

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

Leandro Martins Fernandes

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE ELÉTRICA UTILIZANDO CONVERSOR
*BOOST.***

Timóteo

2017

Leandro Martins Fernandes

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE ELÉTRICA UTILIZANDO CONVERSOR
*BOOST.***

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Rodrigo Gaiba de Oliveira

Timóteo

2017

LEANDRO MARTINS FERNANDES

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE ELÉTRICA UTILIZANDO CONVERSOR
*boost.***

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Trabalho aprovado. Timóteo, 2017



Rodrigo Galba de Oliveira
CEFETMG



Elder de Oliveira Rodrigues
CEFETMG



Viviane Cota Silva
CEFETMG

Timóteo, 2017

Dedico a
José Celestino e Maria Imaculada.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais José Celestino Fernandes e Maria Imaculada Martins Fernandes pela paciência e por nunca terem deixado de me apoiar.

Agradeço também o meu orientador professor Rodrigo Gaiba de Oliveira pela orientação, apoio e paciência para tirar dúvidas e ajudar com todas as dificuldades encontradas no projeto.

*“Cada tempo precioso
Indo
Para algum lugar longe
Você vai aprender, e você vai amar
Perdoe o passado e você poderá se mover”.*
Rin Oikawa

Resumo

A energia elétrica é fundamental na vida do ser humano contemporâneo, porém sua demanda é algo que só vem a crescer, necessitando assim de uma ampliação da matriz energética. Os meios tradicionais de produção de energia como hidrelétricas e termoeletricas acabam gerando impactos ambientais e sociais, além de consumirem recursos finitos para produção de energia, gerando assim a necessidade de novas fontes e que sejam renováveis, que não gerem impacto ambiental e que seja baixo custo. A produção de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos surge como uma alternativa, visto que não produz poluentes. Os níveis de irradiação solar no Brasil são altos e apresentam baixa sazonalidade, gerando assim um alto potencial de produção por meio da energia solar. Através da resolução normativa 482/12 da ANEEL, qualquer consumidor pode ser um produtor de energia elétrica, desde que seja por meios renováveis, tais como energia solar, eólica e biomassa. Para que um consumidor possa ser também um produtor de energia, por meio de painéis fotovoltaicos, são indispensáveis os painéis fotovoltaicos, um conversor e um medidor bidirecional de energia elétrica, fornecido gratuitamente pela concessionária. Porém, o alto custo de um sistema fotovoltaico vem dificultando sua utilização em larga escala, tendo em vista que o preço dos painéis vem caindo ano após ano, e que seu custo já se encontra em um patamar de preço mais acessível. Entretanto, o conversor de potência passa a se tornar um elemento que inviabiliza financeiramente a adoção destes sistemas, uma vez que atualmente não existe fabricante nacional e seu custo de aquisição sofre com as variações cambiais. Diante deste cenário, este trabalho propõe a simulação de um conversor *boost* conectado à rede elétrica, a fim de estudar sua eficácia. O conversor *boost* é uma alternativa mais viável do que os conversores utilizados comercialmente atualmente, e sua implantação reduziria significativamente o custo de implantação de um sistema de geração fotovoltaico. Assim, foi utilizado o ambiente Matlab/Simulink como ferramenta de modelagem e simulação do sistema fotovoltaico, assim como, para obtenção dos resultados de simulação.

Palavras-chave: conversor *boost*, energia solar, painel fotovoltaico.

Abstract

Electric energy is fundamental in the life of the contemporary human being, but the demand is something that only grows, consequently needing an amplification of the energy matrix. Traditional means of power generation, such as hydroelectric and thermoelectric plants, end up creating environmental and social impacts, as well as consuming finite resources for energy production, thus generating the need for new sources that are renewable, do not generate environmental impact with low cost. The production of electricity through photovoltaic panels appears as an alternative, since it does not produce pollutants. The levels of solar radiation in Brazil are high and have low seasonality, generating a high production potential through solar energy. Through Normative Resolution 482/12 of ANEEL, any consumer can be an electric power producer, provided that it is by renewable means, such as solar, wind and biomass. In order for a consumer to be an energy producer, by means of photovoltaic energy production, a converter and a bidirectional meter of electricity are also indispensable, provided free of charge by the concessionaire. However, the high cost of a photovoltaic system has been making its use on a large scale difficult, given that the price of panels is falling year after year, and that its cost is already at a more affordable price level. However, the power converter becomes an element that makes the adoption of these systems financially impossible, as there is currently no domestic manufacturer and its cost of acquisition suffers from exchange rate variations. Given this scenario, this work proposes the simulation of a boost converter connected to the electric grid, in order to study its effectiveness. The boost converter is a more viable alternative than the commercially used converters, and its implementation would significantly reduce the cost of deploying a photovoltaic generation system. Thus, the Matlab / Simulink environment was used as a modeling and simulation tool for the photovoltaic system, as well as to obtain the simulation results.

Key words: boost converter, solar energy, photovoltaic panel

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema fotovoltaico conectado a rede	13
Figura 2 – Sazonalidade das taxas de irradiação	14
Figura 3 – Exemplo de um conversor	15
Figura 4 – Associação de células e módulo fotovoltaico	17
Figura 5 – Painéis fotovoltaicos de células monocristalinas	18
Figura 6 – Painéis fotovoltaicos de células policristalinas	18
Figura 7 – Painéis fotovoltaicos de células finas de filme	19
Figura 8 – Telhas adaptadas com painéis fotovoltaicos de células finas de filme	19
Figura 9 – Conversor buck	20
Figura 10 – Conversor <i>buck</i> com a chave em modo ligado	20
Figura 11 – Conversor <i>buck</i> com a chave em modo desligado	21
Figura 12 – Conversor <i>boost</i>	22
Figura 13 – Conversor <i>boost</i> com a chave ligada	22
Figura 14 – Conversor <i>boost</i> com a chave desligada	23
Figura 15 – Conversor <i>boost</i> com a chave religada	23
Figura 16 – Conversor pleno	24
Figura 17 – Circuito elétrico de um painel fotovoltaico	26
Figura 18 – Potência gerada fora do MPPT	27
Figura 19 – Sistema PV completo	29
Figura 20 – Rastreamento dos valores de I_{mp} e V_{mp}	30
Figura 21 – Rastreamento do ponto de máxima potência	30
Figura 22 – Modelagem do PV	31
Figura 23 – Modelagem do conversor <i>boost</i>	31
Figura 24 – Controle do conversor <i>boost</i>	32
Figura 25 – Gerador de pulsos PWM	32
Figura 26 – Saída da corrente e da tensão no sistema	37
Figura 27 – Forma da corrente gerada com frequência de 24kHz	38
Figura 28 – Forma da corrente gerada com frequência de 240kHz	39
Figura 29 – Tensão no barramento CC	40
Figura 30 – Tensão na entrada do conversor	41
Figura 31 – Corrente na saída do conversor	42
Figura 32 – Corrente na saída do conversor	43
Figura 33 – Curva de irradiação do dia 01 de janeiro de 2015	44
Figura 34 – Potência injetada na rede com irradiação variável	45
Figura 35 – Potência injetada na rede com irradiação constante	46

Lista de tabelas

Tabela 1 – Produção de energia elétrica no Brasil por tipo de produção (ANEEL, 2017a)	15
Tabela 2 – Número de chaves nos conversores	24

Lista de símbolos

PV	Painel fotovoltaico
I	Corrente gerada por um painel fotovoltaico
I_0	Corrente de saturação do diodo
I_{pv}	Fotocorrente
$I_{sc,n}$	Corrente de curto circuito no ponto de máxima potência
$I_{pv,n}$	Fotocorrente nominal
k	Constante de Boltzmann
K_V	Coefficiente de tensão/temperatura
K_I	Coefficiente de corrente/temperatura
$P_{max,m}$	Potência máxima gerada no ponto de máxima potência
$P_{max,e}$	Potência máxima gerada pelo sistema.
R_s	Resistência em série
R_p	Resistência em paralelo
$R_{p,min}$	Resistência mínima em paralelo
α	Constante de diodo igual a 1.3
q	Carga do elétron
T_n	Temperatura nominal da célula
N_s	Número de células
T	Temperatura
ΔT	Varição da temperatura
V_{oc}	Tensão máxima de operação do painel

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Problema	14
1.3	Justificativa	14
1.4	Objetivo geral	15
1.5	Objetivo específico	16
1.6	Resultados esperados	16
2	ESTADO DA ARTE	17
2.1	Painéis fotovoltaicos	17
2.1.1	Painel monocristalino	17
2.1.2	Painel policristalino	18
2.1.3	Células de filme fino	19
2.2	Conversores	20
2.2.1	Conversor <i>buck</i>	20
2.2.2	Conversor <i>boost</i>	21
2.2.3	Conversor pleno	24
2.3	Análise básica do custo dos conversores	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1	Ponto de máxima potência - MPPT	26
3.2	Definições das variáveis de um painel fotovoltaico	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Obtenção do MPPT	30
4.2	Modelagem do painel fotovoltaico	31
4.3	Modelagem do conversor <i>boost</i>	31
4.4	Código de inicialização do sistema PV	33
5	RESULTADOS	36
5.1	Relação Corrente X Tensão	36
5.2	Forma da corrente de saída do conversor	37
5.3	Tensão de saída do conversor <i>boost</i>	39
5.4	Tensão de entrada do conversor <i>boost</i>	40
5.5	Corrente de saída do conversor <i>boost</i>	41
5.6	Irradiação	43
5.7	Potência ativa produzida	44
6	CONCLUSÃO	47
6.1	Contribuições	47

6.2	Trabalhos futuros	47
6.2.1	Implementação de um sistema ligado a um conversor <i>boost</i> real	47
6.2.2	Desenvolvimento de um algoritmo de obtenção de ponto de máxima potência	47
	REFERÊNCIAS	48

1 Introdução

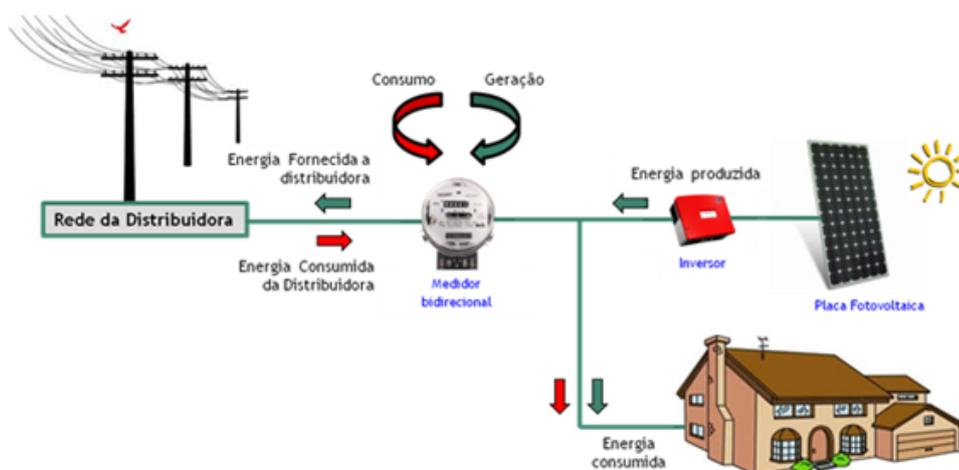
1.1 Contextualização

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução Normativa nº482/2012 (BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 17 de abril de 2012a) e de suas alterações feitas por meio da Resolução Normativa nº 687/2015 (BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 17 de abril de 2012b), determina as condições para microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, podendo ter instalações de até 5MW. Essas resoluções estabelecem as condições para que os consumidores possam instalar unidades geradoras de energia elétrica, desde que usem de fontes renováveis (solar, hidráulica, biomassa, eólica e cogeração qualificada). O consumidor tem a possibilidade de repassar seu excesso de produção para a distribuidora local, sendo ressarcido na forma de créditos que possuem validade de 60 meses, podendo ser utilizados por outras unidades, desde que estejam na mesma área de concessão.

O intuito dessas ações é promover a diversificação da Matriz Energética Brasileira, buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais.

Um sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica é constituído, basicamente, de painéis solares e um inversor de frequência, que realiza a função de produzir tensão alternada senoidal igual à tensão fornecida pela concessionária de energia. A figura 1 representa um sistema fotovoltaico convencional, onde podem ser visualizados os principais componentes.

Figura 1 – Sistema fotovoltaico conectado a rede



Fonte: Autor desconhecido

O governo brasileiro, por meio do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), tem o intuito de aumentar a base de produção por fontes renováveis através de investimentos e incentivos fiscais (BRASIL. Ministério de Minas e Ener-

gia, 17 de abril de 2015). Com isso, os consumidores podem utilizar os créditos ganhos pela produção de energia em mais de um imóvel, além de ser isento de pagar ICMS pelos créditos que produz, pagando ICMS apenas sobre o saldo de energia recebido pela distribuidora.

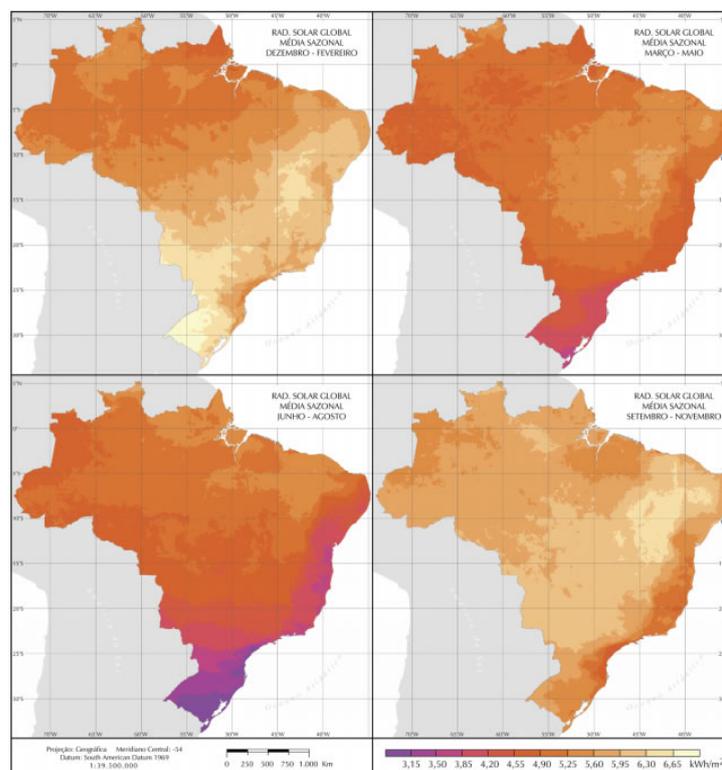
1.2 Problema

O alto custo dos componentes do sistema fotovoltaico é o principal empecilho em sua adoção. O conversor de potência é o componente de maior custo do sistema, tendo como agravante o fato de, atualmente, não existir fabricante nacional, sofrendo assim com taxas de importação e variações cambiais.

1.3 Justificativa

Desde a publicação da resolução normativa nº482/2012 (BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 17 de abril de 2012a) o governo brasileiro passou a criar incentivos para a microgeração e minigeração de energia por meio de fontes renováveis. Há de se destacar o gigantesco potencial de produção que as áreas urbanas brasileiras possuem devido ao alto índice de irradiação e baixa sazonalidade (PEREIRA et al., 2006). A figura 2 mostra as taxas de irradiação no Brasil durante o ano, o que possibilita um grande aproveitamento dos painéis fotovoltaicos.

Figura 2 – Sazonalidade das taxas de irradiação



Fonte: (PEREIRA et al., 2006)

Mesmo com o amplo potencial existente, este meio é pouco utilizado devido ao seu alto custo de implementação. O componente mais caro em um sistema fotovoltaico, para uso doméstico, é o conversor de potência, tendo como empecilho o fato de que os conversores comerciais do tipo *full-bridge* ainda não serem fabricados no Brasil, o que faz com que preço do produto sofra a influência de variações cambiais.

Figura 3 – Exemplo de um conversor



Inversor Fronius Primo 4.0-1
(4.000W)
03.506.004 [Mais informações](#)
ENVIO IMEDIATO

de: R\$40.600,00
por: R\$9.290,00
em até de 3X de R\$ 3.096,67 sem juros [ver todos](#)
à vista: R\$ 8.918,40 no Boleto (4% desconto)

COMPARAR PRODUTO

COMPRAR

Fonte: (NEOSOLAR, 2017)

1.4 Objetivo geral

Segundo dados do site da ANEEL, a energia produzida por painéis fotovoltaicos representa menos 0,1% da produção de energia elétrica brasileira (ANEEL, 2017b). Um aumento da utilização da energia proveniente da radiação solar traria além de um aumento da capacidade de produção, uma maior diversificação das fontes de energia da matriz elétrica brasileira, composta em sua maior parte de hidrelétricas. A tabela 1 apresenta os dados sobre a produção de energia elétrica no Brasil em 2017.

Tabela 1 – Produção de energia elétrica no Brasil por tipo de produção (ANEEL, 2017a)

Central Geradora Hidrelétrica	0.36%
Central Geradora Eólica	7.11%
Pequena Central Hidrelétrica	3.24%
Central Geradora Solar Fotovoltaica	0.09%
Usina Hidrelétrica	61.16%
Usina Termelétrica	26.74%
Usina Termonuclear	1.3%

O alto custo de implantação do sistema fotovoltaico é o grande motivo de sua baixa adoção. Este trabalho visa analisar a energia produzida por um conversor *boost*, fazendo uma análise básica do custo de seus componentes em relação a outros tipos de conversor, afim de obter uma solução com o custo de implantação menor, que possa viabilizar a utilização em larga escala.

1.5 Objetivo específico

Este trabalho tem como objetivo específico os seguintes itens:

- Fazer uma análise simplificada sobre o custo de produção dos três diferentes tipos de conversores de potência mais comumente empregados em sistemas de pequeno porte;
- Modelar e simular um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica utilizando um conversor *boost*;
- Analisar as principais variáveis (tensão, corrente e potência ativa) geradas pelo sistema.

1.6 Resultados esperados

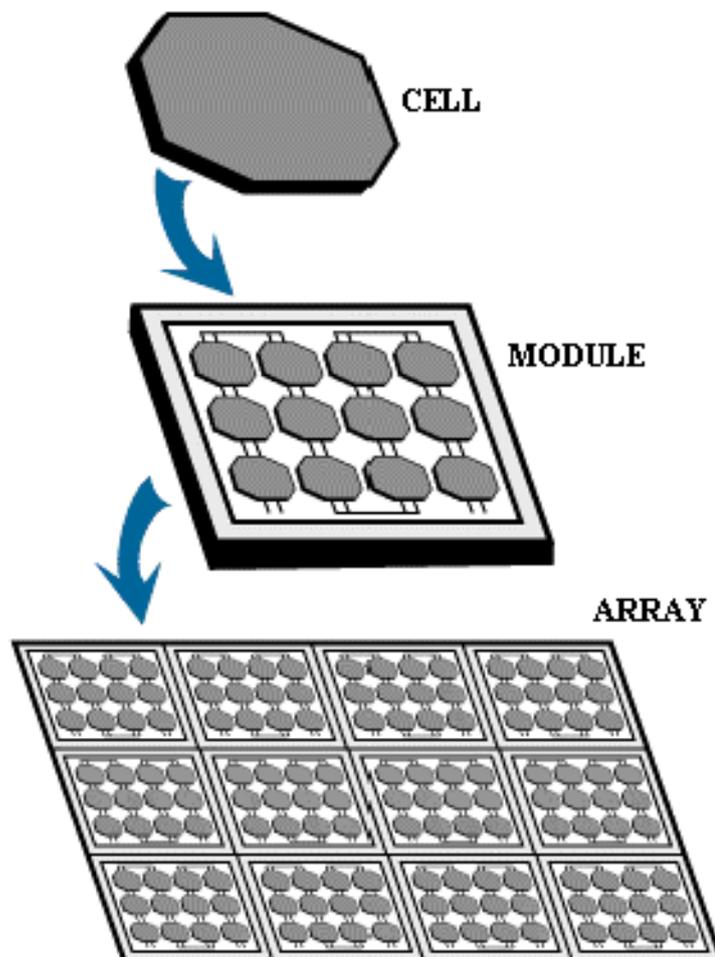
Espera-se que o desenvolvimento deste projeto possa levar a uma maior compreensão conceitual e tecnológica da produção de energia elétrica por painéis fotovoltaicos. O desenvolvimento de um conversor com tecnologia nacional, conseqüentemente com menor custo, é de grande importância para uma maior adoção deste meio de produção de energia elétrica.

2 Estado da Arte

2.1 Painéis fotovoltaicos

Um painel fotovoltaico é um conjunto organizado de células fotovoltaicas. Cada célula produz entre 1W e 2W, dependendo do tipo de material empregado em sua fabricação (SUMATHI; KUMAR; SUREKHA, 2015). As células são conectadas formando um módulo para assim produzir uma potência maior, e os módulos são associados para formar *array*. A figura 4 demonstra a associação das células fotovoltaicas em um painel.

Figura 4 – Associação de células e módulo fotovoltaico



Fonte: (SCIENCE, 2008)

2.1.1 Painel monocristalino

Os painéis fotovoltaicos monocristalinos são feitos a partir de um material com alto teor de pureza de silício, o que acarreta em sua coloração escura característica, como pode ser visto na figura 5. Segundo (POWER, 2017), este tipo de painel possui uma eficiência que

pode variar de 15% a 20%, dependendo do nível de pureza do silício das células. Painéis monocristalinos possuem custo mais elevado quando comparado aos painéis policristalinos (INFORMATIVE, 2015), além de terem a eficiência consideravelmente comprometida quando submetidos a altas temperaturas (ZAINI et al., 2015).

Figura 5 – Painéis fotovoltaicos de células monocristalinas



Fonte: (INFORMATIVE, 2015)

2.1.2 Painel policristalino

Os painéis de silício policristalino possuem menor grau de pureza e possuem um processo de fabricação mais simples e barato (INFORMATIVE, 2015). Sua eficiência varia entre 13% e 16%. As células policristalinas não sofrem uma queda de eficiência em função do aumento da temperatura, tão acentuada quanto ao observado nas células monocristalinas (FANNEY; DOUGHERTY; DAVIS, 2002). Sua coloração é mais clara que os painéis monocristalinos, tendendo para o azul, como mostrado na figura 6. Este tipo de painel é amplamente utilizado no mercado, devido principalmente ao menor custo e de que sua eficiência ser próxima ao do monocristalino.

Figura 6 – Painéis fotovoltaicos de células policristalinas



Fonte: (INFORMATIVE, 2015)

2.1.3 Células de filme fino

As células de filme fino são fabricadas a partir do depósito de múltiplas camadas de materiais fotovoltaicos, tais como: silício amorfo (a-Si), seleneto de cobre e índio de gálio (CIS/CIGS) e células fotovoltaicas orgânicas (OPC). Sua eficiência varia de 7% à 13%, dependendo do tipo de material empregado (INFORMATIVE, 2015). Este tipo de painel possui como característica principal sua maneabilidade, sendo muito empregado em uso doméstico, embora também seja utilizado em plantas de produção de energia elétrica. As figuras 7 e 8 mostram as aplicações deste tipo de painel em usinas de produção de energia elétrica e em telhas voltadas para a aplicação doméstica.

Figura 7 – Painéis fotovoltaicos de células finas de filme



Fonte: (INFORMATIVE, 2015)

Figura 8 – Telhas adaptadas com painéis fotovoltaicos de células finas de filme



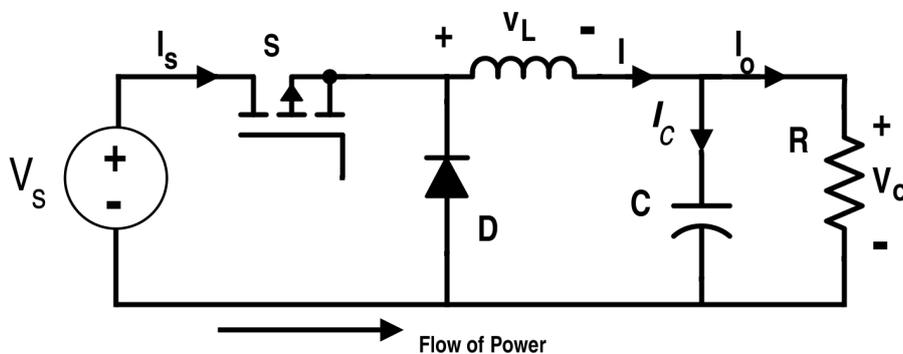
Fonte: (SENGE, 2015)

2.2 Conversores

2.2.1 Conversor *buck*

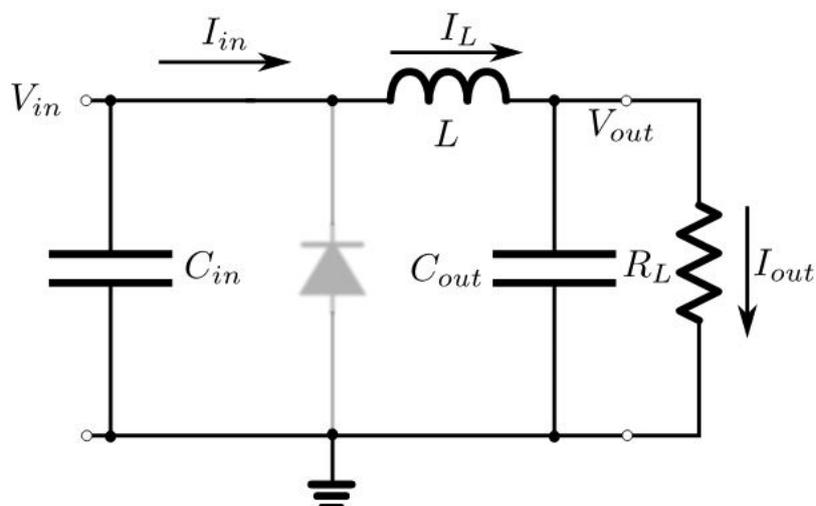
O conversor *buck* é um conversor CC-CC de potência que abaixa a tensão de entrada (COELHO et al., 2008), sendo que circuito elétrico pode ser visualizado na figura 9. O conversor *buck* possui apenas uma chave que opera em alta frequência, que quando ligada permite que a corrente passe pelo indutor, conforme apresentado na figura 10. Quando a chave está desligada não há fluxo de potência entre a fonte e a carga e o diodo é utilizado como caminho alternativo para a descarga da energia armazenada no indutor, conforme apresentado pela figura 11.

Figura 9 – Conversor buck

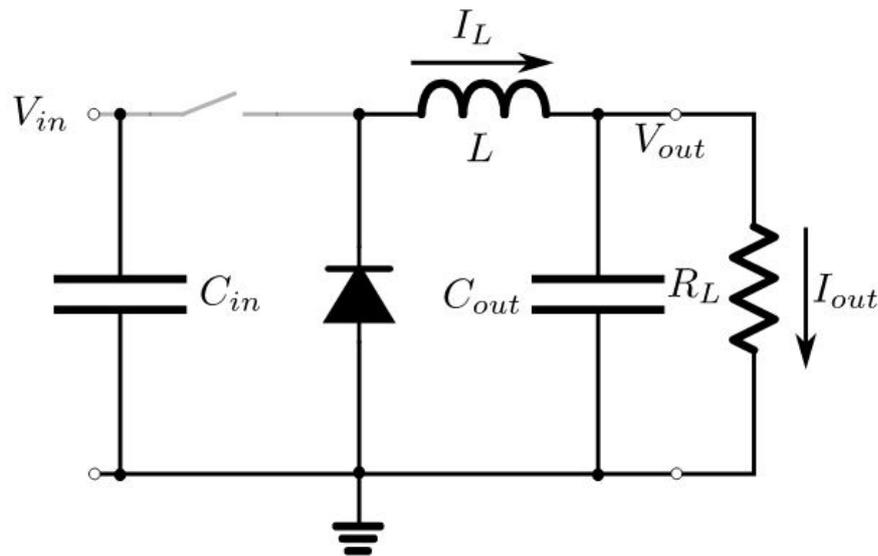


Fonte: (ALLABC, 2015)

Figura 10 – Conversor *buck* com a chave em modo ligado



Fonte: (PHD, 2017)

Figura 11 – Conversor *buck* com a chave em modo desligado

Fonte: (PHD, 2017)

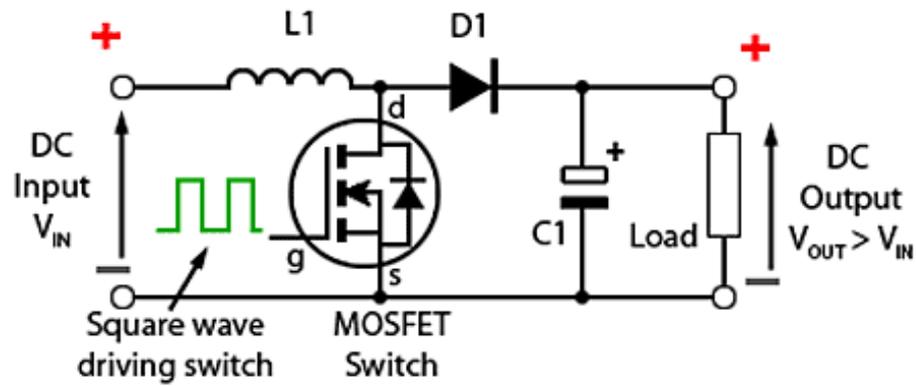
Por possuir poucos componentes o conversor *buck* é uma alternativa de menor custo (OLIVEIRA, 2016), porém a corrente gerada na saída do indutor não forma uma onda senoidal perfeita. Com isso o conversor buck acaba entregando uma energia de baixa qualidade a rede elétrica das distribuidoras.

2.2.2 Conversor *boost*

O conversor *boost* é um conversor CC-CC que eleva a tensão de entrada (COELHO et al., 2008). O conversor *boost* também possui apenas uma chave que opera em alta frequência, que ao estar ligada não permite que a corrente que passa pelo indutor chegue ao capacitor, como mostrado na figura 12. Assim seu funcionamento pode ser descrito em três passos, que podem ser observados através das figura 13, figura 14 e figura 15. Inicialmente o circuito é carregado com a chave no modo ligado, em seguida o chave é desligada e o capacitor passa a ser carregado, e por fim, a chave é novamente ligada e o capacitor descarrega a carga armazenada na saída do conversor.

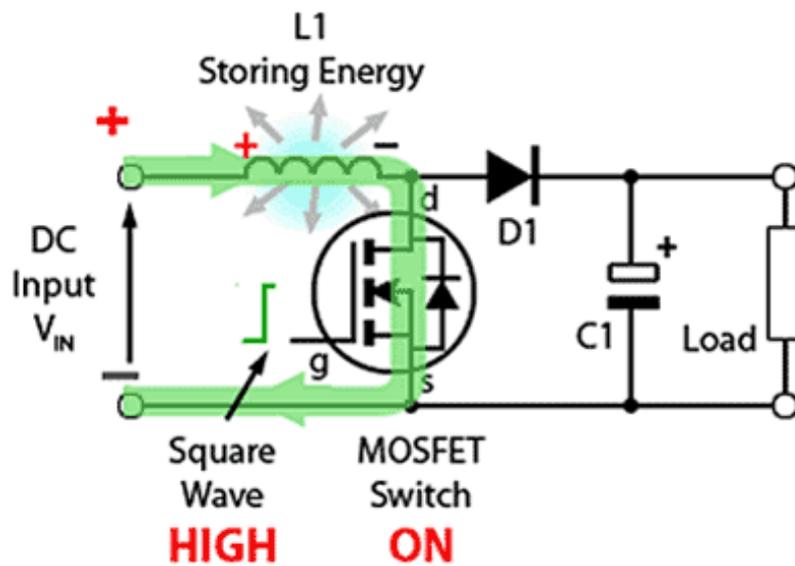
O conversor *boost* possui um custo de produção mais elevado do que o conversor *buck* devido ao fato de possuir um estágio a mais, porém entrega uma energia de melhor qualidade. Seu custo de produção pode ser considerado baixo se comparado aos conversores plenos utilizados comercialmente.

Figura 12 – Conversor *boost*



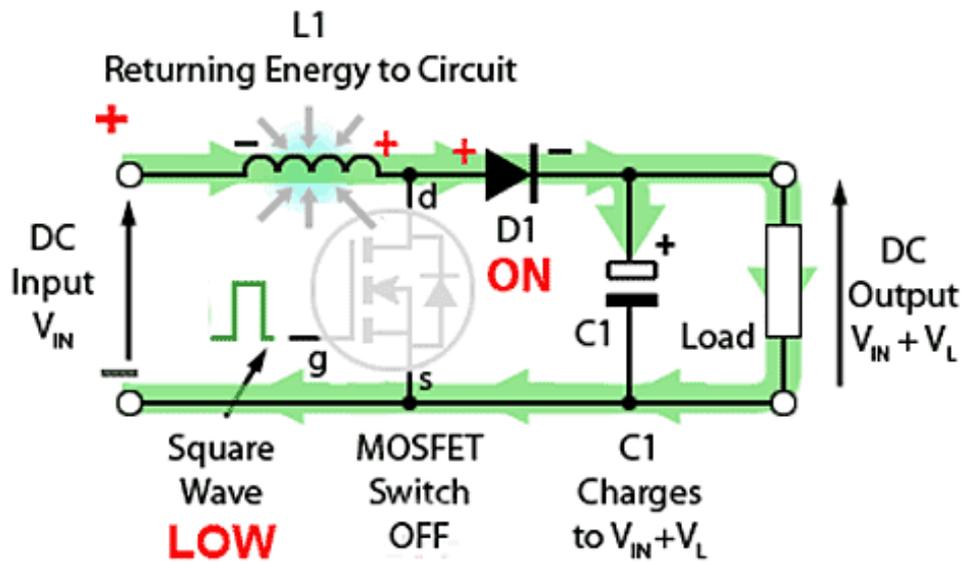
Fonte: (COATES, 2007)

Figura 13 – Conversor *boost* com a chave ligada



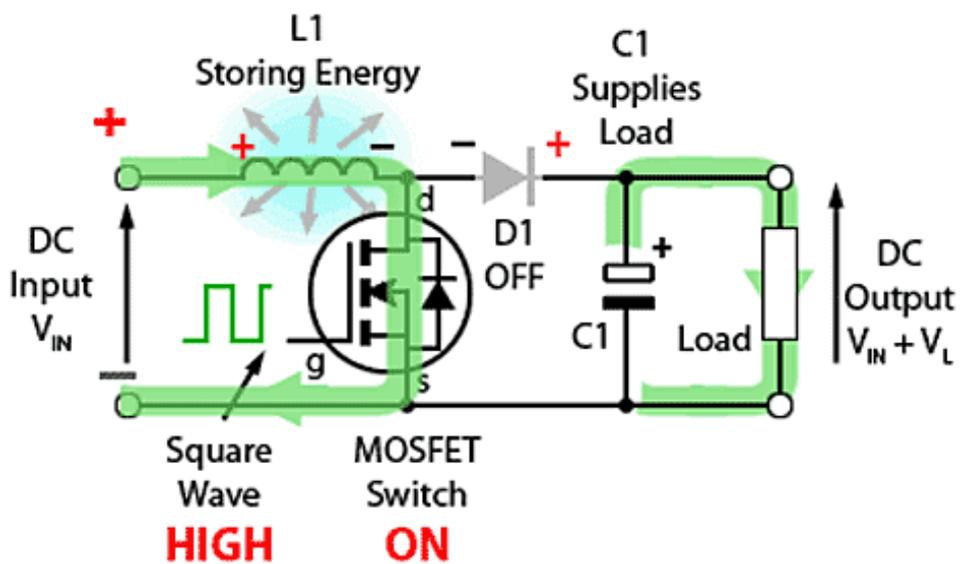
Fonte: (COATES, 2007)

Figura 14 – Conversor *boost* com a chave desligada



Fonte: (COATES, 2007)

Figura 15 – Conversor *boost* com a chave religada

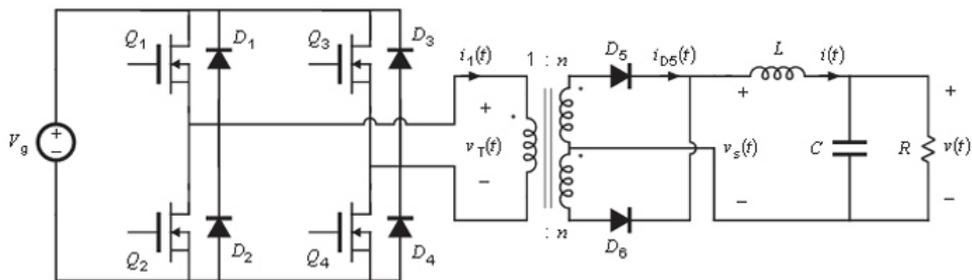


Fonte: (COATES, 2007)

2.2.3 Conversor pleno

Este conversor também é conhecido como "conversor *full-bridge*". É o tipo de conversor mais adotado atualmente, uma vez pelo mercado uma vez que consegue entregar uma energia de maior qualidade. Este conversor utiliza dois pares de chaves, conforme apresentado pela figura 16, para entregar uma onda senoidal simétrica (ERICKSON; CONVERTERS,). O maior número de componentes torna o conversor pleno mais caro que os demais tipos de conversores.

Figura 16 – Conversor pleno



Fonte: (ERICKSON; CONVERTERS,)

2.3 Análise básica do custo dos conversores

Conforme apresentado neste capítulo os componentes dos três tipos de conversores são praticamente idênticos, variando apenas o número de chaves no conversor e no inversor de corrente. Com isso, o número de chaves no sistema do conversor ligado a um inversor será determinante para o custo do sistema. A tabela 2 mostra o número de chaves presentes em cada tipo de conversor.

Tabela 2 – Número de chaves nos conversores

Conversor	Numero de chaves
<i>buck</i>	3
<i>boost</i>	5
pleno	8

A qualidade da energia produzida pelos conversores é fator determinante para sua adoção, visto que é preciso atender a padrões mínimos de qualidade estabelecidos pela ANEEL. Um maior número de chaves no conversor faz com que a corrente de saída tenha uma forma mais próxima do comportamento senoidal ideal.

O conversor *buck* possui custo baixo de produção, visto que só possui 3 chaves. Porém a energia entregue pelo conversor *buck* não atende aos parâmetros da ANEEL. Já conversor pleno consegue entregar energia com excelente nível de qualidade, sendo este tipo de conversor o único utilizado comercialmente até então. Porém, devido ao custo mais elevado de aquisição e ao fato de não existir fabricante nacional até o presente momento, os conversores

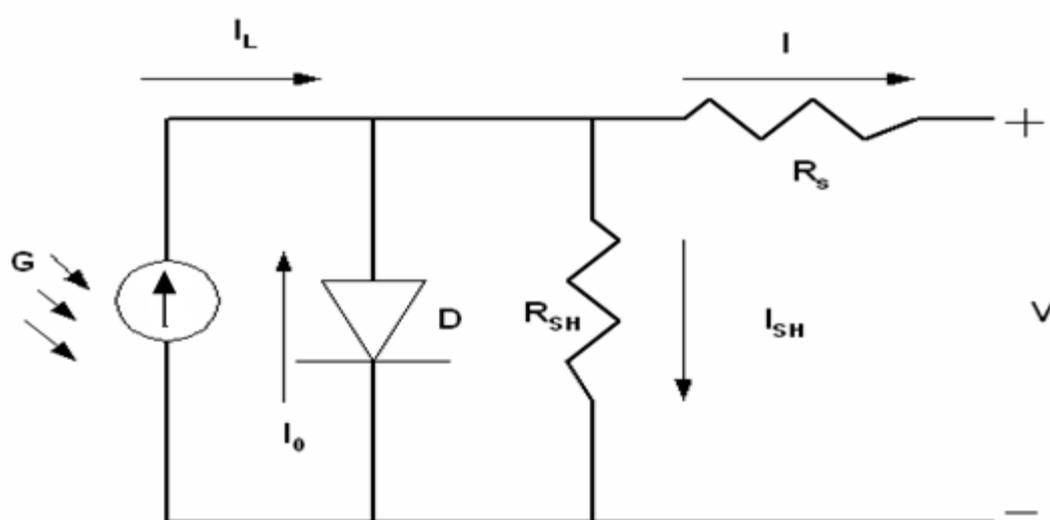
do tipo pleno estão sujeitos a taxas de importações e a variações cambiais, fazendo com que o sistema de produção de energia elétrica fotovoltaico fique inviável financeiramente.

Desta forma, este trabalho se propõe a realizar uma análise, em nível de simulação, uma análise da energia produzida pelo conversor *boost*. A proposta com um número maior de chaves no conversor *boost* e no inversor, em relação ao *buck*, faz com que a onda de corrente fique mais próxima do padrão senoidal ideal, assim como que o conversor *boost* seja uma solução intermediária, considerando custo e qualidade de energia.

3 Fundamentação Teórica

Um painel fotovoltaico pode ser representado através de um circuito simplificado como mostra a figura 17. O circuito elétrico do painel fotovoltaico é representado, basicamente por fonte de corrente, um diodo e as resistências que representam as perdas elétricas, devido a queda de tensão e a resistência interna do material (silício).

Figura 17 – Circuito elétrico de um painel fotovoltaico

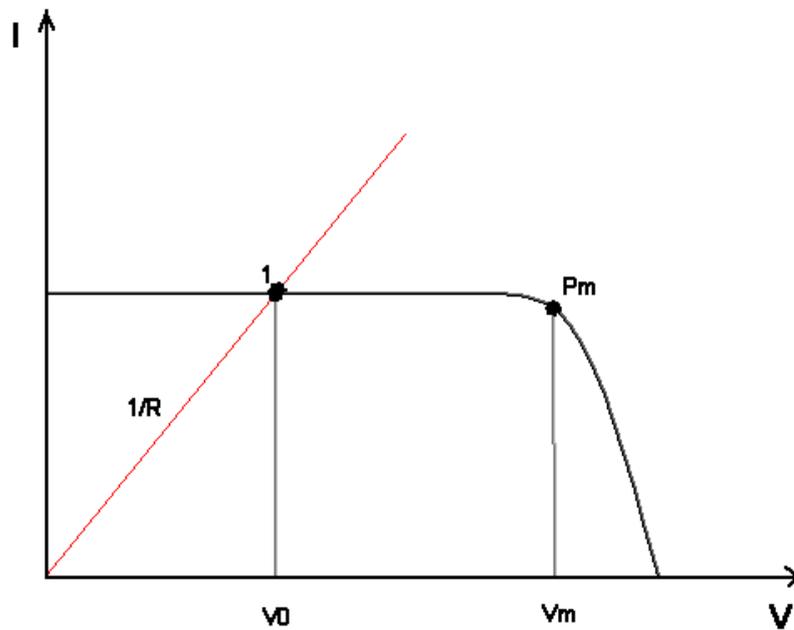


Fonte: (CHIN, 2012)

3.1 Ponto de máxima potência - MPPT

O ponto de máxima potência é o estado onde o produto $V \times I$ é máximo. Um exemplo muito simples é o de um sistema fotovoltaico ligado a baterias, como os painéis operam em sua maioria a 17V, e as baterias a 12V, a tensão de saída do painel deveria ser ajustada para 12V e caso a corrente também não seja ajustada, haverá um menor aproveitamento da energia produzida. Este exemplo é ilustrado através da figura 18.

Figura 18 – Potência gerada fora do MPPT



Fonte: (LAFEA, 1999)

3.2 Definições das variáveis de um painel fotovoltaico

Segundo (SUMATHI; KUMAR; SUREKHA, 2015), a corrente I gerada por um PV é dada pela equação 3.1:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_S I}{V_T \alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (3.1)$$

A corrente de saturação I_0 é inversamente proporcional a diferença entre temperatura de operação e temperatura ambiente Δ_T . A corrente de saturação do diodo é dada pela equação 3.2:

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + KI\Delta_T}{\exp \left(\frac{V_{oc,n} + KV\Delta_T}{\alpha V_T} \right) - 1} \quad (3.2)$$

A fotocorrente I_{pv} é a corrente gerada através do efeito fotoelétrico e é responsável pelo funcionamento do painel. Seu valor será proporcional à irradiação solar representada na figura 17 por G . A fotocorrente pode ser definida através da seguinte equação 3.3:

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + KI\Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad (3.3)$$

Para encontrar a relação entre a resistência do sistema PV em série (R_s) e a resistência em paralelo (R_p), basta fazer a relação de igualdade: $P_{max,m} = P_{max,e}$, sendo $P_{max,e}$ a potência máxima de operação do painel, e $P_{max,m}$ a potência gerada no ponto de máxima potência. Os valores de tensão e corrente no ponto de máxima potência V_{mp} e I_{mp} são obtidos através de um algoritmo de rastreamento de ponto de máxima potência.

$$P_{max,m} = V_{mp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{kT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{\alpha N_s} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_{mp}} \right\} = P_{max,e} \quad (3.4)$$

$$R_p = \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{\left\{ V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \exp \left[\frac{q}{kT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{\alpha N_s} \right] + V_{mp} I_0 - P_{max,e} \right\}} \quad (3.5)$$

A equação 3.5 determina que para cada valor de R_s existe um valor de R_p . Os valores de R_s e R_p deverão ser ajustados em um algoritmo para que assim se possa obter o ponto de máxima potência. Com esses valores pode-se encontrar o valor nominal da fotocorrente $I_{pv,n}$, através da equação 3.6:

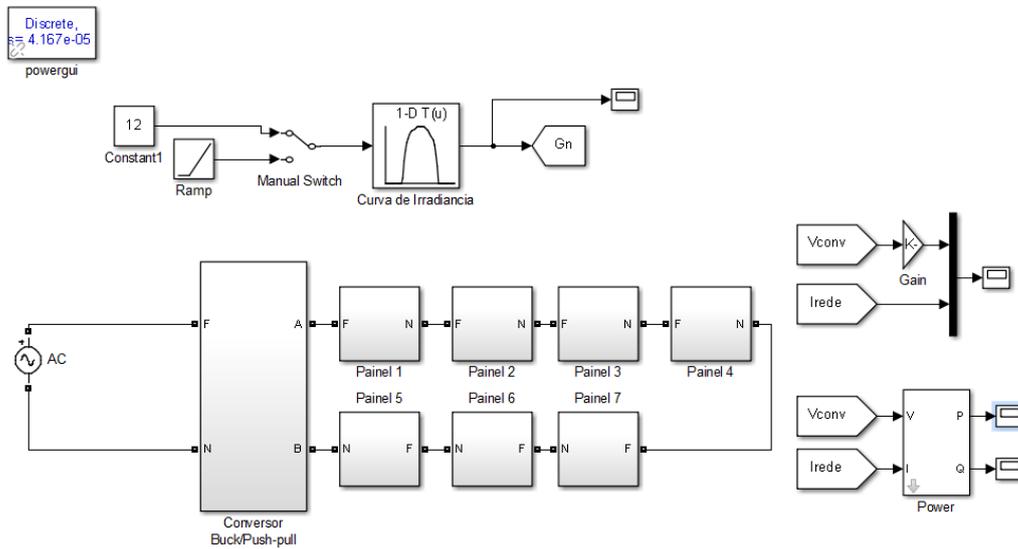
$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc,n} \quad (3.6)$$

4 Materiais e Métodos

Com base na fundamentação teórica apresentada, foi desenvolvida uma simulação com objetivo de obter uma potência gerada de 1000W, tendo como base a irradiação solar em Timóteo, no campus do CEFET-MG, no horário de 06:00 as 18:00 do dia 01/01/2015. Os dados foram obtidos através da ferramenta NDBR DATA VIEWER (NSRDB, 2017).

A potência desejada foi atingida utilizando-se 7 painéis de 150W de potência nominal, ligados em série, como mostra a figura 19.

Figura 19 – Sistema PV completo

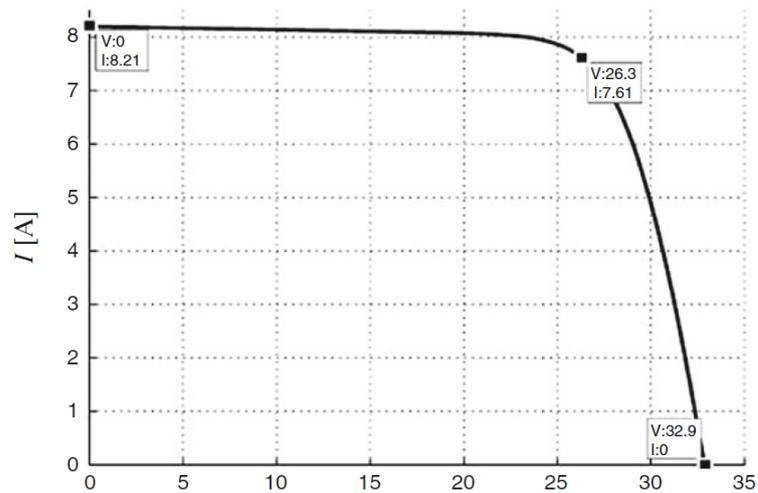


Fonte: Produzida pelo autor

4.1 Obtenção do MPPT

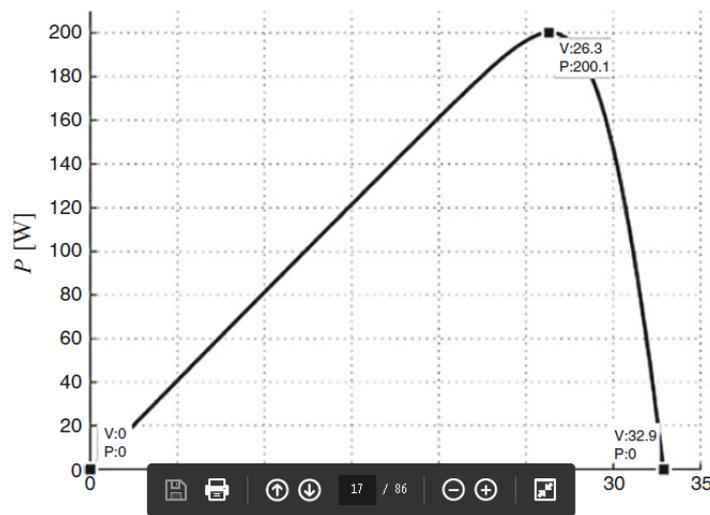
Para que se obter uma potência máxima no sistema, foi utilizado os mesmos valores rastreados por (SUMATHI; KUMAR; SUREKHA, 2015), sendo assim simuladas as características do painel KC200GT estudado pelo mesmo. A figura 20 e a figura 21 mostram o ponto de máxima potência do painel KC200GT.

Figura 20 – Rastreamento dos valores de I_{mp} e V_{mp}



Fonte: (SUMATHI; KUMAR; SUREKHA, 2015)

Figura 21 – Rastreamento do ponto de máxima potência

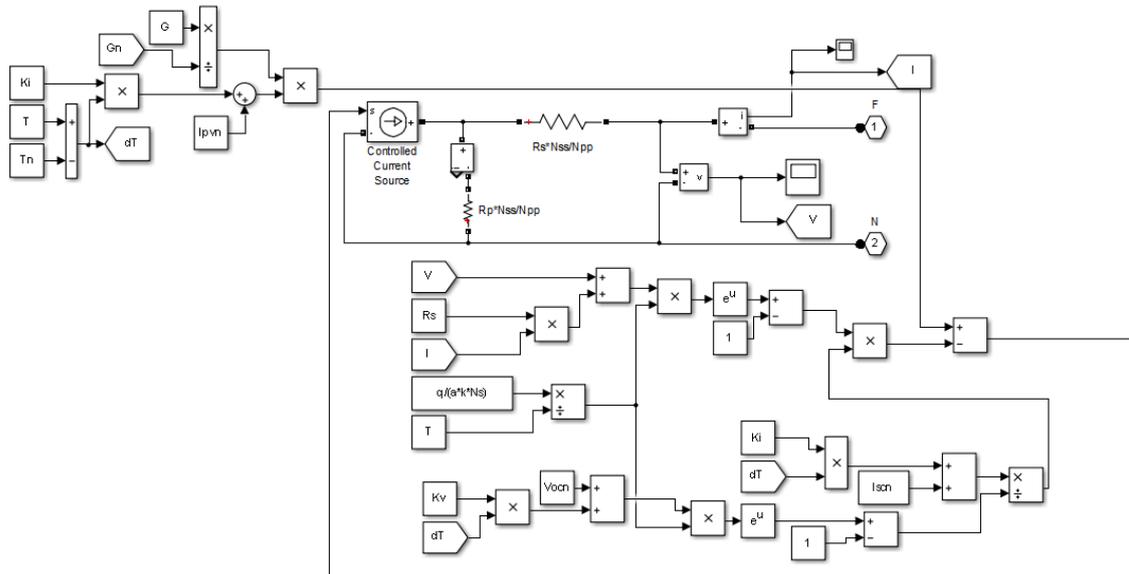


Fonte: (SUMATHI; KUMAR; SUREKHA, 2015)

4.2 Modelagem do painel fotovoltaico

Utilizando as equações matemáticas do sistema PV, foi desenvolvido sistema PV na ferramenta MATLAB SIMULINK um modelo de simulação, conforme apresentado na figura 22.

Figura 22 – Modelagem do PV

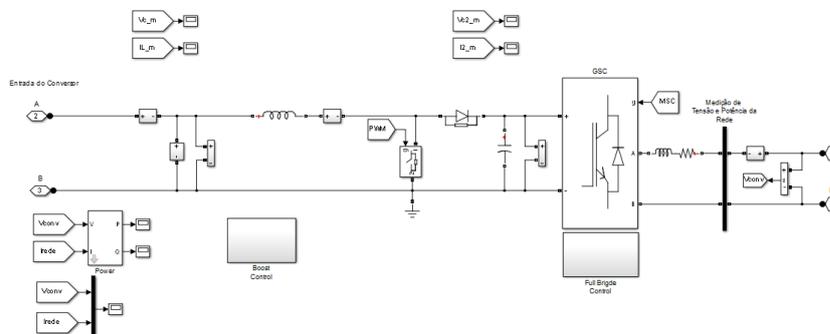


Fonte: Produzida pelo autor

4.3 Modelagem do conversor *boost*

A modelagem do conversor *boost* é representada pela figura 23, as figuras 24 e 25 representam a modelagem do controle do conversor e do gerador de pulsos PWM respectivamente.

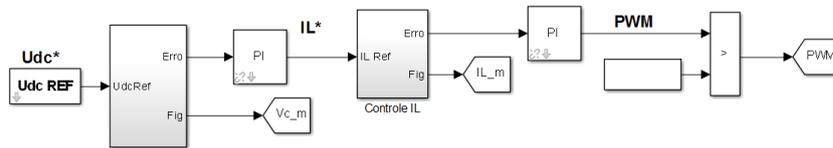
Figura 23 – Modelagem do conversor *boost*



Fonte: Produzida pelo autor

A estratégia de controle do conversor *boost* pode ser observada na figura 24, sendo a tensão de referência (U_{dcREF}) igual a 160V.

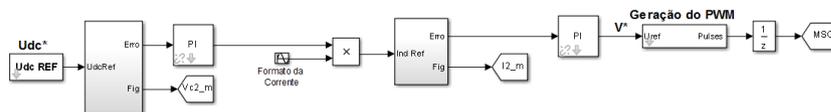
Figura 24 – Controle do conversor *boost*



Fonte: Produzida pelo autor

O Gerador de pulsos PWM será responsável pela forma senoidal da corrente na saída do conversor. A frequência de chaveamento será responsável por quanto a onda gerada se aproximará de uma senoide, sendo que quanto maior a frequência de chaveamento, mais a corrente de saída se aproximará de uma onda senoidal.

Figura 25 – Gerador de pulsos PWM



Fonte: Produzida pelo autor

4.4 Código de inicialização do sistema PV

A baixo o código de inicialização do sistema, utilizando como base as características do painel KC200GT:

```
1 clear ;
2 close all ;
3 clc ;
4
5
6 Vrede=127;
7 frede=60;
8 we=2*pi*frede ;
9
10 % Parâmetros de simulação
11 f_chaves=24e3;
12 Ts=1/f_chaves;
13 Atraso=(f_chaves/frede)/4;
14
15 % Corrente de saída do conversor
16 L = 0.48e-3;
17 Up_IL = 100;
18
19 w1=2400;
20 w2=240;
21
22 KP_IL = 10
23 KI_IL = 20
24
25 C_Udc = 5e-3;
26
27 KP_Vc = 0.01
28 KI_Vc = 200
29
30 Pe = 1000; % 250/350
31 % Tensão de entrada
32 Ve = 170 ;
33 % Corrente de entrada
34 Ie = 14 ;
35 V_Carga = 300; % 12/24/48
36 n = 0.95;
37 Fs = f_chaves;
38 dI_LEmax = 0.05 * Ie ;
39 dV_COmax = 0.01 * V_Carga;
```

```
40 D = 1 - (Ve / V_Carga)
41 P_Carga = n * Pe
42 I_Carga = P_Carga / V_Carga
43 R_Carga = V_Carga / I_Carga
44 Le = (Ve * D) / (Fs * dl_LEmax)
45 Co = I_Carga / (Fs * dV_COmax)
46
47 w1_In = 2*pi*1600;
48 w2_In = 2*pi*200;
49
50 Lf = 407e-5;
51 Rf = 0.1;
52
53 Kp_In = -(w1_In + w2_In)*Lf - Rf;
54 Ki_In = -(w1_In * w2_In)*Lf;
55
56 % Informaes do painel KC200GT
57 Iscn = 8.21;
58 Vocn = 32.9;
59 Imp = 7.61;
60 Vmp = 26.3;
61 Rmp=Vmp/Imp;
62 Pmax_e=Vmp*Imp;
63 Kv= -0.123;
64 Ki= 3.18e-3;
65 Ns= 36;
66 Np=1;
67
68 k=1.3806503e-23;
69 q=1.60217646e-19;
70 a=1.3;
71
72 Gn = 1000;
73 Tn = 25 + 273.15;
74
75
76 T=25+ 273.15;
77 G=1000;
78
79 Vtn = k*Tn/q;
80 Vt = k*T/q;
81
82 Ion= Iscn / (exp(Vocn/a/Ns/Vtn) - 1);
```

83 $I_o = I_{on}$;

84

85 $R_p = 415.405$;

86 $R_s = 0.221$;

87 $I_{pvn} = (R_s + R_p) / R_p * I_{scn}$;

88

89

90 $C_o = 4.5e-3$;

5 Resultados

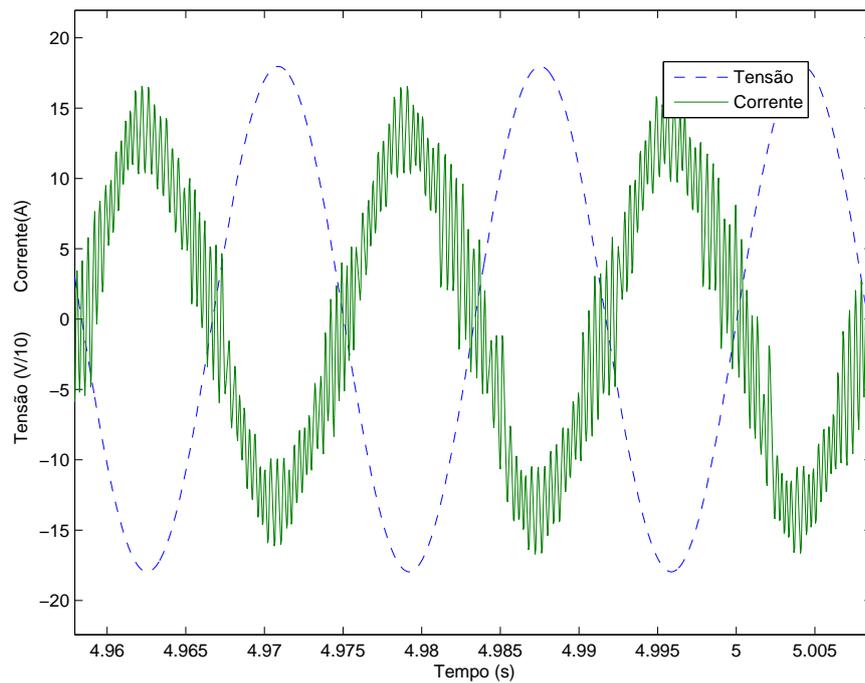
Os resultados gerados pela simulação do sistema PV conectados à rede de distribuição, com base no sistema descrito no capítulo 4, foram analisados em função das seguintes curvas:

- Relação Corrente X Tensão;
- Forma da corrente de saída do conversor;
- Tensão de saída no barramento CC;
- Tensão de saída no conversor;
- Corrente de saída no conversor;
- Potência gerada.

5.1 Relação Corrente X Tensão

Para que o sistema injete corrente na rede de distribuição é necessário que corrente e tensão estejam em defasagem de 180° em relação a outra. O valor negativo gerado pelo produto destas duas grandezas resultará em um valor de potência negativo, o que indica que a potência está sendo injetada na rede. A figura 26 mostra saída da tensão e da corrente na saída do conversor.

Figura 26 – Saída da corrente e da tensão no sistema



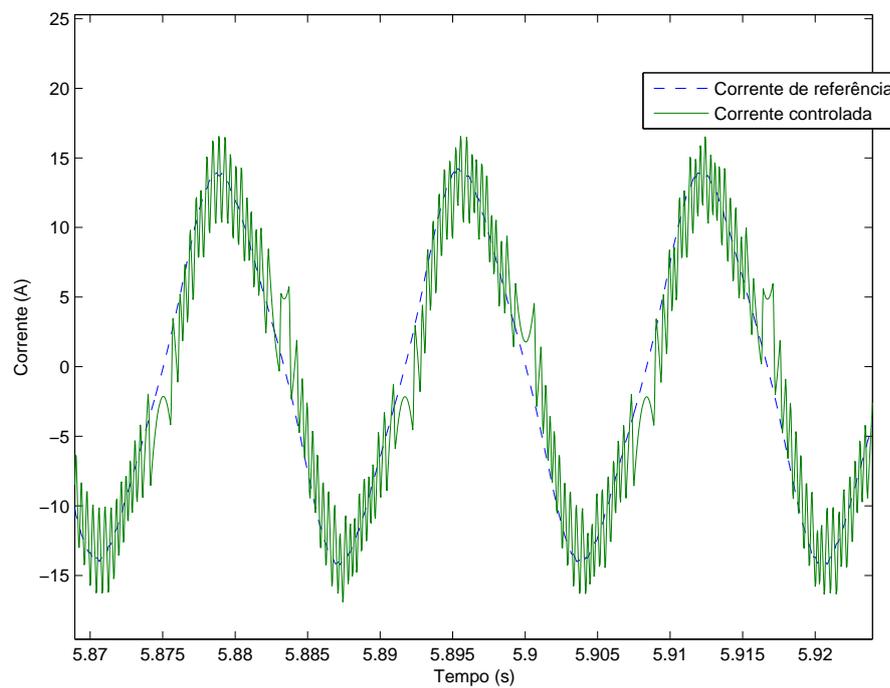
Fonte: Produzida pelo autor

5.2 Forma da corrente de saída do conversor

O controle da corrente na saída tenta manter a corrente próxima do valor de referência. Os valores da frequência de chaveamento do conversor determinam o quanto os valores da corrente se aproximam do valor desejado. Com a frequência de chaveamento igual a 24kHz se obteve a corrente apresentada na figura 27, onde podem ser observadas algumas pequenas

oscilações em torno do valor de referência.

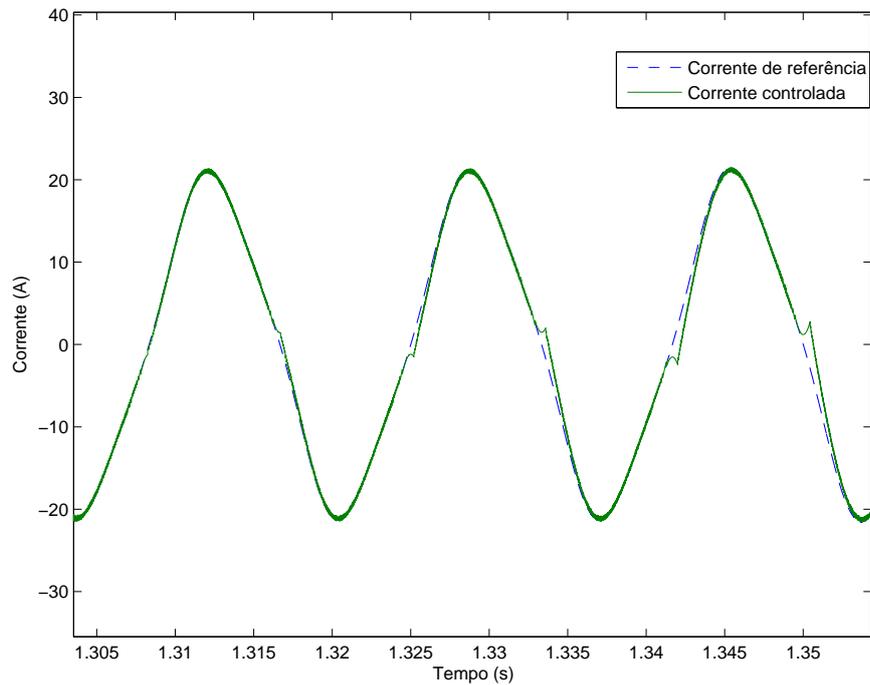
Figura 27 – Forma da corrente gerada com frequência de 24kHz



Fonte: Produzida pelo autor

A figura 28 representa o mesmo sistema simulado, porem com frequência de chaveamento igual 240kHz. É notável a diferença da aproximação entre as curvas, quando se aumenta a frequência de chaveamento, em função da redução de ruídos e oscilações.

Figura 28 – Forma da corrente gerada com frequência de 240kHz

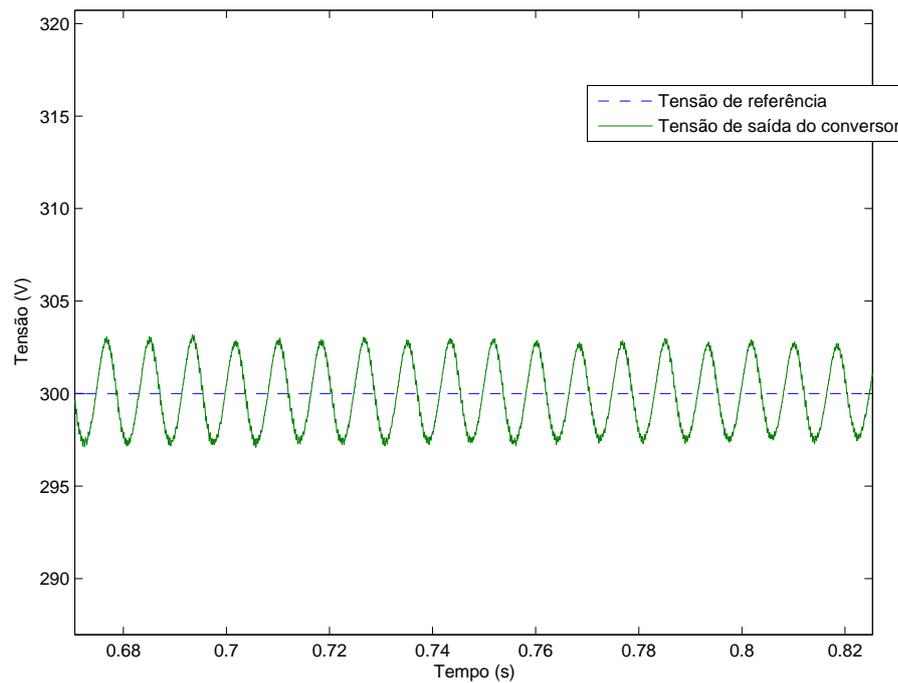


Fonte: Produzida pelo autor

5.3 Tensão de saída do conversor *boost*

A tensão de referência no barramento CC foi fixada em 300V, sendo que os valores medidos apresentaram pouca variação, se mantendo entre 299V e 301V, como pode ser vistos através da figura 29.

Figura 29 – Tensão no barramento CC

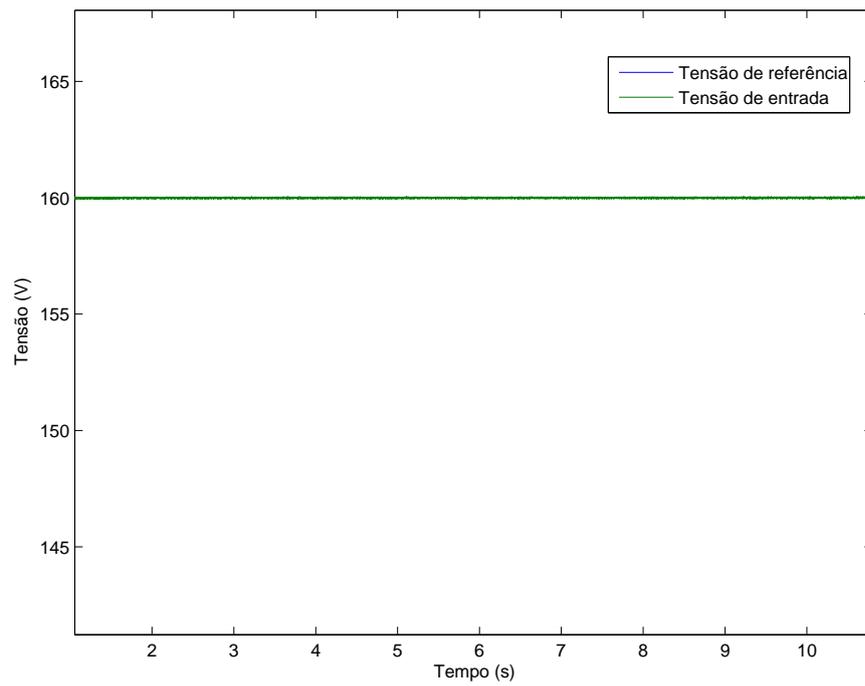


Fonte: Produzida pelo autor

5.4 Tensão de entrada do conversor *boost*

A referência de tensão de entrada foi fixada em 160V, valor mínimo desejável para funcionamento do conversor. Os valores medidos da tensão de entrada se mantiveram constantes durante toda a simulação, como pode ser visto na figura 30.

Figura 30 – Tensão na entrada do conversor

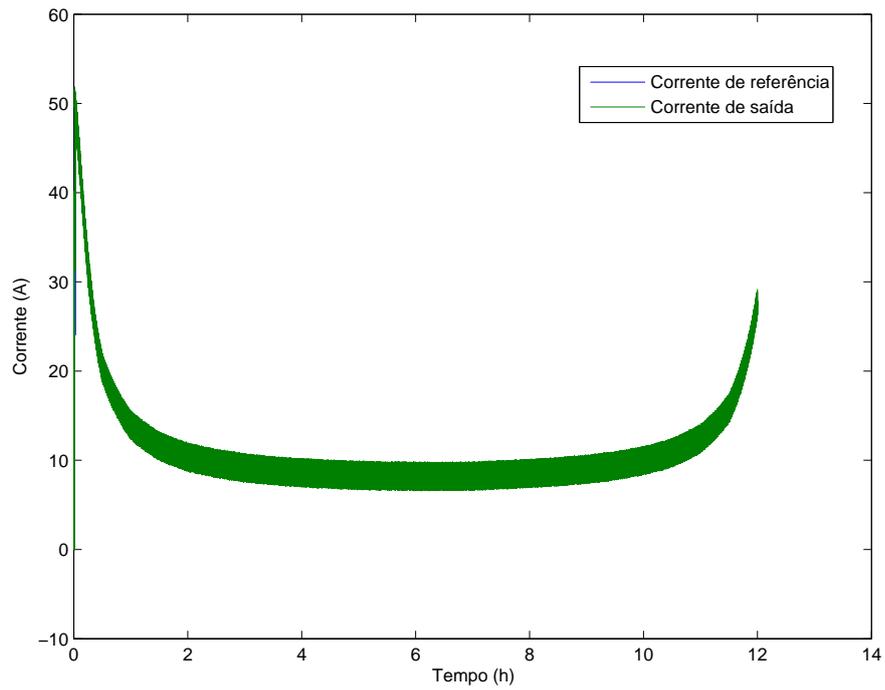


Fonte: Produzida pelo autor

5.5 Corrente de saída do conversor *boost*

A corrente produzida na saída do conversor *boost* é apresentada na figura 31.

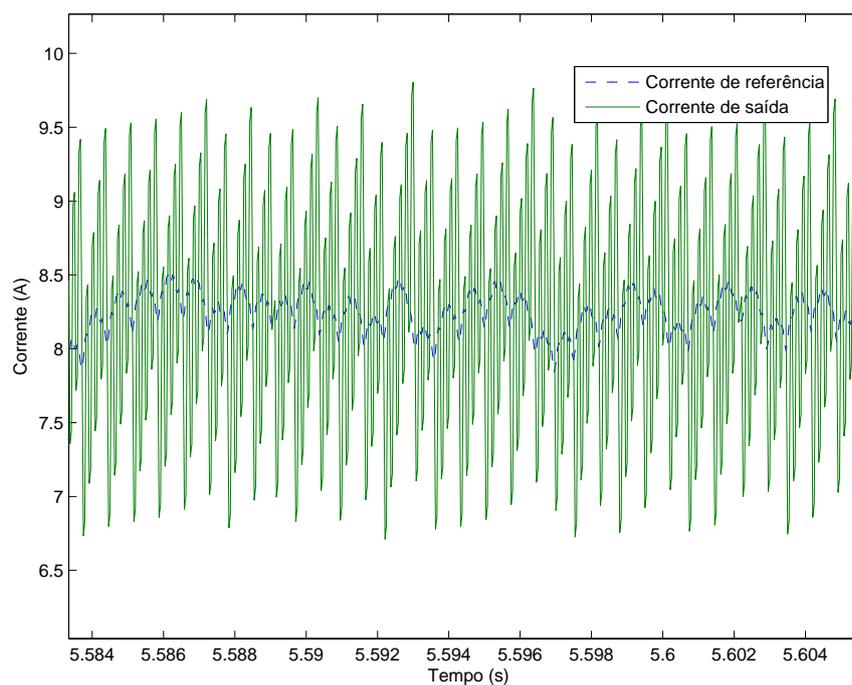
Figura 31 – Corrente na saída do conversor



Fonte: Produzida pelo autor

Pode se observar através da figura 32 que a corrente varia entre 7A e 9A, valores estes esperados devido a influência da frequência de chaveamento descrita anteriormente.

Figura 32 – Corrente na saída do conversor

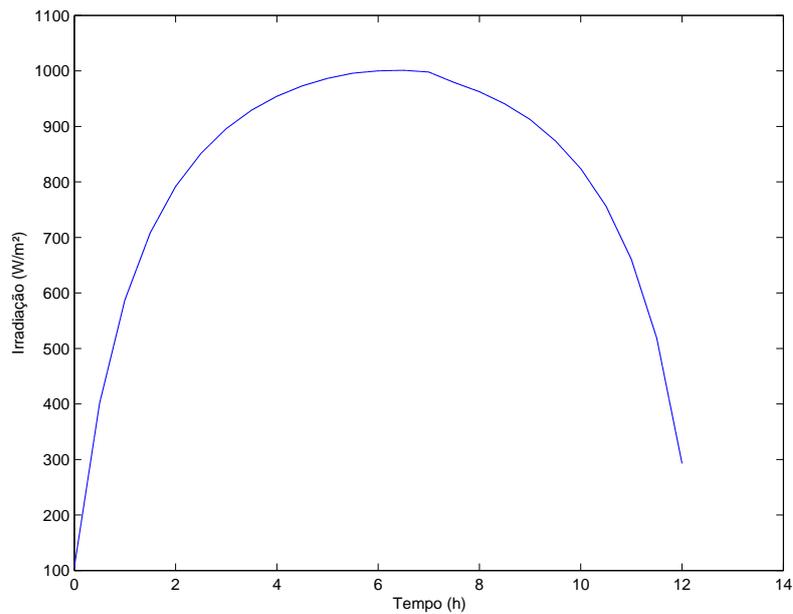


Fonte: Produzida pelo autor

5.6 Irradiação

Através dos dados obtidos através da ferramenta NDBR DATA VIEWER (NSRDB, 2017) foi possível obter os dados reais da irradiação solar no CEFET-MG Campus Timóteo e, com isso, criar uma simulação com dados de irradiação reais. A figura 33 apresenta os dados do horário das 06:00 às 18:00 do dia 01 de janeiro de 2015.

Figura 33 – Curva de irradiação do dia 01 de janeiro de 2015

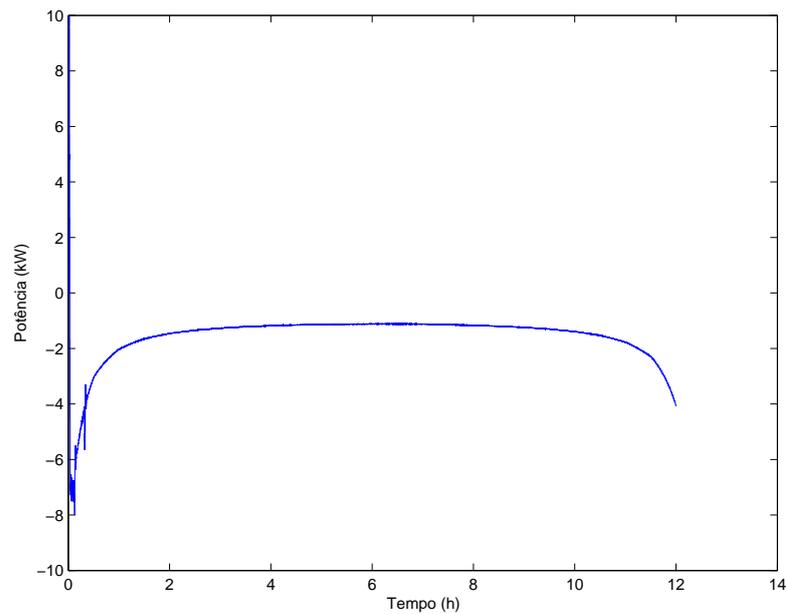


Fonte: Produzida pelo autor

5.7 Potência ativa produzida

O gráfico mostrado na figura 34 ilustra a potência produzida pelo sistema PV, de acordo com os dados de irradiação utilizados. Os valores negativos de potência ativa indicam que o sistema está fornecendo energia para a rede.

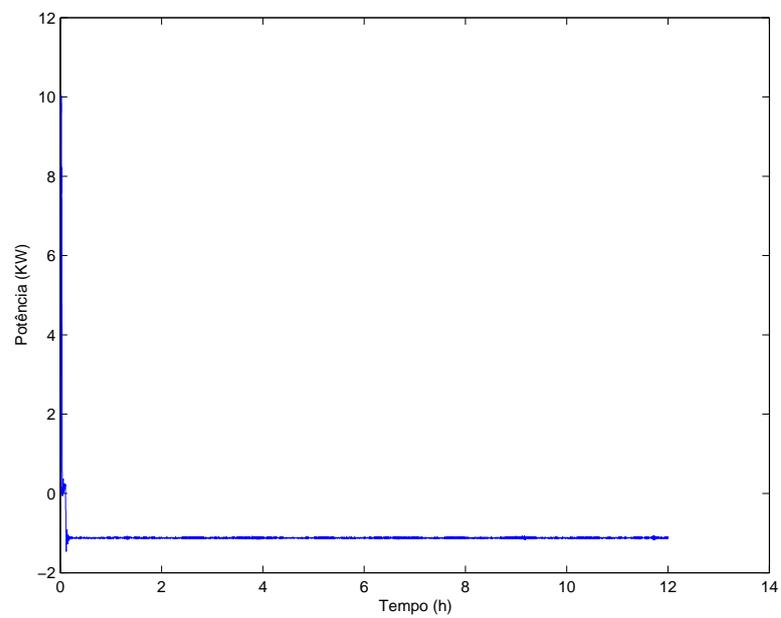
Figura 34 – Potência injetada na rede com irradiação variável



Fonte: Produzida pelo autor

A figura 35 ilustra uma situação onde a taxa de irradiação é constante durante todos os instantes de simulação, referente ao horário de 12:00.

Figura 35 – Potência injetada na rede com irradiação constante



Fonte: Produzida pelo autor

6 Conclusão

O nível de irradiação solar atrelado a baixa variação sazonal fazem com que o Brasil tenha uma ampla capacidade de produção de energia elétrica, por meio de painéis fotovoltaicos, porém sua adoção é proporcionalmente muito baixa no país. O conversor *boost* se mostrou uma solução interessante em comparação ao conversor pleno usado comercialmente, visto que possui um número menor de componentes e, conseqüentemente, um custo menor de produção. Este trabalho analisou, através de simulação computacional, o comportamento do conversor *boost* ligado à rede de distribuição, visando verificar a qualidade da energia fornecida para a rede.

Os resultados apresentados nas simulações mostraram que o conversor *boost* conseguiu entregar energia para a rede com um bom nível de qualidade, o que viabiliza, sua aplicação em sistemas domésticos. A corrente de saída do conversor possui um comportamento muito próximo do comportamento senoidal ideal da onda, sendo que valores altos para a frequência de chaveamento fizeram com que a onda da corrente de saída praticamente coincidissem com a onda ideal. Os valores de tensão no barramento CC de saída e entrada do conversor se mantiveram estáveis.

6.1 Contribuições

- Entendimento do funcionamento de um painel fotovoltaico
- Análise sobre a qualidade da energia produzida utilizando um conversor *boost*
- Análise sobre os níveis de irradiação no Brasil

6.2 Trabalhos futuros

6.2.1 Implementação de um sistema ligado a um conversor *boost* real

Os resultados demonstrados na seção 5 mostram que o conversor *boost* é uma alternativa, por conta do menor custo em relação aos conversores do tipo pleno. A prototipação de um conversor *boost* é algo complexo e que demanda de recursos financeiros, porém a análise de um protótipo funcional é essencial para que esse tipo de conversor tenha maior adoção.

6.2.2 Desenvolvimento de um algoritmo de obtenção de ponto de máxima potência

Um algoritmo de obtenção de ponto de máxima potência é algo necessário para que se possa extrair o máximo de energia de um sistema. Neste trabalho os parâmetros dos painéis foram ajustados com base em parâmetros que eram conhecidos, entretanto um algoritmo é necessário para que se possa obter o MPPT em qualquer ponto de operação.

Referências

- ALLABC, A. A. C. *Analysis of Four DC-DC Converters in Equilibrium*. 2015. Disponível em: <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>>. Citado na página 20.
- ANEEL, A. N. de energia elétrica. *Capacidade de Geração do Brasil*. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Citado nas páginas 9 e 15.
- ANEEL, A. N. de energia elétrica. *Capacidade de Geração do Brasil*. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Citado na página 15.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 482/2012*. Diretoria. Relator: NELSON JOSÉ HÜBNER MOREIRA. Brasília, 17 de abril de 2012. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, 17 de abr. 2012. Citado nas páginas 13 e 14.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 482/2012*. Diretoria. Relator: ROMEU DONIZETE RUFINO. Brasília, 17 de abril de 2012. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, 24 de nov. 2015. Citado na página 13.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *PORTARIA Nº 538 nº 538/2015*. Ministro. Relator: EDUARDO BRAGA. Brasília, 17 de abril de 2015. Portaria Nº 538, 15 de dez. 2015. Citado na página 14.
- CHIN, C. Model-based simulation of an intelligent microprocessor-based standalone solar tracking system. In: *MATLAB-A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications-Volume 3*. [S.l.]: InTech, 2012. Citado na página 26.
- COATES, E. *Boost Converters*. 2007. Disponível em: <<http://www.learnabout-electronics.org/PSU/psu32.php>>. Citado nas páginas 22 e 23.
- COELHO, R. F. et al. Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos. Florianópolis, SC, 2008. Citado nas páginas 20 e 21.
- ERICKSON, R. W.; CONVERTERS, D.-D. P. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering Department of Electrical and Computer Engineering University of Colorado Boulder*. [S.l.]: CO. Citado na página 24.
- FANNEY, A. H.; DOUGHERTY, B. P.; DAVIS, M. W. *Performance and characterization of building integrated photovoltaic panels*. 2002. 1493–1496 p. Citado na página 18.
- INFORMATIVE, E. *Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film*. 2015. Disponível em: <<http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>>. Citado nas páginas 18 e 19.
- LAFAR, L. de Fontes Alternativas de E. *Rastreador do Ponto de Máxima Potência (MPPT), o que é ?* 1999. Disponível em: <<http://www.solar.coppe.ufrj.br/MPPT/index.html>>. Citado na página 27.

- NEOSOLAR. *Inversor Fronius Primo*. 2017. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/inversor-fronius-primo-4-0-1-4000w.html>>. Citado na página 15.
- NSRDB, N. R. E. L. *NSRDB Data Viewer*. 2017. Disponível em: <<https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/>>. Citado nas páginas 29 e 43.
- OLIVEIRA, R. G. de. Desenvolvimento de tecnologia para conexão com a rede elétrica de aerogeradores de pequeno porte. Florianópolis, SC, 2016. Citado na página 21.
- PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. [S.l.]: INPE, 2006. v. 1. Citado na página 14.
- PHD, O. M. *Buck (step down) converter/regulator*. 2017. Disponível em: <<http://www.onmyphd.com/?p=voltage.regulators.buck.step.down.converter>>. Citado nas páginas 20 e 21.
- POWER, S. *Sun Power Resources*. 2017. Disponível em: <<https://us.sunpower.com>>. Citado na página 17.
- SCIENCE, N. *How do Photovoltaics Work?* 2008. Disponível em: <<https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells>>. Citado na página 17.
- SENGE, S. de Engenharia elétrica. *Telhas Fotovoltaicas*. 2015. Disponível em: <<https://sengeletrica.wordpress.com/2015/09/23/telhas-fotovoltaicas-e-solares/>>. Citado na página 19.
- SUMATHI, S.; KUMAR, L. A.; SUREKHA, P. *Solar PV and wind energy conversion systems: an introduction to theory, modeling with MATLAB/SIMULINK, and the role of soft computing techniques*. [S.l.]: Springer, 2015. Citado nas páginas 17, 27 e 30.
- ZAINI, N. et al. The effect of temperature on a mono-crystalline solar pv panel. In: IEEE. *Energy Conversion (CENCON), 2015 IEEE Conference on*. [S.l.], 2015. p. 249–253. Citado na página 18.