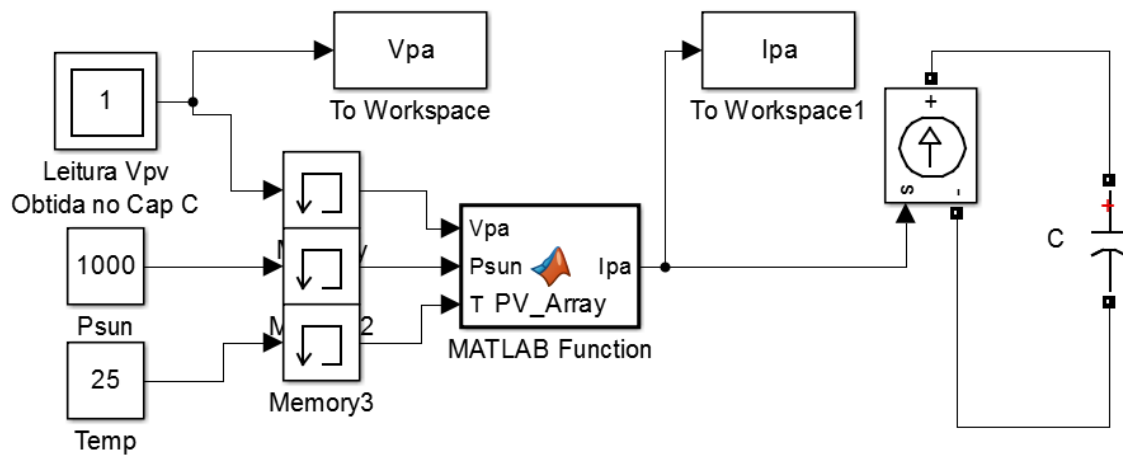


Figura 15 - Modelo do arranjo fotovoltaico implementado em Simulink.

Com os valores de I_{pa} (Corrente do arranjo FV) e V_{pa} (Tensão do arranjo FV) exportados para a área de trabalho é possível traçar a característica I-V do arranjo fotovoltaico como mostra a Figura 16 também destacando o MPOP com tensão de 394,6V e corrente de 15.21A resultando em uma potência de 6kW. Na Figura 17 tem-se a característica do painel em W-V, curva $P \times V$, onde fica claro o MPOP na tensão de 394,6V.

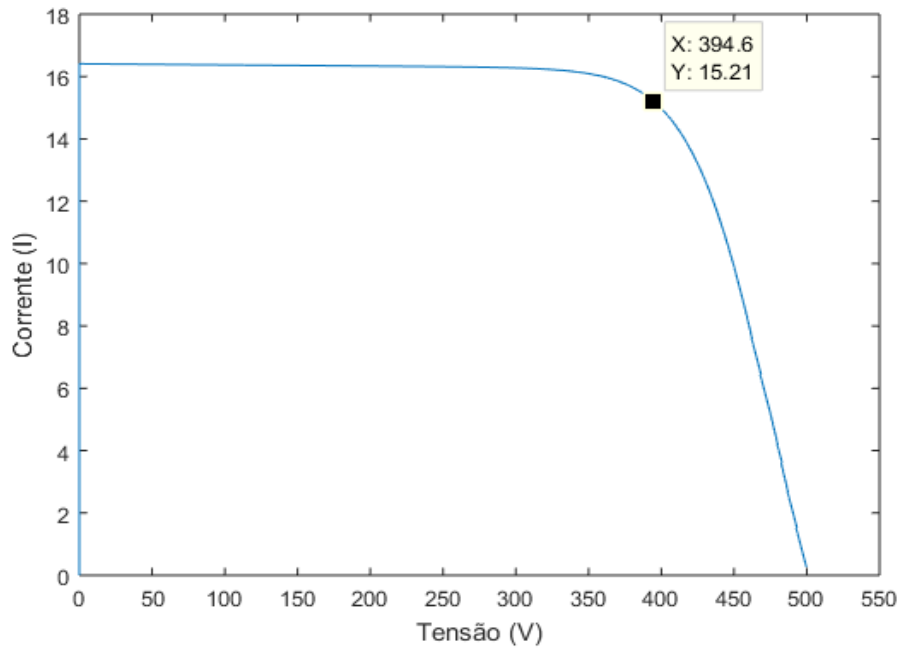


Figura 16 - Característica I-V do arranjo fotovoltaico.

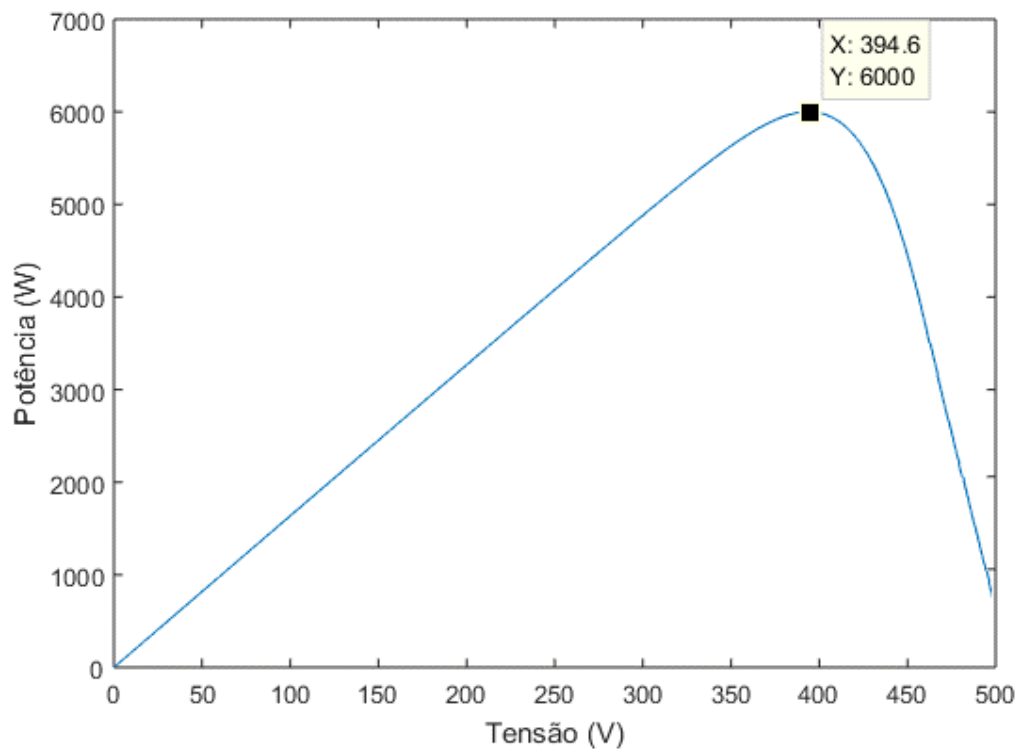


Figura 17 - Característica P-V do arranjo fotovoltaico

Este MPOP é para a STC, porém o arranjo fotovoltaico real, instalado em residências e/ou prédios, apresentam características de irradiação solar e temperatura variáveis durante todo o dia. Desta forma, o MPOP é variável e faz se necessário o uso de técnicas de extração de máxima potência, as denominadas *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) que nada mais é do que o rastreamento do ponto de máxima potência durante a operação do sistema.

3.2.2. ALGORITMOS DE MPPT

Neste projeto foram utilizados dois algoritmos de MPPT combinados entre si, nomeadamente o P&O e o Tensão Constante. O método da tensão constante fornece o ganho a ser aplicado no sinal de referência do inversor (valor da corrente de pico a ser injetada na rede), enquanto o método P&O faz perturbações na referência do algoritmo da tensão constante, de forma a otimizar a extração de energia e torná-lo independente das variações atmosféricas, alterando a tensão de máxima potência de forma dinâmica. Os dois algoritmos foram modelados em Matlab/Simulink® como mostram a Figura 18 e a Figura 19.

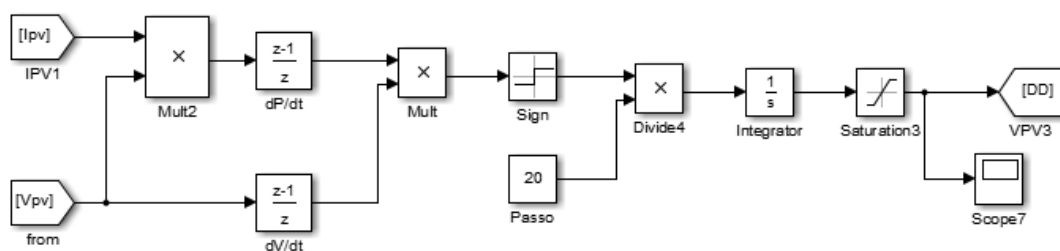


Figura 18 - Modelo implementado em MatLab/Simulink®, para simulação do algoritmo P&O

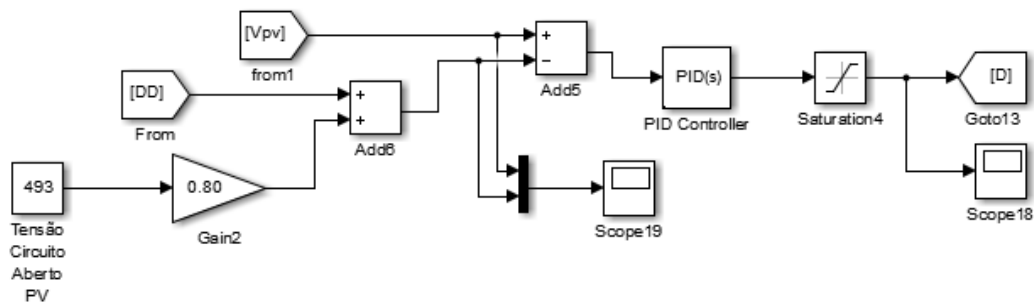


Figura 19 - Modelo implementado em MatLab/Simulink®, para simulação do algoritmo da Tensão Constante.

O desempenho do algoritmo de MPPT é medido pelo fator de rastreamento FR (ou TF – *Tracking Factor*) como mostra a equação (11) que é a quantidade de energia que foi convertida pelo MPPT em relação a máxima energia disponível. Em outras palavras, dita o quão eficiente é o algoritmo para converter a energia solar disponível em elétrica.

$$TF = \frac{\int P_{pv}}{\int P_{max}} \cdot 100\% \quad (11)$$

3.2.3. INVERSOR DE TENSÃO

A modelagem do inversor de tensão foi feita em MatLab/Simulink®. A Figura 20 mostra o circuito de potência do inversor ligado à rede de distribuição, sendo necessário o cálculo dos indutores de conexão com a rede de distribuição para a correta operação do sistema.

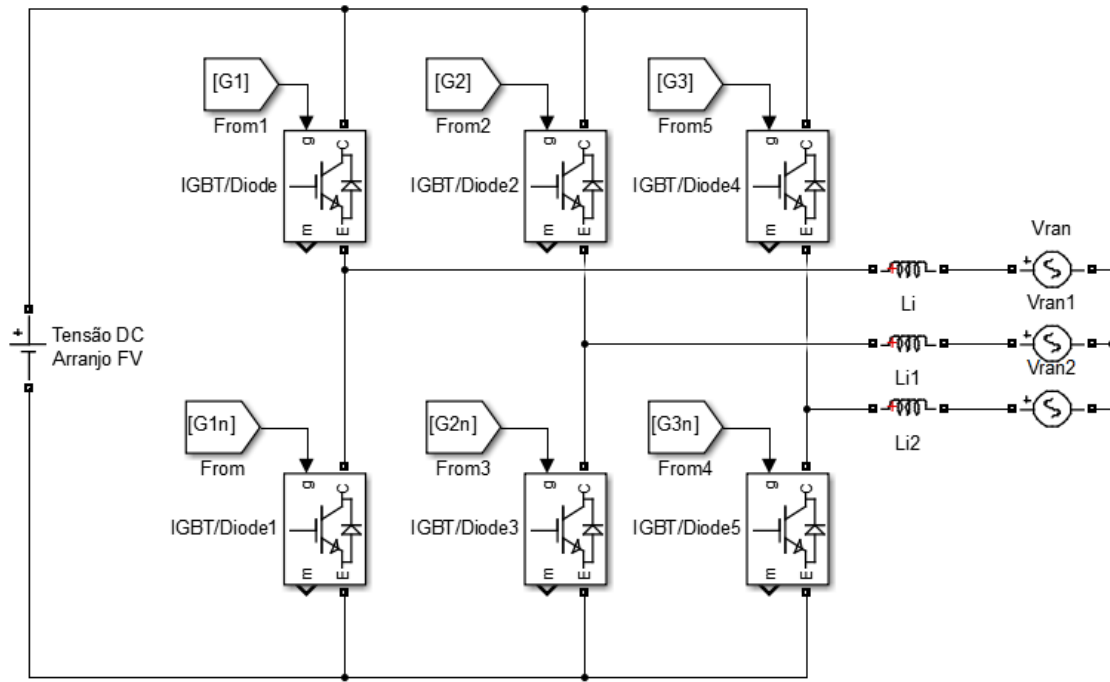


Figura 20 - Circuito de Potência do Inversor Trifásico

O filtro indutivo é utilizado para controlar o fluxo de corrente injetada na rede pela interconexão do sistema à rede elétrica de distribuição. A componente fundamental da corrente injetada, que é a mesma que percorre o indutor, deve ter forma senoidal e frequência de 50 ou 60 Hz dependendo do regime utilizado pelo país. Entretanto há uma componente de alta frequência nessa corrente devido a frequência de chaveamento do inversor. Um dos critérios de dimensionamento desta indutância de conexão tem como base a máxima ondulação permissível, uma vez que ao reduzir o tamanho do *ripple* reduz-se a distorção harmônica de corrente e esta se aproxima de uma onda senoidal [48].

A equação (12) expressa a tensão sobre um indutor, em particular um dos indutores da Figura 20.

$$L \cdot \frac{d}{dt} i_L(t) = L \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_{pv}}{2} - V_{an}(t) \quad (12)$$

Onde V_{an} é a tensão de uma fase da rede, dada pela equação (13).

$$V_{an}(t) = V_{anp} \cdot \cos(\omega_0 t) \quad (13)$$

Considerando um período completo de comutação.

$$\Delta t = D(\omega_0 t) \cdot T_s \quad (14)$$

Onde:

- T_s é o período de chaveamento;

- $D(\omega_0 t)$ é a razão cíclica;

Substituindo as equações (13) e (14) na equação (12), obtem se a equação (15):

$$\frac{L\Delta I_L}{T_s} = D(\omega_0 t) \cdot \left[\frac{V_{pv}}{2} - V_{anp} \cdot \cos(\omega_0 t) \right] \quad (15)$$

Na qual [48]:

$$D(\omega_0 t) = M \cdot \cos(\omega_0 t) V_{anp} \quad (16)$$

$$\frac{V_{pv}}{2} \sim V_{anp} \quad (17)$$

Onde M é o índice de modulação.

Tendo então a equação (18):

$$\frac{2 \cdot L\Delta I_L}{T_s V_{pv}} = M \cdot \cos(\omega_0 t) - [M \cdot \cos(\omega_0 t)]^2 \quad (18)$$

O termo a direita da equação (18) define a ondulação de corrente, conforme a equação (19):

$$\overline{\Delta I_L} = M \cdot \cos(\omega_o t) - M^2 \cdot \cos^2(\omega_o t) \quad (19)$$

Assim a indutância do filtro pode ser definida considerando o máximo da ondulação de corrente como mostra a equação (20):

$$L = \frac{V_{pv} \overline{\Delta I_{Lmax}}}{2 \Delta I_L f_s} \quad (20)$$

Utilizando como dados de entrada os valores de:

- $V_{pv} = 400V$;
- $\Delta I_{Lmax} = 19A$;
- $\Delta I_L = 42.2 A$;
- $f_s = 30kHz$;

Obtém se o valor do indutor de conexão:

- $L = 3mH$.

Para a modelagem do circuito de controle do inversor, foi considerado o circuito da Figura 21 como o circuito equivalente para um determinada fase, neste caso a fase A. Onde:

- L_a é o indutor de interconexão do inversor a Rede;
- R_a é a resistência interna do Indutor L_a ;
- M_a é o índice de modulação da fase A;

- V_{pv} é a tensão do arranjo FV;

- V_{ran} é a tensão de fase A;

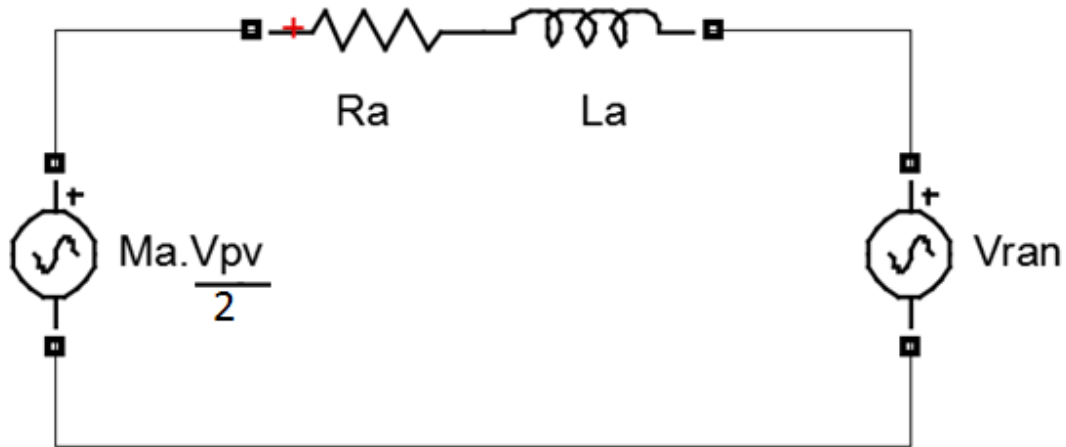


Figura 21 - Circuito de potência da fase A do Inversor.

Equacionando o circuito da Figura 21, obtemos a equação (21):

$$M_a \frac{V_{pv}}{2} - L_a \frac{di_{LA}}{dt} - i_{LA} - V_{ran} = 0 \quad (21)$$

Aplicando a transformada de Laplace obtém se a equação (22):

$$M_a(s) \frac{V_{pv}}{2} - V_{ran}(s) = i_{LA}(s) \cdot [s \cdot L_a + R \cdot L_a] \quad (22)$$

Considerando a rede como uma perturbação do sistema, encontra se a Função de transferência (FT), na forma da equação (23):

$$G_{im}(s) = \frac{i_{LA}(s)}{M_a(s)} = \frac{1}{s \cdot L_a + R \cdot L_a} \cdot \frac{V_{pv}}{2} \quad (23)$$

Utilizando como dados de entrada os valores de:

$$- V_{pv} = 400V;$$

$$- L_a = 3mH;$$

$$- R = 250m\Omega.$$

Obtém-se a função de transferência descrita na equação (24):

$$G_{im}(s) = \frac{200}{0,003 \cdot s + 0,00075} \quad (24)$$

Pela equação (23) percebe-se que ao controlar o índice de modulação da fase A (M_a) controla-se a corrente na fase A (I_{LA}).

Considerando elementos iguais por fase, esta função representa bem o comportamento das demais fases (B e C), uma vez que os índices de modulação M_a , M_b e M_c são de amplitude iguais apenas defasados de 120° entre si.

O sinal de referência do Inversor é gerado através do circuito de controle que por sua vez foi modelado em três partes como mostra a Figura 22, Figura 25 e Figura 26.

O circuito responsável pelo sincronismo do inversor com a rede de distribuição, foi modelado em MatLab/Simulink® utilizando um PLL trifásico e funções trigonométricas senoidais para criar sinais de referência na frequência e fase da rede como mostra a Figura 22.

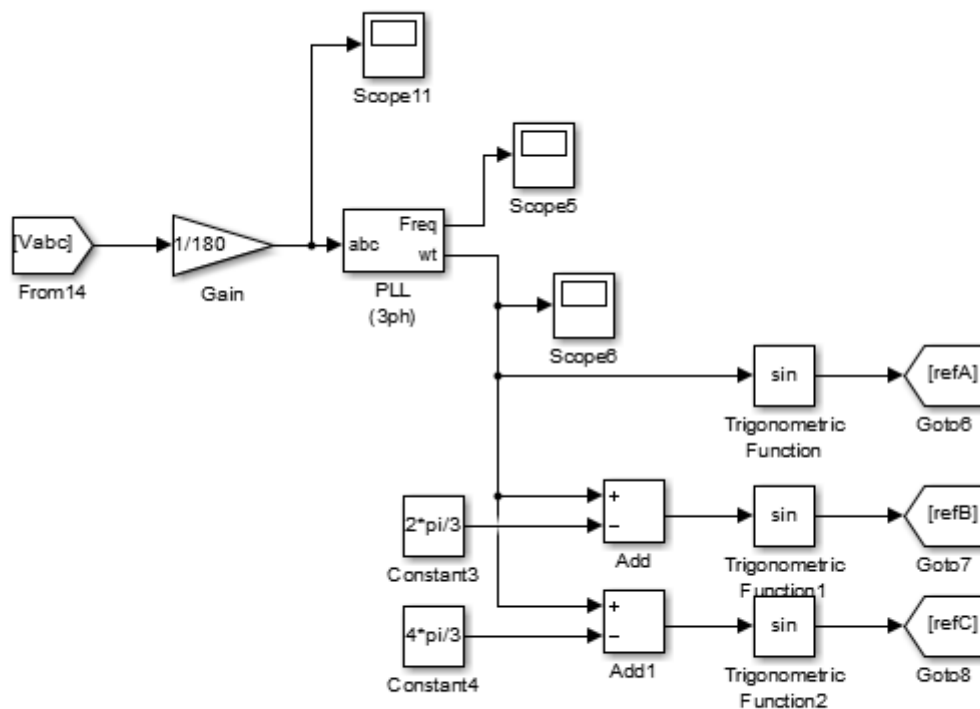


Figura 22 - Circuito de controle responsável pelo sincronismo do Inversor via PLL

O circuito de controlo responsável por comparar o sinais vindos do algoritmos de MPPT com o sinais de corrente injetadas no momento e gerar as razões cíclicas é apresentado na Figura 25. Verifica-se então que existe uma realimentação da corrente e para que este sistema siga corretamente esta referência é necessário adicionar um controlador. Adotou-se para realizar este controle um controlador proporcional integrador (PI). O Controlador PI foi dimensionado para uma frequência de cruzamento de ganho de 10% da frequência de chaveamento do inversor, ou seja de 3kHz e margem de fase de 90 graus, o que torna o sistema estável e rápido.

A Figura 23 e a Figura 24 demonstram os diagramas de bode de módulo e de fase, primeiramente, do sistema não compensado e na sequência do sistema compensado, após a inserção do controlador PI, dado pela equação (25).

$$C_i(s) = \frac{0,1(s + 4,7)}{s} \quad (25)$$

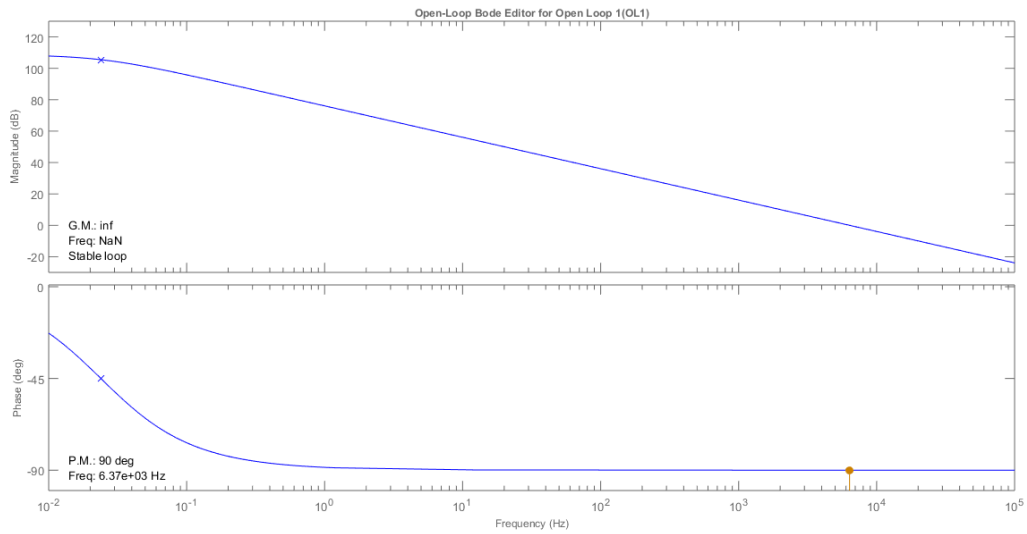


Figura 23 - Diagramas de bode do sistema não compensado.

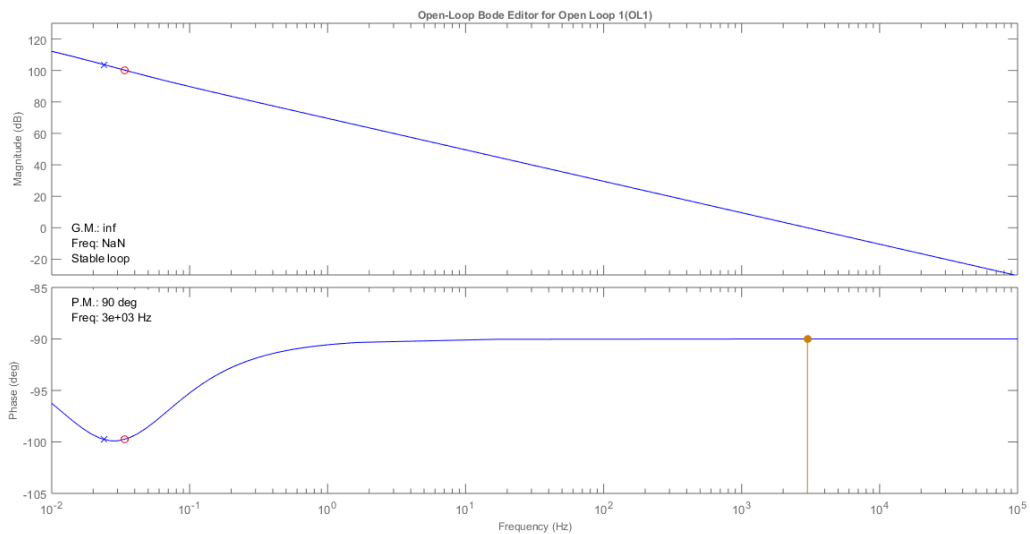


Figura 24 - Diagramas de bode do sistema compensado

Concluindo o circuito de controlo do inversor, há o circuito responsável pela modulação por largura de pulso (PWM) que foi modelado em MatLab/Simulink® como mostra a Figura 26, onde se verifica a presença dos três moduladores necessários ao sistema.

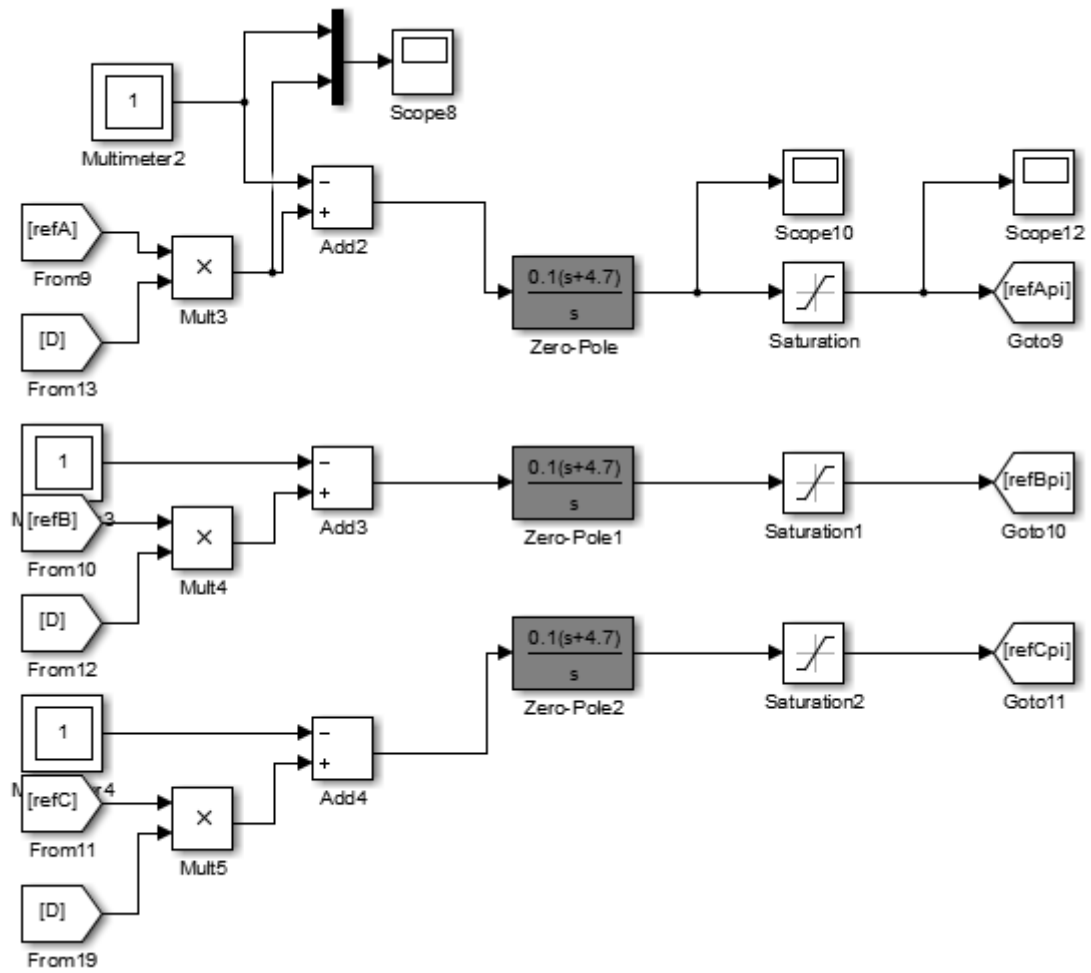


Figura 25 - Circuito de realimentação contendo os controladores PIs

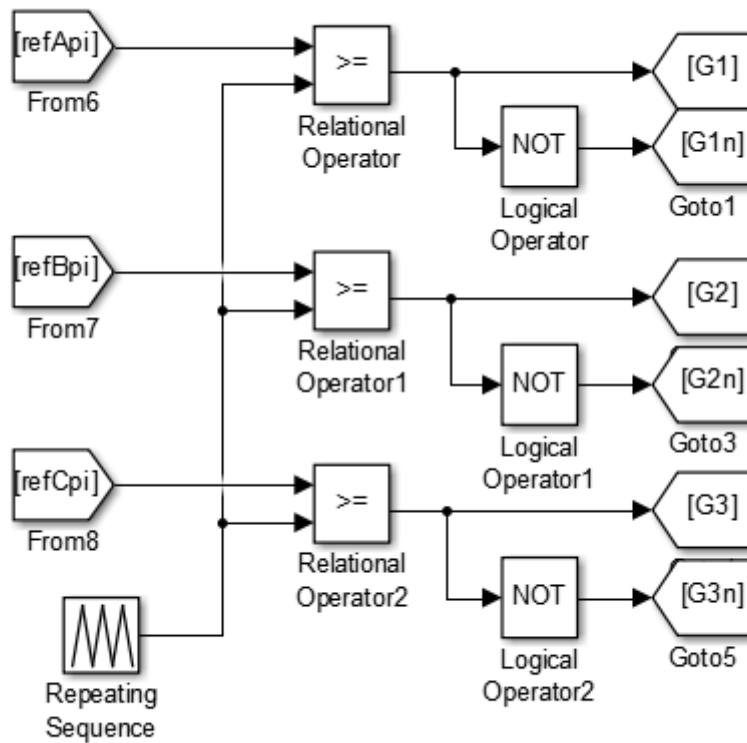


Figura 26 - Circuito de controlo responsável pela PWM do sinal de referência.

Um ponto importante de análise é sobre as perdas do inversor e do circuito de interconexão que devem ser consideradas. As perdas do inversor se resumem principalmente às perdas na chaves, ou ditos transistores e são definidas de acordo com o tipo de transistor.

Para o transistor IGBT pode ser considerada a equação (26).

$$P_{disIGBT} = V_{ceon} \cdot I_{avg} \quad (26)$$

Onde:

- $P_{disIGBT}$ é a potência dissipada em um IGBT;

- V_{ceon} é a tensão de funcionamento do IGBT e;

- I_{avg} é a corrente média que circula pelo IGBT.

Para o transistor MOSFET considera-se a equação (27).

$$P_{disMOSFET} = R_{dson} \cdot I_{rms}^2 \quad (27)$$

Onde:

- $P_{disMOSFET}$ é a potência dissipada em um MOSFET;

- R_{dson} é a resistência entre dreno e source de funcionamento do MOSFET, e;

- I_{rms} é a corrente eficaz que circula pelo MOSFET.

A perdas no circuito de interconexão, nesse caso, dependem da resistência interna dos indutores e da corrente eficaz como mostra a equação (28).

$$P_{disL} = R_L \cdot I_{rms}^2 \quad (28)$$

Onde:

- P_{disL} é a potência dissipada em um indutor de conexão;

- R_L é a resistência interna de um indutor de conexão, e;

- I_{rms} é a corrente eficaz que circula pelo indutor de conexão.

Dado os requisitos da simulação deste projeto: $V_{ceon} = 1,8V$ [49]; $R_{dson} = 65m\Omega$ [50]; $R_L = 250m\Omega$.

Considerando hipoteticamente, que o inversor consegue injetar toda a corrente nominal na rede (considerando as correntes para prover 6KW na rede), tem-se:

$$- I_{rms_rede} = 15.74A;$$

$$- I_{rms_IGBT} = 11.13A, e;$$

$$- I_{avg_IGBT} = 7.1A.$$

Obtém se:

$$- P_{disIGBT} = 12,78*6=76,68W;$$

$$- P_{disMOSFET} = 8,05*6=48,31W, e;$$

$$- P_{disL} = 20.64*3=61,94W.$$

O rendimento de potência do circuito inversor também pode ser dado pela equação (29).

$$\eta_P = \frac{P_{inj}}{P_{max}} \cdot 100\% \quad (29)$$

Onde:

- η_P é o rendimento de potência;

- P_{inj} é a potência injetada pelo inversor na rede, e;

- P_{max} é a potência máximo oferecida.

Considerando esta opção de IGBT a eficiência hipotética é de 97% e considerando esta opção de MOSFET a eficiência hipotética é de 98%. Obviamente, melhores IGBTs podem ser considerados, e ainda tem-se que prever as perdas no capacitor do FV, dos sensores do conversor e os circuitos de alimentação auxiliar. Mas ainda interessante para uma análise preliminar. Como atualmente o IGBT tem apresentado melhores resultados práticos, com correntes e tensões elevadas de bloqueio, e verificando que as eficiências são muito próximas, nas simulações serão utilizados chaves IGBTs.

4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Neste capítulo será demonstrado o estudo de caso com a simulação do sistema inversor trifásico de injeção de potência na rede de distribuição trifásica de baixa tensão, sem uso de transformador, utilizando como fonte primária de energia um arranjo fotovoltaico (FV) modelado no capítulo anterior, bem como os resultados extraídos.

4.1. ESTUDO DE CASO

No estudo de caso foi feita a simulação de um inversor de tensão trifásico alimentado por um arranjo FV composto por módulos policristalinos KC200GT da Kyocera (com 54 células fotovoltaicas cada – 200W), na configuração de 2 *arrays* de 15 painéis em série (6000W), conforme Figura 27.

O arranjo fotovoltaico foi submetido a uma alteração (degrau) de radiação solar durante a simulação para uma melhor observação dos resultados, mantendo a temperatura constante em 25°C e extraiu-se também resultados para a condição nominal de potência (6kW) para demonstrar a eficiência do inversor.

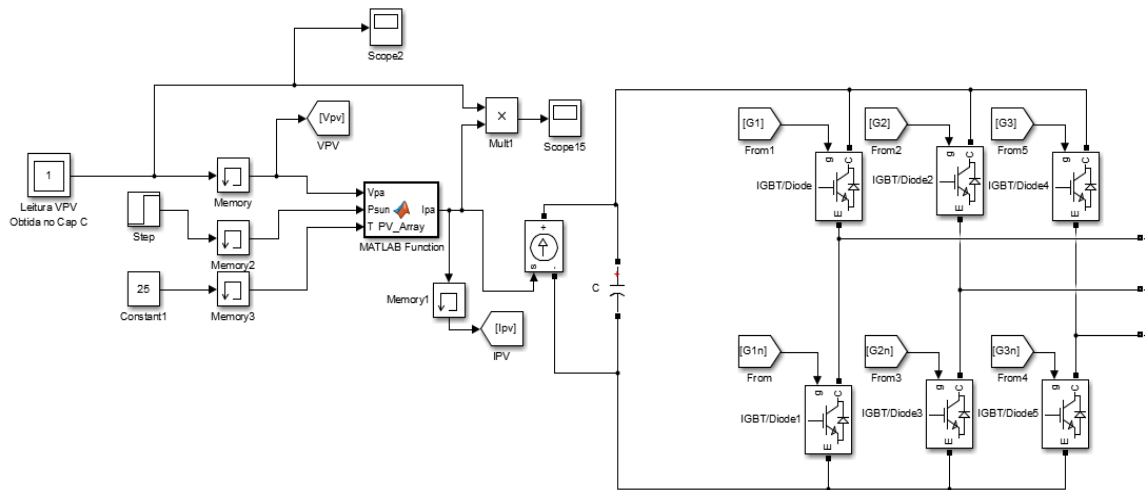


Figura 27 - Inversor Trifasico Alimentado pelo Painel FV

Conforme discutido previamente, para maximizar o aproveitamento da energia fornecida pelo arranjo fotovoltaico foi feito o uso de dois algoritmos de MPPT em conjunto como mostra a Figura 28, onde o método P&O faz perturbações na referência do método da Tensão Constante procurando o ponto de máxima potência para cada instante de tempo.

Como a energia extraída do painel FV é essencial neste projeto, uma medida muito importante é o fator de rastreamento (TF) [39] [51], que nada mais é do que o percentual da energia disponível que aproveitada. Para computar o fator de rastreamento foram aplicados degraus de irradiação, de 500W/m² para 750 W/m² e posteriormente para 1000 W/m².

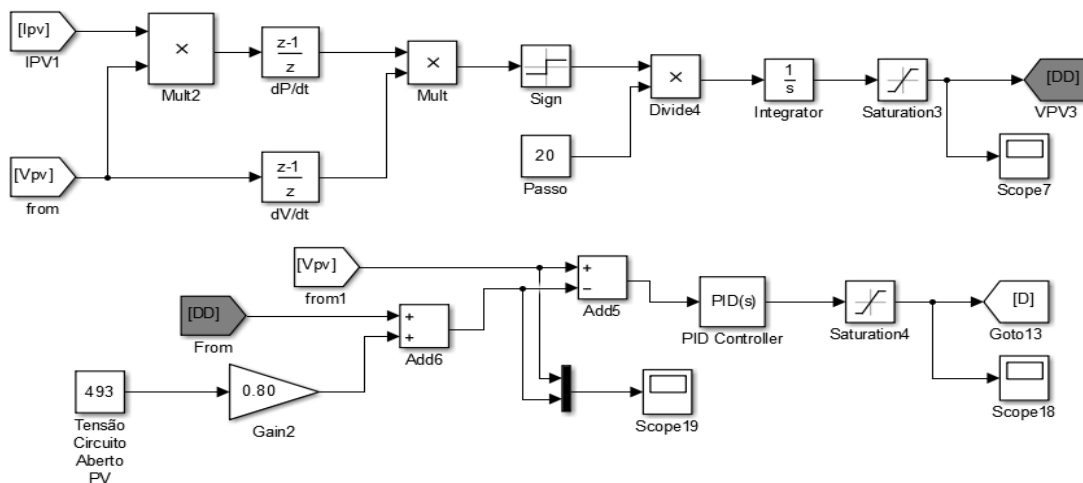


Figura 28 - MPPT P&O acima e CV abaixo.

Para garantir a segurança na conexão do inversor à rede, foi utilizado um algoritmo PLL trifásico do próprio MatLab/Simulink® como mostra a Figura 29, anexado ao circuito de controlo do inversor para ser o responsável pelo sincronismo do inversor com a rede de distribuição para o conhecimento, principalmente, da fase e da frequência da rede.

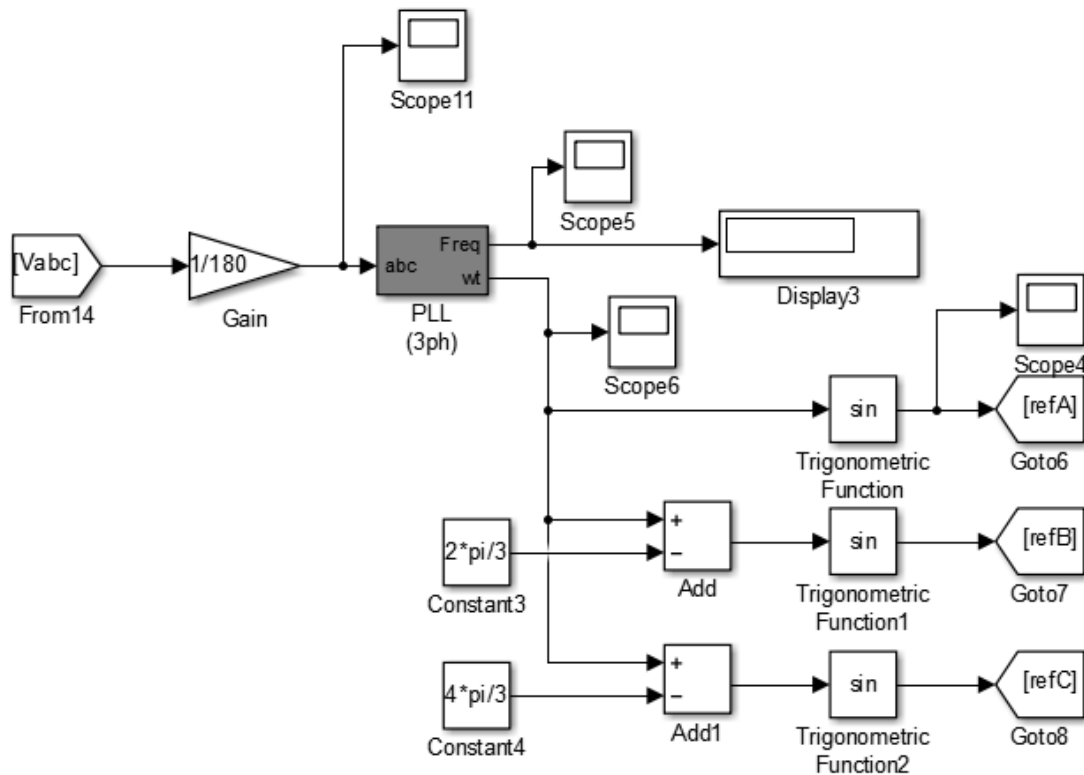


Figura 29 - Bloco PLL no circuito de controlo do inversor.

A análise do circuito de controlo responsável por comparar os sinais vindos dos algoritmos de MPPT, é apresentada pela Figura 30. Como saída o algoritmo de MPPT fornece a corrente de pico que deve ser injetada na rede para cada fase, e, portanto, indica quanto de energia o painel FV está fornecendo em determinado momento. Este sinal é multiplicado pelas referências senoidais unitárias para a determinação dos sinais de controlo. Desta forma, existe a malha de realimentação desta corrente, que é a subtração desta referência com a corrente real medida no sistema. Este sinal de erro passa pelo controlador que gera então as razões cíclicas de cada fase, para o maior aproveitamento de energia produzida pelo arranjo FV.

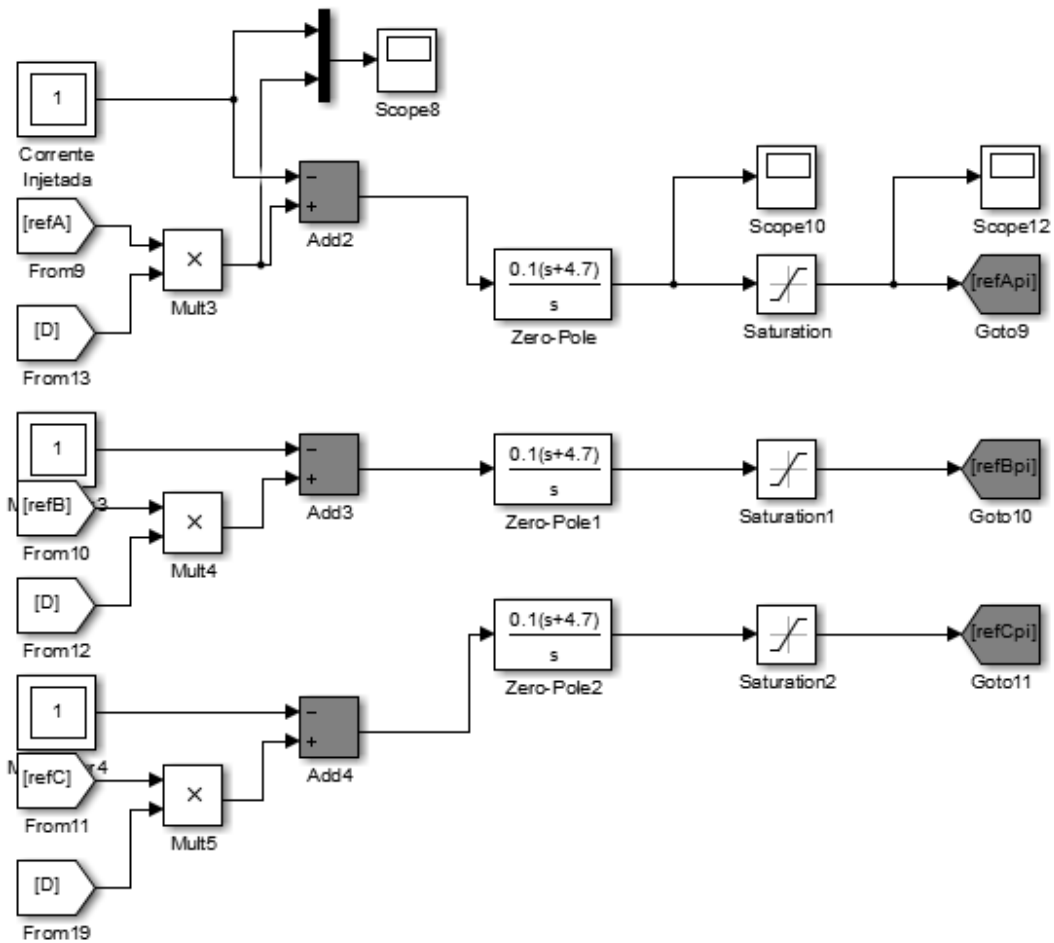


Figura 30 - Circuito comparador e razões cíclicas.

As razões cíclicas mostradas na Figura 30, vão para o circuito da Figura 31 para serem moduladas por largura de pulso, através da comparação do sinal com uma portadora (onda triangular em alta frequência), gerando assim o sinal para o chaveamento dos transistores do inversor de tensão trifásico.

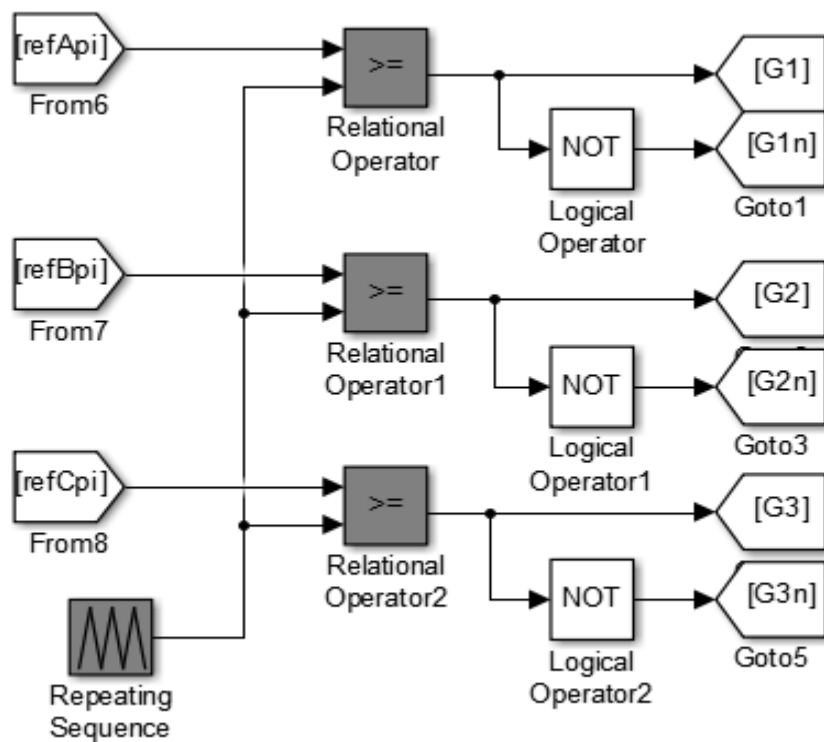


Figura 31 - Comparador das razões cíclicas com a portados a fim de gerar o PWM.

4.2. RESULTADOS

A primeira simulação foi realizada em regime de máxima potência com radiação solar máxima, ou seja $1000\text{W}/\text{m}^2$, e obteve-se os sinais de tensão da rede e corrente injetada na rede pelo inversor, estando ambas em fase como mostra a Figura 32, o que indica a injeção de energia ativa. Os valores de pico da tensão e da corrente foram respectivamente 180V e 21,7A. Além disto, a distorção harmônica total de corrente (DHT) é extremamente baixa, sendo menor do que 1%.

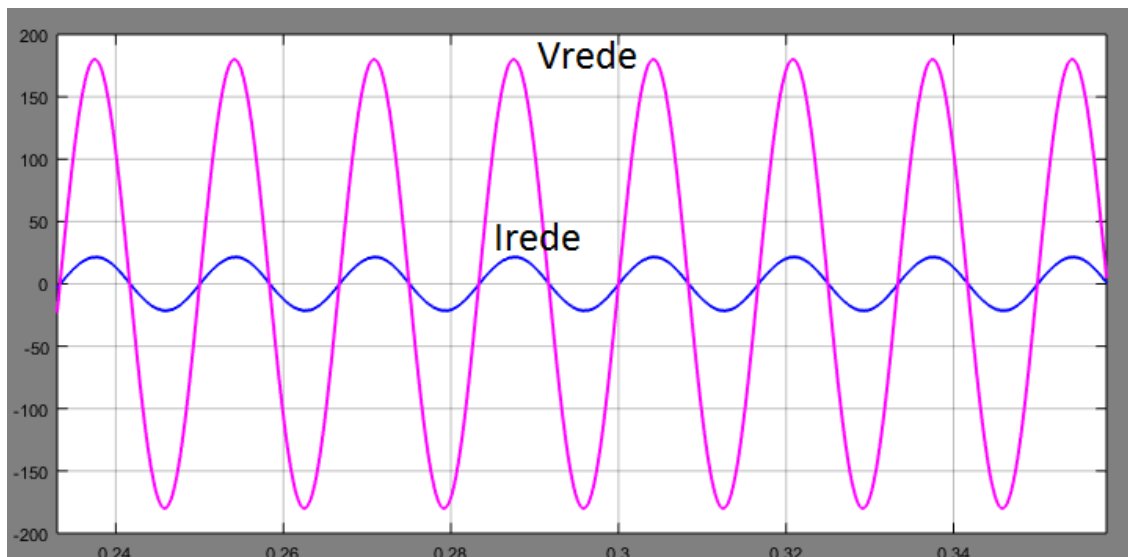


Figura 32 - Tensão da rede e Corrente injetada, considerando uma fase.

A potência fornecida pelo painel FV após o período transitório fica em torno de 6kW, que pode ser vista na Figura 33, que é a potência que alimenta o inversor que irá injetar a potência na rede.

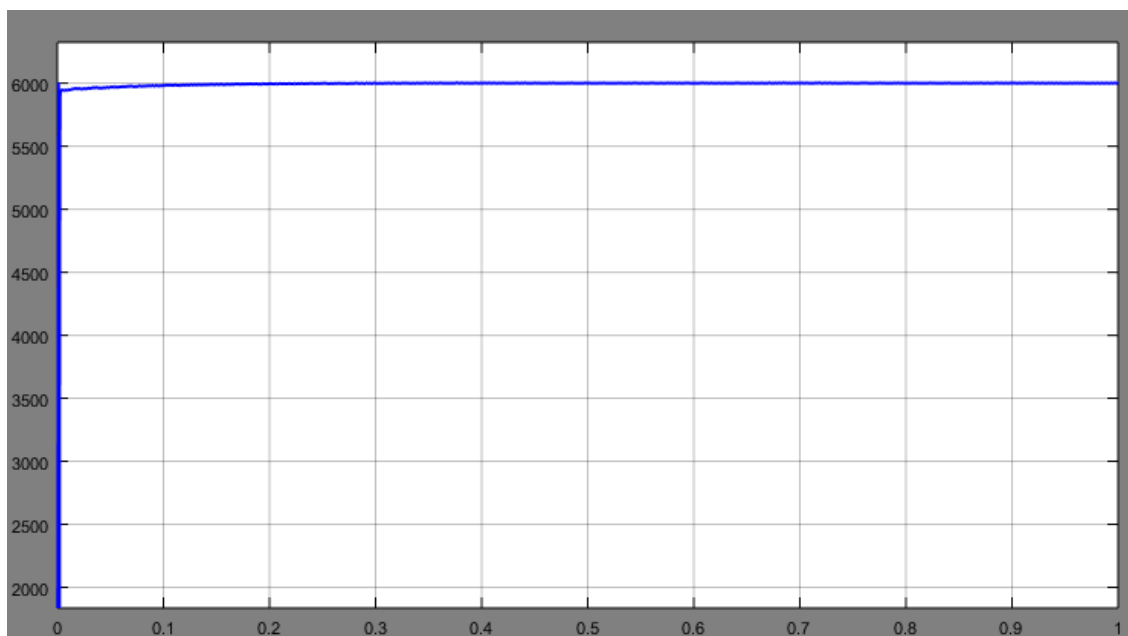


Figura 33 - Potência fornecida pelo painel FV

A potência injetada na rede é mostrada no gráfico da Figura 34, e tem um valor em regime permanente de aproximadamente 5,8kW, este valor é dito aproximado pois devido a constante perturbação do algoritmo P&O, a potência nunca tem um valor fixo e fica variando

em torno do valor dito acima como se nota na Figura 35. No entanto, a variação é bem pequena, o que demonstra a funcionalidade do algoritmo proposto.

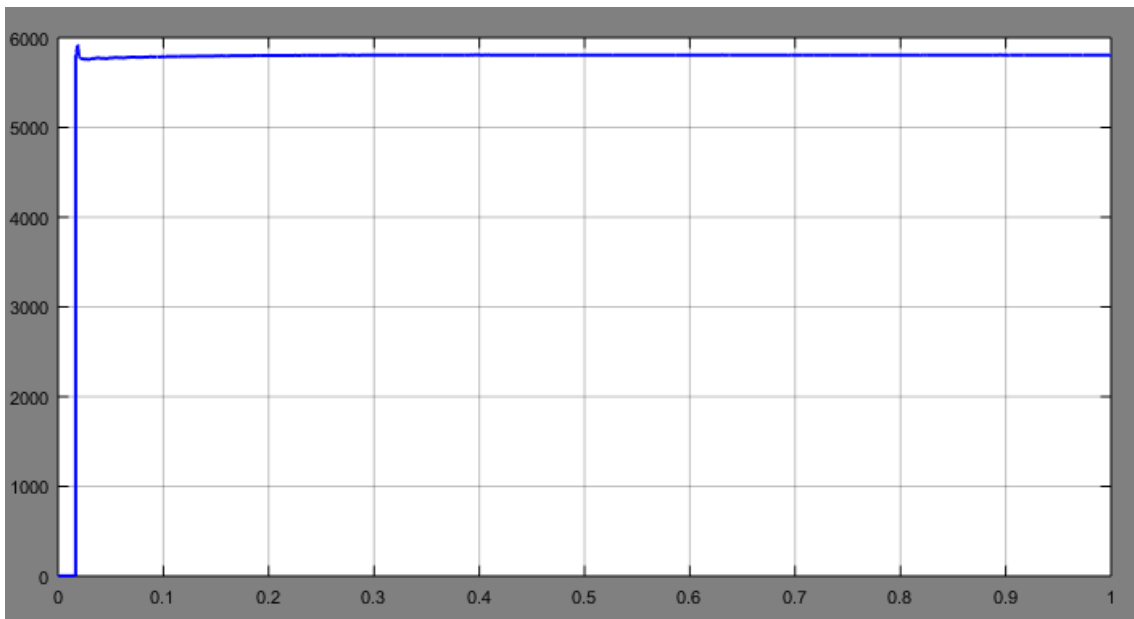


Figura 34- Potencia injetada na rede

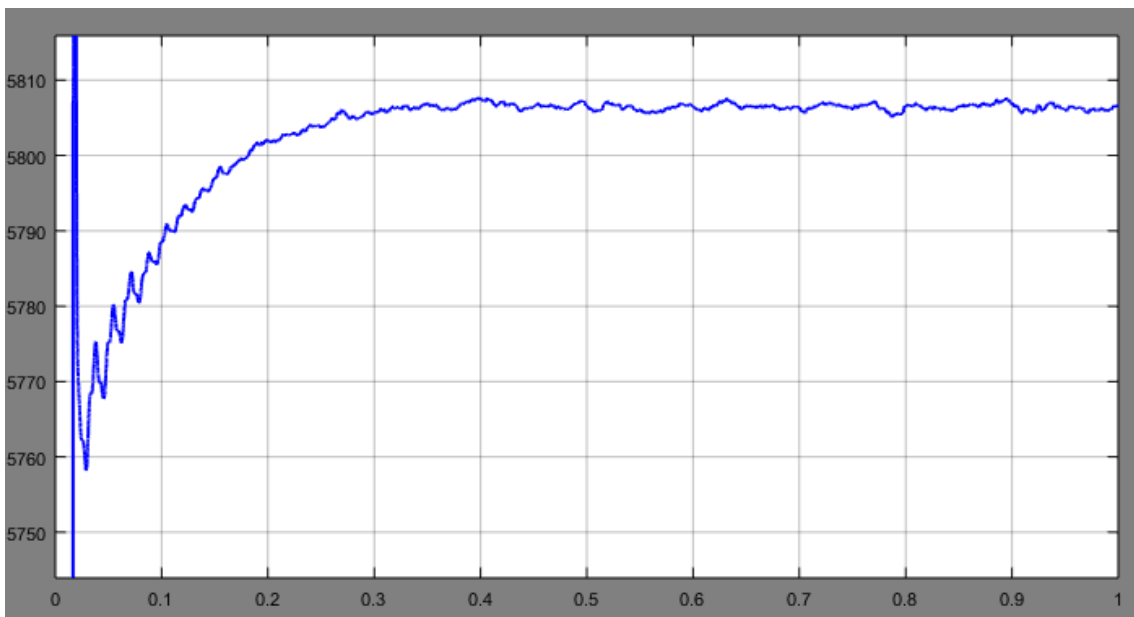


Figura 35 - Potencia injetada na rede com foco na linha de regime permanente

A Figura 36 mostra a tensão fornecida pelo arranjo FV, com o uso de um degrau de aumento de radiação solar que passa de 500W/m^2 para 1000W/m^2 em 1s de simulação. Também observa-se a tensão, que inicia em 400V, sendo esta a tensão do arranjo FV, quando o algoritmo misto P&O mais tensão constante começa a buscar a referência. Esta tensão tende a se estabilizar, após 0,85s, em torno dos 391V até a ocorrência do degrau, que aumenta a radiação e, neste caso, conseqüentemente o ponto de operação de máxima potência passa para os 394V após o regime transitório causado pelo degrau. O algoritmo de controle MPPT demonstrou funcionar corretamente, pois a tensão de operação do arranjo está perto da tensão de referência, como mostra Figura 37.

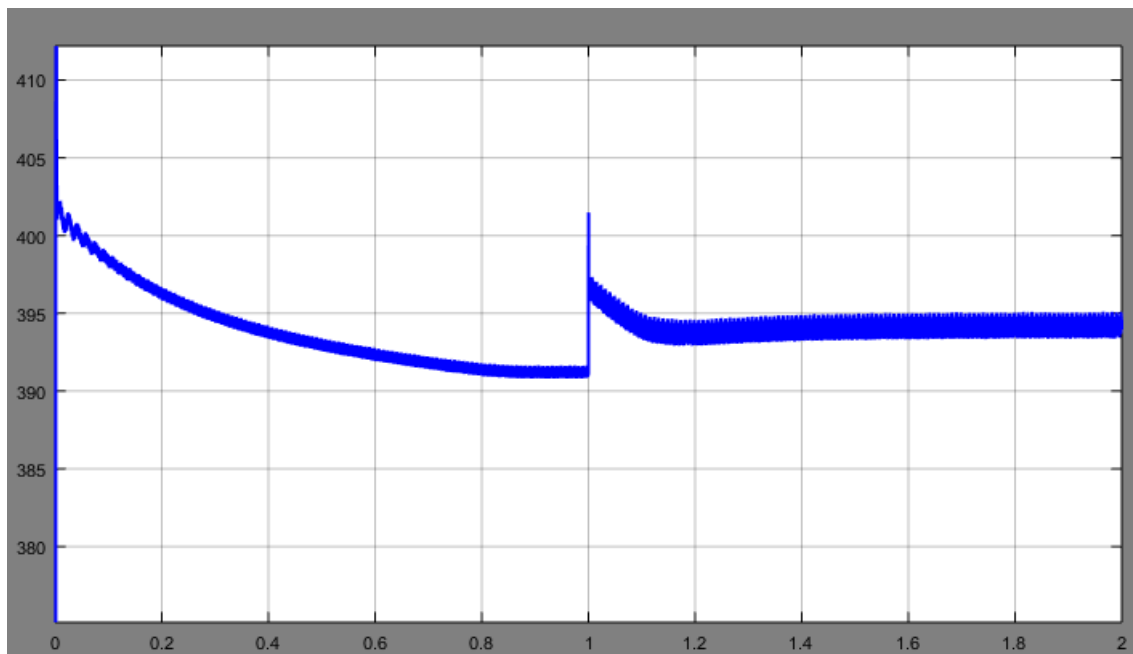


Figura 36 - Tensão do arranjo FV

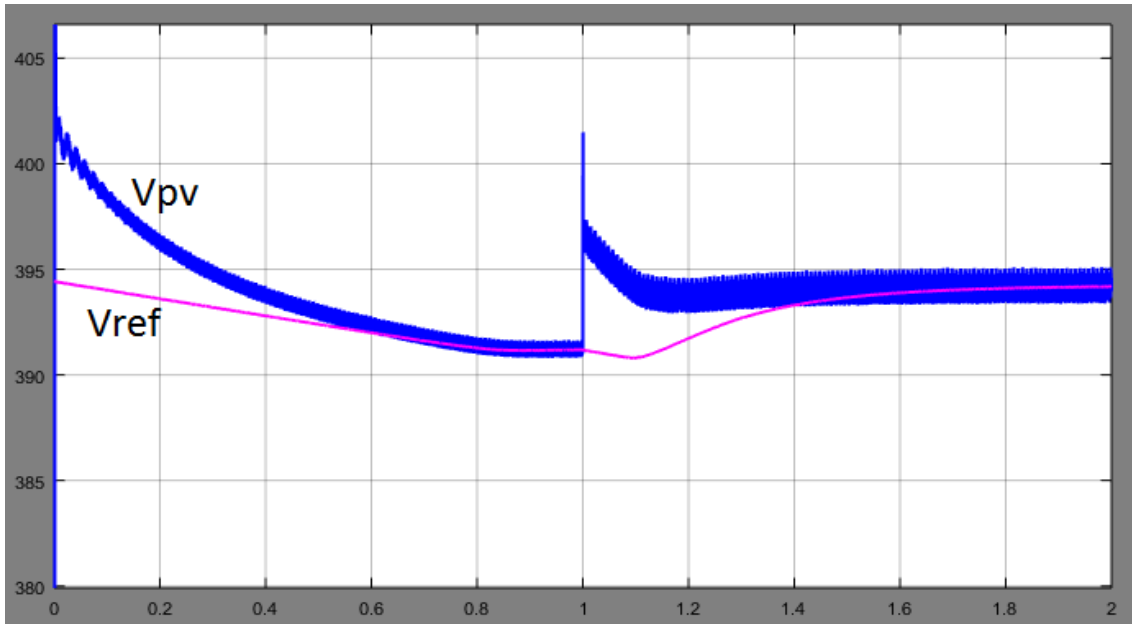


Figura 37 - Tensão do arranjo FV e da tensão de referência do método MPPT

Como verificado na tensão do arranjo FV, a corrente também sofre um aumento significativo ao dobrar a radiação solar, como nota se na Figura 38, e tende se a estabilizar em torno de 15,2A. Antes do aumento de radiação, entretanto ao contrário da tensão que diminui neste intervalo, a corrente sofre um aumento gradativo ao decorrer do tempo buscando a estabilidade, também após 0,85s, em 7,6A. A busca gradativa de aumento da corrente está relacionada com o tempo de estabelecimento do sistema.

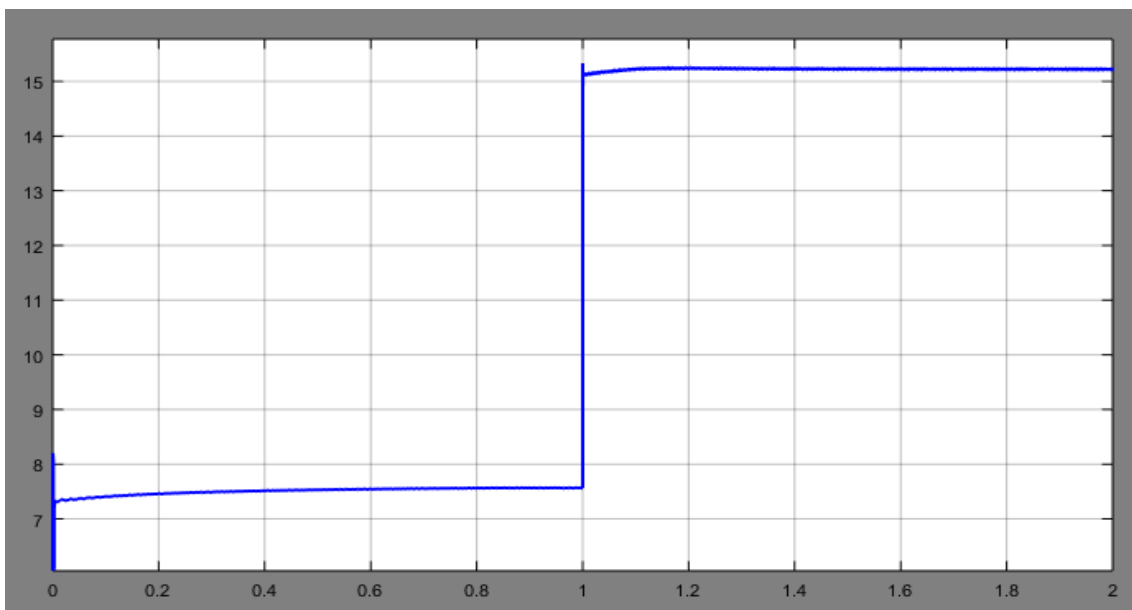


Figura 38 - Corrente do arranjo FV

Com o aumento significativo da corrente e da tensão após o degrau de aumento da radiação já era esperado um aumento também significativo na potência fornecida pelo arranjo FV, conforme se percebe na Figura 39, aumentando de cerca de 2,96kW para 6kW.

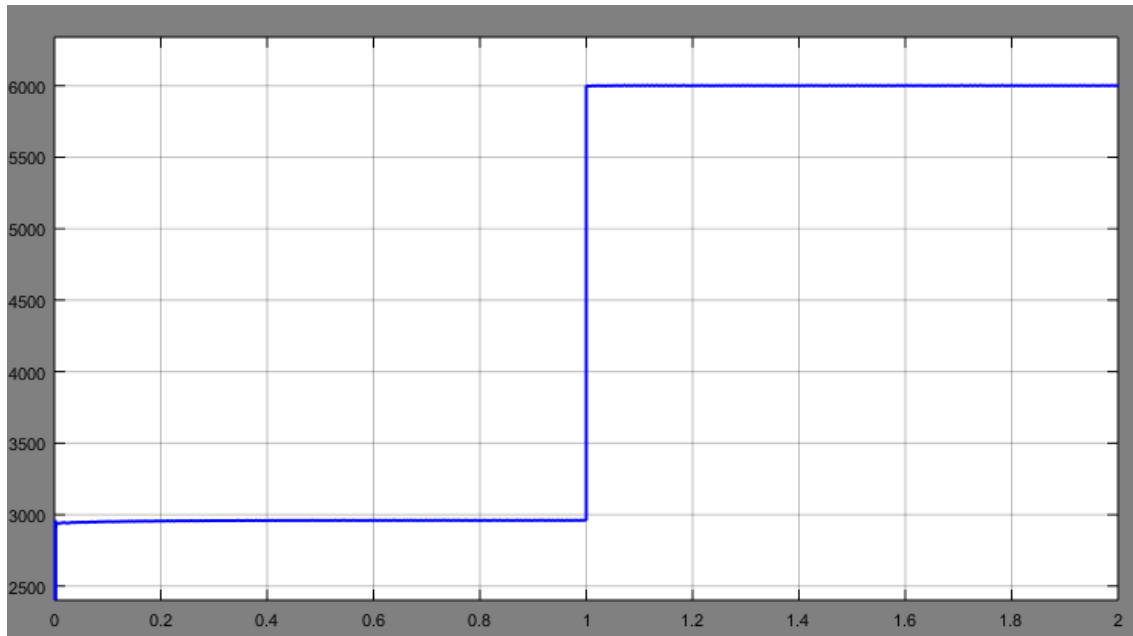


Figura 39 - Potencia fornecida pelo arranjo FV

Observando a Figura 40, que dá um enfoque maior na potência fornecida pelo painel FV, quando a radiação estava em 500W/m^2 , observa-se que a potência aumenta em função do tempo, o que se dá devido a atuação dos algoritmos de MPPT. Quanto a Figura 41 que leva seu enfoque para a potência depois que a radiação era máxima, nota-se que a potência permanece em uma pequena oscilação em torno de 6kW, o que é devido ao algoritmo P&O como visto no capítulo 3.

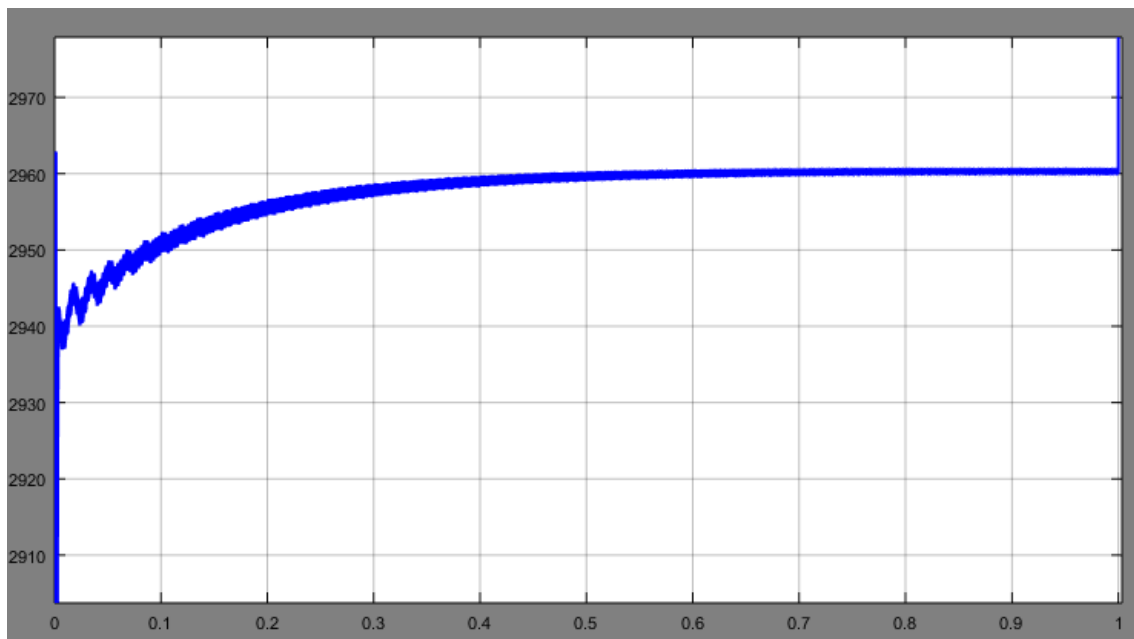


Figura 40 - Potencia fornecida pelo arranjo FV com ênfase antes do aumento de radiação

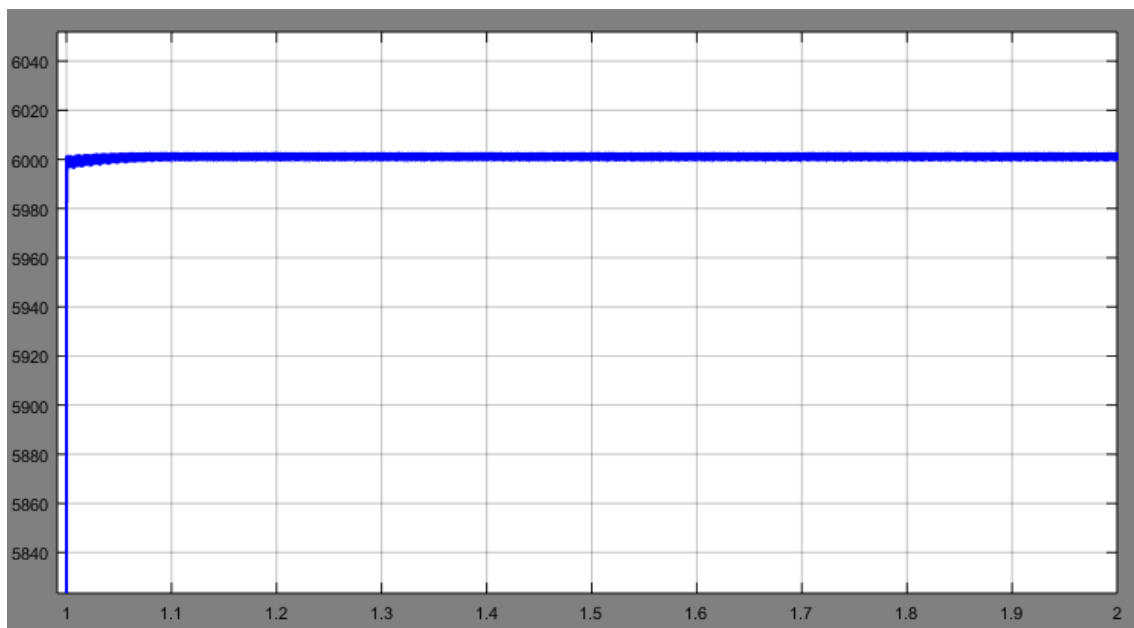


Figura 41 - Potencia fornecida pelo arranjo FV com ênfase depois do aumento de radiação

Os valores de pico de corrente da corrente injetada foram de 11A, antes do degrau de aumento da intensidade de radiação, e de 21,7A após o degrau, como se observa na Figura 42. Na mesma figura também nota-se que as corrente injetadas estão perfeitamente defasadas entre si como suposto a ser e com baixa distorção harmônica total (menor do que 1%).

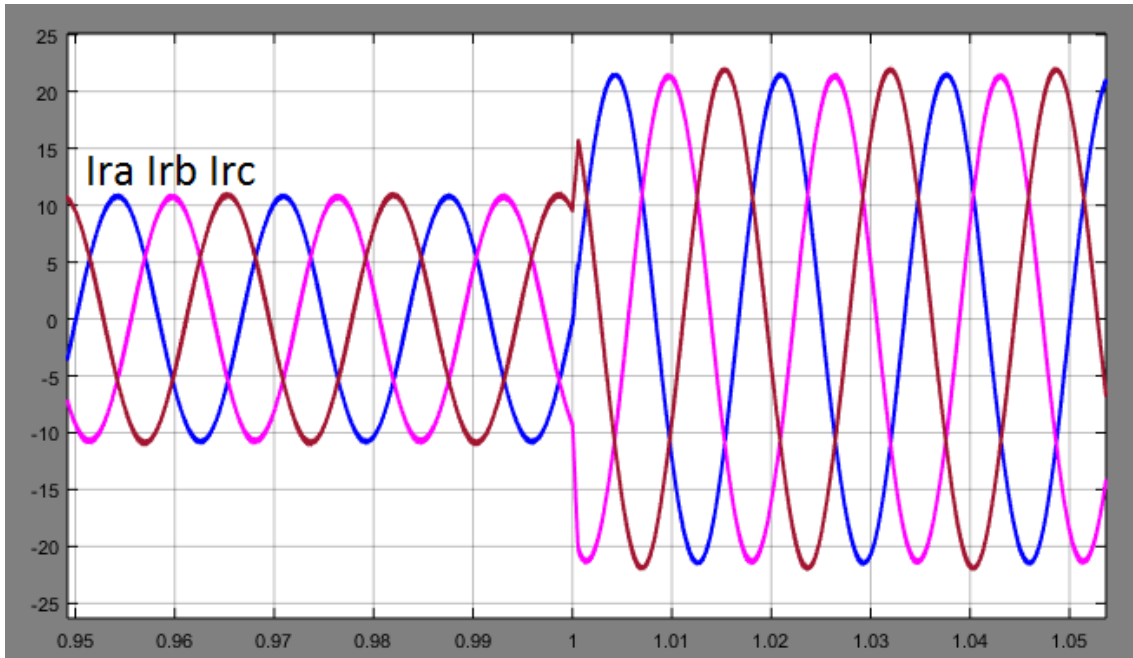


Figura 42 - Corrente trifásica injetada na rede antes e depois do degrau.

A Figura 43 traz a tensão da rede e a corrente injetada na rede pelo inversor em uma fase, e pode se notar que após o degrau em 1s, a tensão da rede permanece a mesma enquanto a corrente injetada sofre um aumento significativo e continua perfeitamente em fase com a rede (injeção de potência ativa).

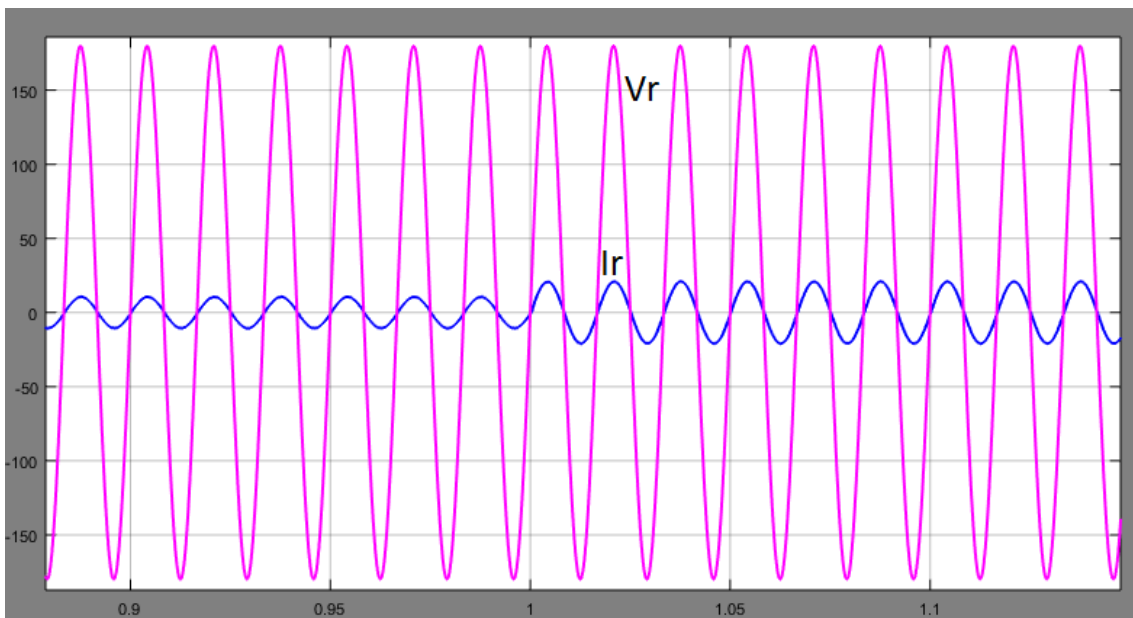


Figura 43 - Tensão da rede e Corrente injetada em uma fase antes e depois do degrau

Foi feita uma simulação com dois degraus de potência a fim de observar o fator de rastreamento a partir da potência máxima e a potência fornecida pelo painel FV, como mostra a Figura 44, e foi notado um valor de 99,5%. O valor de 99,5% demonstra a funcionalidade do algoritmo proposto visto que 99,5% de toda a energia disponível do sistema foi convertida pelo algoritmo de MPPT de solar em elétrica.

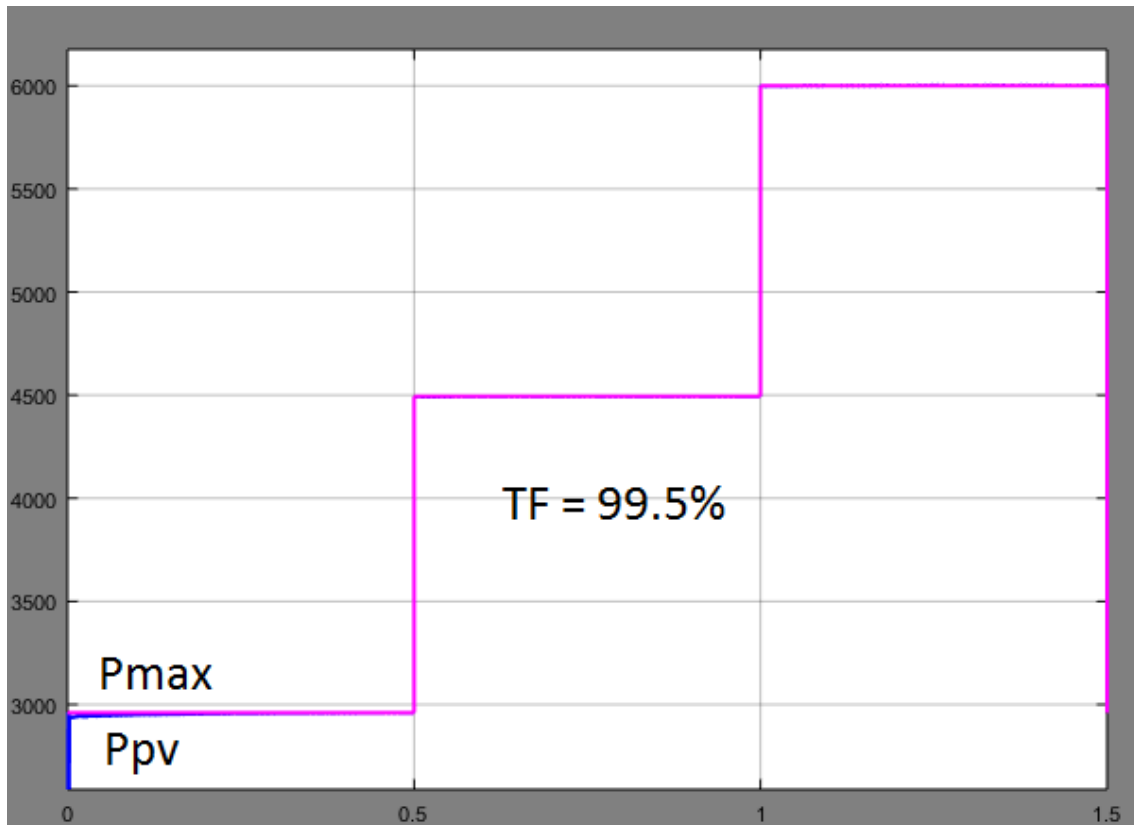


Figura 44 - Gráfico fator de rastreamento.

A Figura 45 traz a potência máxima e a potência injetada pelo circuito na rede de distribuição, bem como o rendimento do circuito, onde se observa o elevado rendimento da estrutura, que é cerca de 96,8%.

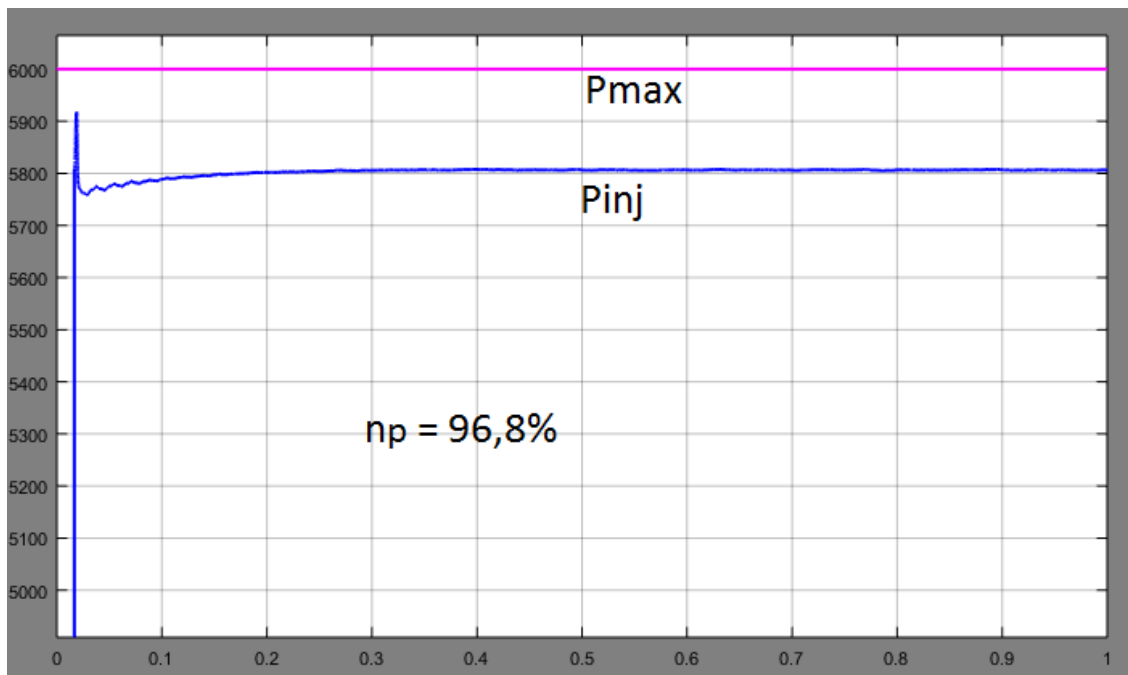


Figura 45 - Rendimento do circuito.

4.3. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

O resultados foram provenientes de três simulações diferentes, um a regime de potência de radiação solar máxima, outra com uma aumento da potência de radiação solar (por um degrau) e a terceira por dois aumentos de radiação solar (também por degraus).

Os resultados observados no regime de máxima potência de radiação solar foram da corrente de pico injetada, obtendo um valor de 21.7A por fase. Foi observado uma DHT muito baixa, sendo menor de 1% para todas as fases. Foi apresentado também que a corrente injetada se encontra em fase com a rede, entregando assim potência ativa para a mesma. Também foram observadas as potencias elétricas máximas, tanto fornecida pelo arranjo FV como a injetada na rede pelo inversor, e foram respectivamente 6kW e 5,8kW. Ainda nesta simulação foi calculado o rendimento do inversor que ficou em 96,8%.

Quanto a simulação com um degrau de aumento de radiação solar, foram observadas as atuações dos algoritmos de MPPT, observando-se as atuações rápidas e efetivas para os novos pontos de máxima potência. Foram também observadas a diferença entre tensões, correntes e potência fornecida pelo painel FV entre os dois níveis de radiação. Também foi observada a diferença nas correntes injetadas na rede antes e depois do degraus, tendo como diferença apenas sua amplitude que passou de 11A para 21.7A, alterando a potência injetada de acordo com o nível de irradiação do sistema.

A terceira simulação com a maior quantidade de degraus na potência de radiação solar foi utilizada para o computo do fator de rastreamento (FR) dos algoritmos de MPPT, tendo este um valor de 99,5%, mostrando-se muito eficiente.

5. CONCLUSÕES

Este projeto de dissertação tem como objetivo final o modelamento e simulação de um sistemas inversor trifásico para injeção de potência ativa na rede de distribuição a partir de fontes renováveis FV e para concluir a análise deste objetivo são realizadas as seguintes análises.

O desenvolvimento do modelo para simulação de um sistema FV, utilizou-se de um arranjo composto por 2 *arrays* de 15 painéis em série cada, totalizando 6kW de potência disponível. O Modelo foi atualizado e utilizado como uma fonte de corrente em série com um capacitor para poder alimentar o sistema inversor.

No que se trata do desenvolvimento do algoritmo MPPT, foram utilizados dois algoritmos em conjunto, devido, principalmente, a intenção de não se utilizar de conversor CC-CC para conseguir um maior rendimento. Ademais, somente o algoritmo de MPPT P&O não se mostrou funcional para a inicialização do sistema, precisando de um sistema adicional de controle. Este problema foi solucionado com a inserção do algoritmo de tensão constante. Para que o algoritmo se tornasse independente do tipo de painel FV adotou-se em paralelo a este, uma algoritmo de MPPT P&O, que visa contribuir alterando a tensão de referência do algoritmo da tensão constante para a busca efetiva do ponto ótimo. Com os resultados obtidos das simulações, notou-se que os métodos de MPPT funcionaram de acordo com o que foi estudado sobre os mesmos, e, conseqüentemente, como o esperado, trazendo assim êxito à proposta. Fato que corrobora neste sentido é o excelente fator de rastreamento, sendo superior a 99%.

Utilizou-se um algoritmo PLL trifásico para fazer a sincronização do sistema à rede de distribuição de baixa tensão, uma vez que é necessária a conexão segura do sistema. A saída do algoritmo de MPPT indica o pico de corrente a ser injetada na rede e é multiplicada pelas senóides defasadas obtidas pelo PLL. Este resultado é então aplicado ao sistema de controle

da corrente injetada, que possui um compensador PI. Este sistema de controle se mostrou adequado à proposta, visto que permite sempre a injeção de energia na rede sem retorno de corrente para o sistema FV. Ademais, este sistema de controle garante injeção de potência ativa na rede com baixíssima distorção harmônica total de corrente.

Desta forma, partindo do princípio que os objetivos fundamentais do trabalho foram explorados, resta afirmar que o objetivo principal que intitula este trabalho foi, conseqüentemente, como mostram os resultados do capítulo anterior, atingidos.

Um dos complementos plausíveis deste projeto desenvolvido pode ser a realização da implementação prática do mesmo, para assim permitir a comprovação da aplicabilidade do sistema proposto. Além disto, também é possível substituir o filtro L de conexão por um filtro LCL e realizar novamente a modelação e o controle da estrutura. Tendo como conclusão uma comparação entre estas duas propostas.

Referências Documentais

- [1] BRITO, Moacyr A. G. de. *Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica*. Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013.
- [2] VILLALVA, M. G.;FILHO, E. R. *Dynamic analysis of the input-controlled buck converter fed by a photovoltaic array*. *Controle & Automação*, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 463-474, 2008.
- [3] SILVA, Miguel J. L. V. R. da. *Smart Grids em Portugal Plano de Negócio para Serviço de Planeamento e Gestão Remota de Consumos Eléctricos*. Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Electrotécnica e Computadores à Universidade Técnica de Lisboa, em Julho de 2011.
- [4] EUROSTAT, Your key to European statistics, <<http://ec.europa.eu/eurostat>>, 2013.
- [5] FERNANDES, Nuno R. G. D. F. *Impacto da Ligação de Geradores Eolicos na Rede de Distribuição*. Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Electrotécnica e Computadores à Universidade Técnica de Lisboa, em Abril 2010.
- [6] EL-SAMAHY, I.; EL_SAADANY, E. *The effect of DG on power quality in a deregulated environment*. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3, n. 12-16, p. 2969-2976, Jun, 2005.
- [7] Larsson, *The Power Quality of Wind Turbines*, PhD thesis, Dept. of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, 2000.
- [8] Acetatos sobre Qualidade de Energia Eléctrica, Sistemas de Energia em Telecomunicações, 2º semestre 2007/08.
- [9] J. Soens, J. Driesen, R. Belmans, *Interaction Between Electrical Grid Phenomena and the Wind Turbine's Behavior*, K.U.Leuven, Department Electrotechnical Engineering ESAT-ELECTA

- [10] JORGE, Humberto, *Qualidade de Energia, Regulamentação e Normalização*, lge.deec.uc.pt/ensino/QE/Docs/QE_Regulamentacao.ppt, Jul. 2015.
- [11] NASCIMENTO, Klaus V. Do. *Metodologia de Analise de Variações de Tensão Causadas pela Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos*. Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica a Escola de Engenharia de São Carlos. 2013.
- [12] JENKINS, N.; Crossley, P.; KIRSCHEN, D.; STRBAC, G. *Embedded Generation*. Londos: The Institutions of Electrical Engineers (IEE), 2000
- [13] MGAYA, E. V; MULLER, Z; *The Impact of Connecting Distributed Generation to the Distribution System*, Acta Polytechnica Vol. 47 No. 4-5/2007.
- [14] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill Professional. 2nd Edition, 2002.
- [15] CENTO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO - CRESESB, CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL. *Energia solar – princípios e aplicações*. [S.l:s.n], 2000. Disponível em: <<http://www.crescesb.cepel.br/tutorial/>>. Acessado em: 10 maio 2009
- [16] FREITAS, Susana S. A. *Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos*. Relatório de Projecto apresentado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial no ramo de Engenharia Electrotécnica ao Instituto Politécnico de Bragança. 2008.
- [17] BERLENGA, João F. F. *Estudo de viabilidade de uma instalação fotovoltaica num edifício existente*. Trabalho Final de Mestrado apresentado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2012.
- [18] VALLERA, António; *Gazeta da Física*, IST.
- [19] POMILIO, José A. *Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica* <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/CAP4.pdf>> acesso em Out. 2015.

- [20] HSIEH, G. C; HUNG, J. C. *Phase-locked loop techniques – a survey*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, New York, v. 43, n. 6, p. 609-615, 1996.
- [21] CARDOSO, R.; CAMARGO, R. F. de; PINHEIRO, H.; GRÜNDLING, H. A. *Kalman filter based synchronization methods*. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 37., 2006, Jeju. Proceedings... Jeju: IEEE, 2006. p. 1-7.
- [22] CHOI, J. W.; KIM, Y.K; KIM, H. G. *Digital PLL control for single-phase photovoltaic system*. IEE Electric Power Applications, United Kingdom, v. 153, n. 1, p. 40-46, 2006.
- [23] PÁDUA, M. S.; DECKMANN, S. M.; SPERANDIO, G. S.; MARAFÃO, F. P.; COLON, D. *Comparative analysis of synchronization algorithms based on PLL, RDFT and kalman filter*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS - ISIE, 30., 2008, Vigo. Proceedings... Vigo: IEEE, 2007. p. 964-970.
- [24] SANTOS FILHO, R. M.; SEIXAS, P. F.; CORTIZO, P. C.; TORRES, L. A. B. SOUZA, A. F. *Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, New York, v. 55, n. 8, p. 2923-2932, 2008.
- [25] BOWER, W. *Evaluation of islanding detections methods for photovoltaic utility-interactive power systems*. [S.l:s.n], 2002. Disponível em: <<http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi>>. Acessado em: 10 maio 2009.
- [26] ROPP, M.; LARSON, D.; MEENDERING, S.; MCMAHON, D.; GINN, J.; STEVENS, J.; BOWER, W.; GONZALES, S.; FENNELL, K.; BRUSSEAU, L. *Discussion of a power line carrier communications- based anti-islanding scheme using a commercial automatic meter reading system*. In: PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION - PVEC, 4., 2006, Waikoloa. Proceedings... Waikoloa: IEEE, 2006. p. 2351-2354.
- [27] HOHM, D.; ROPP, M. *Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed*. Proc. Photovoltaic Specialist Conference, p. 1699–1702, 2000.
- [28] MOÇAMBIQUE, Nilton E. M. *Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão*

- terminal de Painéis Fotovoltaicos*. Dissertação de Mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. 2012.
- [29] HUA, C.; LIN, J. R. *Dsp-based controller application in battery storage of photovoltaic system*. *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on*, v. 3, p. 1705–1710, Aug. 1996.
- [30] HUSSEIN, K. H. et al. *Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions*. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, p. 59–64, 1995.
- [31] M. da S. G. Cláudio, *Interface de um Painel Solar à Rede Elétrica*, 2011.
- [32] IGOR, J. and SEGUEL, L. *Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital*, 2009.
- [33] LOPES, Nilton, C. L. *Implementação de um Sistema MPPT em Circuito Integrado CMOS*. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica e Computadores à Universidade do Minho. Out. 2013.
- [34] LUIZ, A. M. *Modelagem Computacional e Estudos sobre Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de um Sistema Fotovoltaico*. Dissertação (Departamento de Eletrotécnica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2006.
- [35] COSTA, Wagner, T. da C. *MODELAGEM, ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS E MÉTODO MPPT PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS*, Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica ao Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Out, 2010.
- [36] ESRAM, T. and CHAPMAN, P. L. *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*, *Energy*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [37] SALAS, V. et al. *The control strategies for photovoltaic regulators applied to standalone systems*. In *28th annual conference of the industrial electronics society, IEEE*, v. 78, n. 4, p. 3274-3279, 2002.
- [38] OLIVEIRA, L. G. M. *Estratégia de Controle de Carga e Descarga em Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares*. Dissertação apresentada para obtenção do título de Pós-Graduado em Energia à Universidade de São Paulo. 2005.

- [39] JAIN, S.; AGARWAL, V. *Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems*. IET Electric Power Applications, United Kingdom, v. 3, n. 3, p. 753-762, 2007.
- [40] TUNG, Y. M. *Evaluation of Micro Controller Based Maximum Power Point Tracking Methods Using dSPACE Platform, Simulation*, 2006.
- [41] MASOUM, M. A. S. DEHBONEI, H. and FUCHS, E. F. *Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic Systems With Voltage- and Current-Based Maximum Power-Point Tracking*, *Energy*, vol. 17, no. 4, pp. 514–522, 2002.
- [42] BALAKRISHNA, S. NABIL, A. RAJAMOCHAN, G. KENNETH, A. S. and LING, C. J. *The Study and Evaluation of Maximum Power Point Tracking Systems*, *Environment*, vol. 2006, no. Icee, 2006.
- [43] CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. *Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação*. *Eletrônica de Potência*, Florianópolis, v. 13, n. 3, p. 141-146, 2008.
- [44] GOW, J. A. and MANNING, C. D., *Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies*, *IEE Proc. on Electric Power Applications*, vol. 146, no. 2, p. 193-200, Mar. 1999.
- [45] CAVALCANTI, M. C. OLIVEIRA, K. C. AZEVEDO, G. M. S. and NEVES, F. A. S. *Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems*, *Brazilian Journal of Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 163-171, July 2007.
- [46] WALKER, G. *Evaluating MPPT Converter Topologies Using a MATLAB PV Model*, *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 49-56, 2001.
- [47] GRUNOW, P. LUST, S. SAUTER, D. et al., *Weak Light Performance and Annual Yields of PV Modules and Systems as a Result of the Basic Parameter Set of Industrial Solar Cells*, *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 2190-2193, 2004.
- [48] SANTOS, Cicero, A. dos. *Análise e projeto de um conversor NPC para interligação de sistemas de conversão de energia com a rede elétrica*. *Dissertação*

apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica à Universidade Federal do Ceará. 2011.

[49] FAIRCHILD, HGTG20N60B3D, disponível em:

<<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/HG/HGTG20N60B3D.pdf>>. Acesso em Out. 2015.

[50] TOSHIBA, TK40J60U, disponível em: <

<http://www.farnell.com/datasheets/1339276.pdf> >. Acesso em Out. 2015.

[51] GALLOTO, Luigi J. *Inversores Integrados Monofásicos Aplicados em Sistemas Fotovoltaicos com Conexão à Rede de Distribuição de Energia Elétrica*. Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2011.

