

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

Willian Rios

**Estudo dos Limites de Operação de Conversores CC-CC Aplicados
à Sistemas Fotovoltaicos Com o Uso de Dados Reais de Radiação
Solar**

**Alegrete
2015**

Willian Rios

**Estudo dos Limites de Operação de Conversores CC-CC Aplicados
à Sistemas Fotovoltaicos Com o Uso de Dados Reais de Radiação
Solar**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de **Bacharel em
Engenharia Elétrica**.

Orientador: Guilherme Sebastião da Silva

**Alegrete
2015**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

R586e Rios, Willian

Estudo dos Limites de Operação de Conversores CC-CC
Aplicados à Sistemas Fotovoltaicos Com o Uso de Dados Reais de
Radiação Solar / Willian Rios.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.

"Orientação: Guilherme Sebastião da Silva".

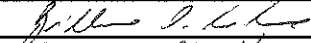

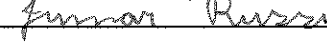
1. Painéis Solares Fotovoltaicos. 2. Avaliação da região de
operação de conversores CC-CC. 3. Rastreamento do Ponto de
Máxima Potência MPPT. I. Título.

Autoria: Willian Rios

Título: ESTUDO DOS LIMITES DE OPERAÇÃO DE CONVERSORES CC-CC APLICADOS A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM O USO DE DADOS REAIS DE RADIAÇÃO SOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

| | Nome | Titulação | Instituição | Assinatura |
|---|------------------------------|-----------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Guilherme Sebastião da Silva | Prof. Me. | unipampa |  |
| 2 | Felipe Bovolini Grigoletto | Prof. Dr. | unipampa |  |
| 3 | Jumar Luís Russi | Prof. Dr. | unipampa |  |

Data da aprovação: 16 de Janeiro de 2015.

Dedico este trabalho a minha família que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a minha família. Meus pais Jarba e Edaine e meus irmãos Vinícius e Matheus, pelo amor, paciência, motivação, apoio e incentivo, dedicados a mim durante todos estes anos, sobretudo nos momentos de maior decepção e desânimo. Vocês são a minha inspiração.

Agradeço ao município de Alegrete e a Universidade federal do Pampa (UNIPAMPA), por me acolherem tão bem e me propiciarem todas as ferramentas e meios para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço a todos os colegas que tive o prazer de conviver, pelas novas amizades que desenvolvi e pelo companheirismo e aprendizado a qual pude desfrutar.

A todos os professores que tive durante a vida acadêmica. Sem a experiência, paciência e, sobretudo, paixão pela profissão e paixão por partilharem o conhecimento adquirido, certamente este momento não seria possível.

Ao professor Me. Guilherme Sebastião da Silva, orientador deste trabalho, pela confiança depositada em mim e por toda a contribuição durante o desenvolvimento deste escopo.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, mesmo não citadas aqui, foram direta ou indiretamente responsáveis para que este momento fosse possível e, acima de tudo, por acreditarem em mim.

“Não importa o quanto você bate, mas sim o quanto consegue apanhar e continuar. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha”.

Rocky Balboa

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise dos limites de operação de três conversores CC-CC básicos, não isolados e de baixo custo a partir do uso de dados reais de radiação solar da região central do Rio Grande do Sul, obtidos através do projeto SONDA, do INPE. O objetivo é fazer uma análise das limitações dos conversores quando submetidos a parâmetros reais de radiação para que, futuramente, se possa fazer um estudo mais complexo acerca da possibilidade de implementação de um sistema de obtenção de energia solar fotovoltaica simples e de baixo custo. Para que o estudo obtivesse êxito, utilizou-se um circuito rastreador do ponto de máxima potência, baseado no método de perturbação e observação (P&O) para que o sistema se mantenha sempre no ponto de máxima potência à qual o painel fotovoltaico pode gerar. A escolha desse método se justifica pela sua simplicidade de implementação e pela sua confiabilidade. Os resultados foram obtidos a partir de simulações feitas no software PSIM, da Powersim, e estão expostos no decorrer do trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação solar; conversores CC-CC; energia solar fotovoltaica.

ABSTRACT

This completion of course work presents an analysis of the operating limits of three basic non-isolated and low cost DC-DC converters, from the use of real solar radiation data from the central region of Rio Grande do Sul, obtained through the SONDA project, from INPE. The objective is to make an analysis of the limitations of the converters when subjected to current radiation parameters so that in future, be able to make a more complex study on the possibility of implementing a simple obtaining photovoltaic solar energy and low cost system. For the study to obtain successful, if used a circuit crawler maximum power point, based on the method of perturbation and observation (P&O) for the system to always keep the maximum power point at which the photovoltaic panel can generate. The choice of this method is justified by its simplicity of implementation and for its reliability. The results were obtained from the simulations with the PSIM software, Powersim and are exposed in the course of work.

KEYWORDS: Solar radiation; DC-DC converters; photovoltaic solar energy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Processo de Obtenção de Energia a Partir do Efeito Fotovoltaico..... | 19 |
| Figura 2 – Densidade de Radiação Solar Fotovoltaica no Mundo..... | 20 |
| Figura 3 – Variação da Potência Gerada pelo Painel Fotovoltaico a Partir da Variação da Radiação..... | 20 |
| Figura 4 – Variação da Potência Gerada Pelo Painel fotovoltaico a Partir da Variação de Temperatura..... | 21 |
| Figura 5 – Dados Reais de Radiação Solar do Dia 16 de Fevereiro de 2014 | 23 |
| Figura 6 – Dados Reais de Radiação Solar do Dia 12 de Julho de 2014..... | 23 |
| Figura 7 – Circuito Elétrico Equivalente de Uma Célula Fotovoltaica..... | 24 |
| Figura 8 – Ligação Série-Paralelo de Módulos Fotovoltaicos | 25 |
| Figura 9 – Esquema de Um Painel Fotovoltaico | 25 |
| Figura 10 – Circuito Elétrico do Conversor <i>Buck</i> | 28 |
| Figura 11 – Ganho do Conversor <i>Buck</i> a Partir da Variação da Razão Cíclica..... | 29 |
| Figura 12 – Circuito Elétrico do Conversor <i>Boost</i> | 32 |
| Figura 13 – Ganho do Conversor <i>Boost</i> a Partir da Variação da Razão Cíclica | 32 |
| Figura 14 – Circuito Elétrico do Conversor Buck-Boost | 34 |
| Figura 15 – Ganho do Conversor <i>Buck-Boost</i> a Partir da Variação da Razão Cíclica | 34 |
| Figura 16 – Região de operação do Conversor <i>Buck</i> | 46 |
| Figura 17 – Circuito Simulado no Software PSIM | 47 |
| Figura 18 – Radiação Solar Simulada na Fonte Piecewise do Software PIM | 47 |
| Figura 19 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul)..... | 48 |
| Figura 20 – Variação da Razão Cíclica | 49 |
| Figura 21 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul) | 49 |
| Figura 22 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul) | 50 |
| Figura 23 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM | 51 |
| Figura 24 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul)..... | 51 |
| Figura 25 – Variação da Razão Cíclica | 52 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul) | 52 |
| Figura 27 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul) | 53 |
| Figura 28 – Região de operação do Conversor Boost | 56 |
| Figura 29 – Circuito Simulado no Software PSIM | 57 |
| Figura 30 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM | 58 |
| Figura 31 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul)..... | 58 |
| Figura 32 – Variação da Razão Cíclica | 59 |
| Figura 33 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul) | 59 |
| Figura 34 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul) | 60 |
| Figura 35 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM | 61 |
| Figura 36 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul)..... | 61 |
| Figura 37 – Variação da Razão Cíclica | 62 |
| Figura 38 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul) | 62 |
| Figura 39 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul) | 63 |
| Figura 40 – Região de operação do Conversor <i>Buck-Boost</i> | 67 |
| Figura 41 – Circuito Simulado no Software PSIM | 68 |
| Figura 42 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM | 68 |
| Figura 43 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul)..... | 69 |
| Figura 44 – Variação da Razão Cíclica | 69 |
| Figura 45 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul) | 70 |
| Figura 46 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul) | 70 |
| Figura 47 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM | 71 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 48 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul)..... | 71 |
| Figura 49 – Variação da Razão Cíclica | 72 |
| Figura 50 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul) | 72 |
| Figura 51 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul) | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Região de Operação dos Conversores | 36 |
| Tabela 2 – Comparação entre as técnicas de MPPT mais utilizadas | 41 |
| Tabela 3 – Especificações do painel fotovoltaico KD245GH-4FB | 42 |
| Tabela 4 – Especificação do projeto do conversor <i>Buck</i> | 42 |
| Tabela 5 – Componentes do conversor <i>Buck</i> | 44 |
| Tabela 6 – Especificação do projeto do conversor Boost | 54 |
| Tabela 7 – Componentes do conversor Boost | 55 |
| Tabela 8 – Especificação do projeto do conversor <i>Buck-Boost</i> | 64 |
| Tabela 9 – Componentes do conversor <i>Buck-Boost</i> | 66 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC-CC – Conversor de Corrente Contínua para Corrente Contínua

DDP – Diferença de Potencial

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MPPT – *Maximum Power Point Tracking* – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

P&O – Perturbação e Observação

PMP – Ponto de máxima Potência

SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 18 |
| 2.1 Introdução | 18 |
| 2.2 O Efeito Fotovoltaico | 18 |
| 2.2.1 Radiação | 19 |
| 2.2.2 Temperatura..... | 21 |
| 2.3 Radiação Solar Incidente na Região de Santa Maria..... | 22 |
| 2.3.1 Projeto Sonda..... | 22 |
| 2.3.2 Estação de São Martinho da Serra | 22 |
| 2.3.3 Radiação Direta Normal | 22 |
| 2.4 Painéis Fotovoltaicos | 24 |
| 2.4.1 Arranjos Fotovoltaicos | 24 |
| 2.5 Conclusão | 26 |
| 3 CONVERSORES ESTÁTICOS CC/CC NÃO ISOLADOS | 27 |
| 3.1 Introdução | 27 |
| 3.2 Conversor Buck ou Conversor Rebaixador | 27 |
| 3.2.1 Região de operação do conversor Buck..... | 29 |
| 3.3 Conversor Boost ou Conversor Elevador | 31 |
| 3.3.1 Região de operação do conversor Boost | 32 |
| 3.4 Conversor Buck-Boost ou Conversor Rebaixador/Elevador..... | 33 |
| 3.4.1 Região de operação do conversor Buck-Boost | 35 |
| 3.5 Conclusão | 36 |
| 4 TÉCNICAS DE MPPT (Maximum power point tracking) | 37 |
| 4.1 Introdução | 37 |
| 4.2 Método de Tensão Constante | 37 |
| 4.3 Método de Perturbação e Observação (P&O)..... | 38 |
| 4.4 Método de Condutância Incremental..... | 39 |
| 4.5 Conclusão | 41 |
| 5 PROJETO E RESULTADOS DE SIMULAÇÕES | 41 |
| 5.1 Conversor Buck..... | 41 |
| 5.1.1 Dimensionamento dos componentes | 42 |
| 5.1.2 Determinação da Região de Operação do Conversor Buck..... | 44 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.3 Simulações..... | 46 |
| 5.1.3.1 Verão..... | 46 |
| 5.1.3.2 Inverno | 50 |
| 5.2 Conversor Boost..... | 53 |
| 5.2.1 Projeto e Dimensionamento | 53 |
| 5.2.2 Determinação da região de Operação do Conversor Boost..... | 55 |
| 5.2.3 Simulações..... | 57 |
| 5.2.3.1 Verão..... | 57 |
| 5.2.3.2 Inverno | 60 |
| 5.3 Conversor Buck-Boost..... | 63 |
| 5.3.1 Projeto e Dimensionamento | 63 |
| 5.3.2 Determinação da região de Operação do Conversor Buck-Boost..... | 66 |
| 5.3.3 Simulações..... | 67 |
| 5.3.3.1 Verão..... | 68 |
| 5.3.3.2 Inverno | 71 |
| 5.4 Conclusão | 73 |
| 6 CONSIDERAÇÃO FINAIS..... | 75 |
| 6.1 Trabalhos Futuros | 75 |
| REFERÊNCIAS..... | 76 |

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a expansão da energia elétrica mundial tem ganhado índices alarmantes. No Brasil, pesquisas estimam que até o ano de 2021, o crescimento da demanda de energia elétrica será de 4,5% ao ano [1]. Aliado à este fator, o crescimento do uso de combustíveis fósseis para a obtenção de energia segue o mesmo ritmo. Ao considerar que os combustíveis fósseis exigem um demorado processo de recomposição, pode-se imaginar um cenário futuro onde a população mundial sofrerá uma escassez de energia.

Os resíduos causados pela queima de combustíveis fósseis agredem o meio ambiente e causam uma série de danos, entre eles o efeito estufa, que causa o aquecimento global, assunto que tem sido debatido incansavelmente no mundo. Governos de todo o planeta tem se comprometido a diminuir suas emissões de carbono à atmosfera a fim de desacelerar o processo do aquecimento global.

Atualmente, a comunidade científica mundial tem se empenhado cada vez mais em formas de criação e obtenção de energias cada vez mais limpas, ou seja, energias que não agredam demasiadamente o meio ambiente e que, ao mesmo tempo, possuam recursos inesgotáveis, à essas fontes de energia, dá-se o nome de energias renováveis.

Existem diversas formas de energias consideradas renováveis, entre elas se podem citar a energia eólica, obtida pela força do vento e a energia fotovoltaica, obtida através da luz solar.

As energias eólica e fotovoltaica são uma das fontes de energia renováveis que mais têm ganhado incentivos governamentais em pesquisa e desenvolvimento no mundo, principalmente na Europa. No Brasil, os financiamentos e as altas cargas tributárias ainda são um empecilho no desenvolvimento e difusão da energia solar [2], embora já existam incentivos para a geração residencial de energia elétrica a partir da energia solar, como o sistema de compensação de energia, que gera créditos de energia quando a geração é maior do que o consumo.

2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1 Introdução

Os sistemas fotovoltaicos vêm se desenvolvendo rapidamente ao longo dos últimos anos, alcançando o posto de uma das energias mais utilizadas no planeta, assim como a energia hidrelétrica e a energia eólica. De acordo com recentes pesquisas, a tendência é de que essa forma de obtenção de energia continue crescendo [3]. Com base nessas previsões, existe a necessidade de criação e desenvolvimento de painéis solares cada vez mais eficientes e rentáveis.

Esse capítulo apresenta uma abordagem acerca do efeito fotovoltaico e os principais parâmetros envolvidos no rendimento e eficiência de um painel fotovoltaico, bem como os dados de radiação obtidos do projeto SONDA e as possíveis associações entre módulos fotovoltaicos.

2.2 O Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico consiste, basicamente, no surgimento de uma tensão ou corrente elétrica em um material semicondutor, quando exposto a luz solar.

Atualmente, o semicondutor mais utilizado para a fabricação de células fotovoltaicas é o silício, podendo apresentar cristais de silício monocristalino, policristalino e silício amorfo.

O semicondutor em sua forma pura é chamado semicondutor intrínseco. Neste caso, o número de elétrons e lacunas é o mesmo. Para obter-se o semicondutor na forma extrínseca, são adicionadas impurezas ao semicondutor, a fim de que haja uma perturbação na sua formação cristalina. Esse processo é chamado de processo de dopagem.

Considerando que o silício possui 4 elétrons em sua última camada de valência, ele necessita de mais 4 elétrons para formar uma ligação. Se ao silício for adicionado um elemento com 3 elétrons na última camada, o semicondutor ficará positivamente carregado, formando um substrato do tipo P. Se adicionar ao silício um elemento contendo 5 elétrons em sua última camada, o semicondutor ficará negativamente carregado, formando um substrato do tipo N.

Ao se unir esses dois semicondutores dopados, na área de união, chamada de junção P-N ou camada de depleção, ocorrerá a migração de elétrons do substrato P para o substrato N e vice-versa. Esse processo ocasiona a formação de um campo elétrico, causando uma diferença de potencial (DDP) e, ao conectarem-se as extremidades em um caminho fechado, haverá a circulação de uma corrente elétrica [4] [5].

A figura 1 ilustra mais facilmente o processo de obtenção de energia.

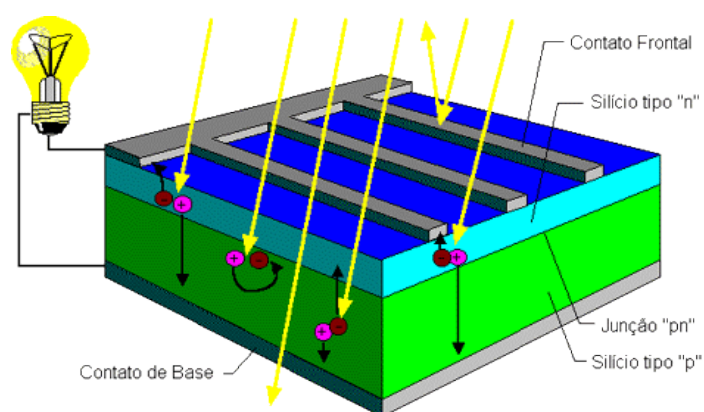


Figura 1 – Processo de Obtenção de Energia a Partir do Efeito Fotovoltaico.
Fonte: CRESESB

2.2.1 Radiação

A intensidade de radiação solar é um parâmetro que tem forte influência no rendimento e eficiência de uma célula fotovoltaica. Basicamente, é a quantidade de energia medida em uma determinada área. É comumente medida em watts por metro quadrado [W/m^2].

A radiação solar é o conjunto infinitesimal de células luminosas denominadas fótons, que carregam energia. Estas células luminosas, ao entrarem em contato com o material semiconductor presente na célula fotovoltaica produzem uma diferença de potencial (DDP) nos terminais de saída do painel [7].

A densidade de radiação presente fora da atmosfera é de $1367 W/m^2$, chamada de constante de radiação, mas a quantidade que o planeta terra recebe é de no máximo $1000 W/m^2$. Isto se deve a vários fatores que alteram a radiação incidente na terra, como por exemplo: gases presentes na atmosfera, índice de absorção e refração, dentre outros.

O território brasileiro é altamente propício para a geração fotovoltaica, pois apresenta um elevado índice de intensidade de radiação solar. Este fato se deve por sua localização ser próxima da linha do Equador, onde a radiação solar é maior [8].

As figuras 2 e 3 ilustram, respectivamente, a variação da densidade de radiação no planeta e a variação da potência gerada pelo painel fotovoltaico para várias densidades de radiação solar, representada por um gráfico de tensão x corrente. Nota-se que quanto maior o valor de radiação, maior é a potência gerada pelo painel, reduzindo significativamente ao ponto que a incidência de radiação solar também diminui.

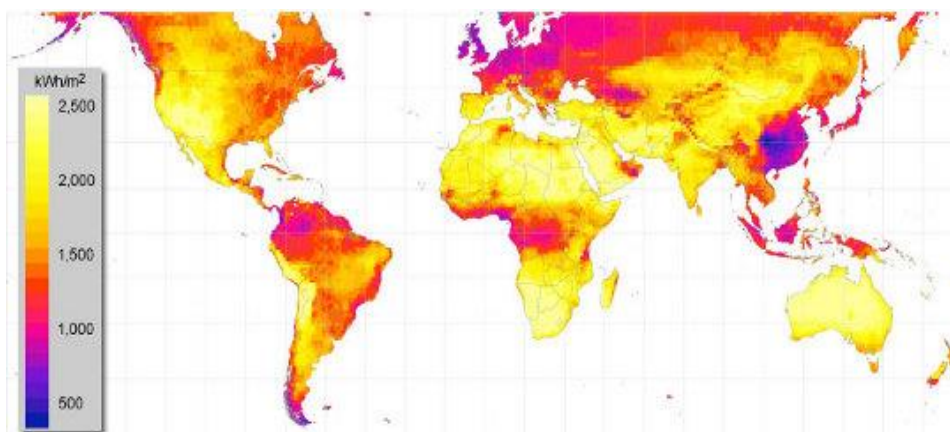


Figura 2 – Densidade de Radiação Solar Fotovoltaica no Mundo.

Fonte: Electrónica

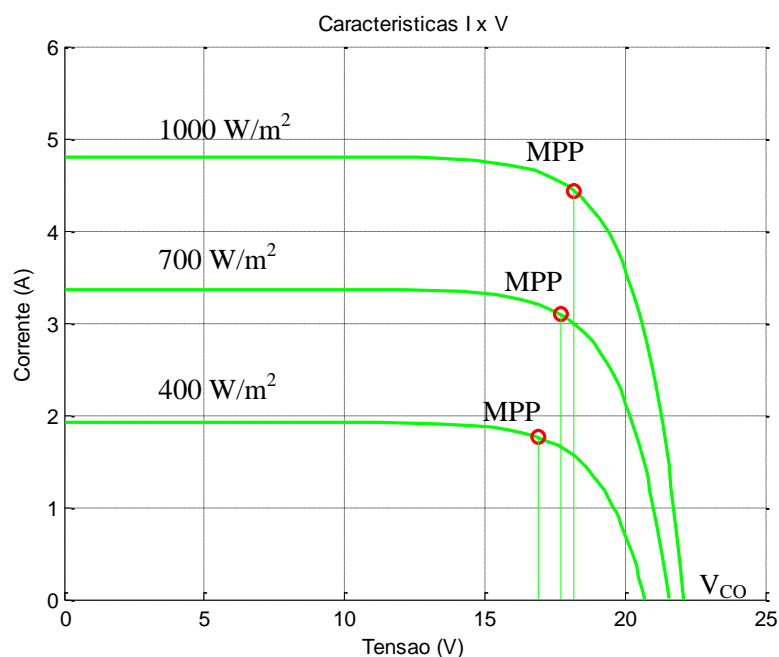


Figura 3 – Variação da Potência Gerada pelo Painel Fotovoltaico a Partir da Variação da Radiação.

2.2.2 Temperatura

Além de a célula fotovoltaica ter seu desempenho influenciado pela radiação solar, existem outros parâmetros que podem influenciar diretamente na eficiência da célula e, conseqüentemente, no seu desempenho. Um destes fatores é a temperatura.

A elevação da temperatura em células solares causa um leve aumento da corrente de curto-circuito I_{sc} , da ordem de 0,07% e uma redução da tensão de circuito aberto V_{oc} , em torno de 0,5% e na potência de saída do painel, além de alterar o ponto de máxima potência do mesmo [10].

Com base nesses parâmetros, constata-se que quanto menor for a temperatura da célula e do painel fotovoltaico, maior será a sua eficiência. Essa constatação pode ser vista na figura 4 abaixo, onde I_{sc} e V_{oc} variam conforme a temperatura aumenta ou diminui.

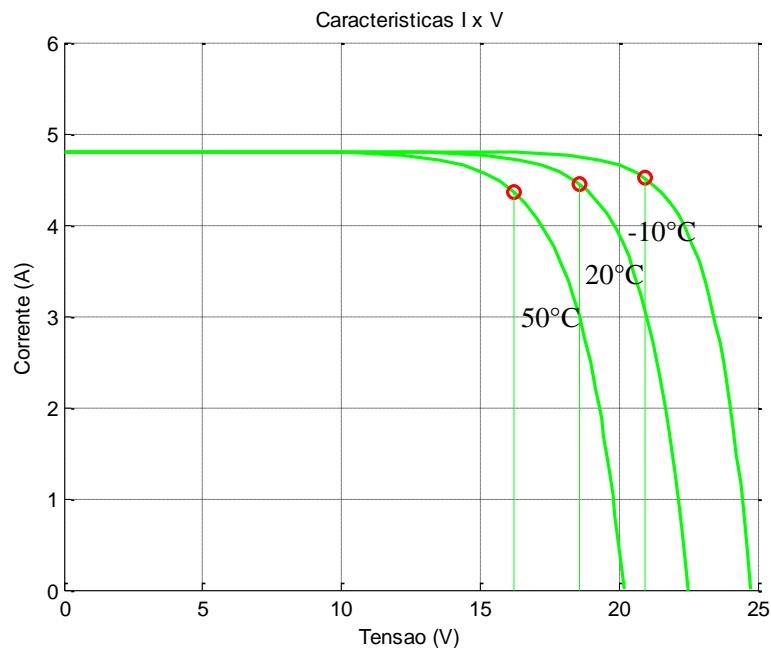


Figura 4 – Variação da Potência Gerada Pelo Painel fotovoltaico a Partir da Variação de Temperatura.

2.3 Radiação Solar Incidente na Região de Santa Maria

O município de Santa Maria está situado na porção central do estado do Rio grande do Sul, a aproximadamente 300 quilômetros da capital Porto Alegre e 25 quilômetros da cidade de São Martinho da Serra, cidade que possui uma estação anemométrica e solarimétrica do projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), sendo a única estação do projeto situada no estado.

A estação analisa e mede várias variáveis climáticas, dentre elas a radiação solar incidente, tema principal deste trabalho.

2.3.1 Projeto Sonda

O projeto Sonda nasceu de uma necessidade do país em um melhoramento da sua base de dados de superfície, necessárias ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica. Foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [11].

O principal objetivo do projeto Sonda é a formação de uma base de dados atualizada e confiável, necessárias à avaliação e acompanhamento dos recursos solares e eólicos no país, através da montagem de conjuntos de coletas de dados climáticos e meteorológicos em quatro regiões macro-climáticas distintas [11].

2.3.2 Estação de São Martinho da Serra

A estação de São Martinho da Serra está situada na porção centro-oeste do estado e possui uma base de dados de radiação solar direta da região, dados estes que foram utilizados no devido trabalho.

2.3.3 Radiação Direta Normal

Existem três tipos de radiações medidas: Radiação global horizontal, radiação direta normal e radiação difusa.

Este trabalho utilizou os dados de radiação direta normal, radiação proveniente diretamente do sol, sem sofrer desvios, como reflexão e refração.

Como o Rio Grande do Sul possui estações climáticas bem definidas, optou-se, para uma melhor análise, por dados de radiação solar de estações climáticas que possuem temperaturas extremas. Assim, foram analisados um dia da estação climática verão e um dia da estação climática inverno.

Os dados utilizados para representar a incidência real de radiação solar foram definidos em dois grupos: verão e inverno.

Para o verão foram utilizados dados do dia 16 de fevereiro de 2014. Os dados estão ilustrados na figura 5.

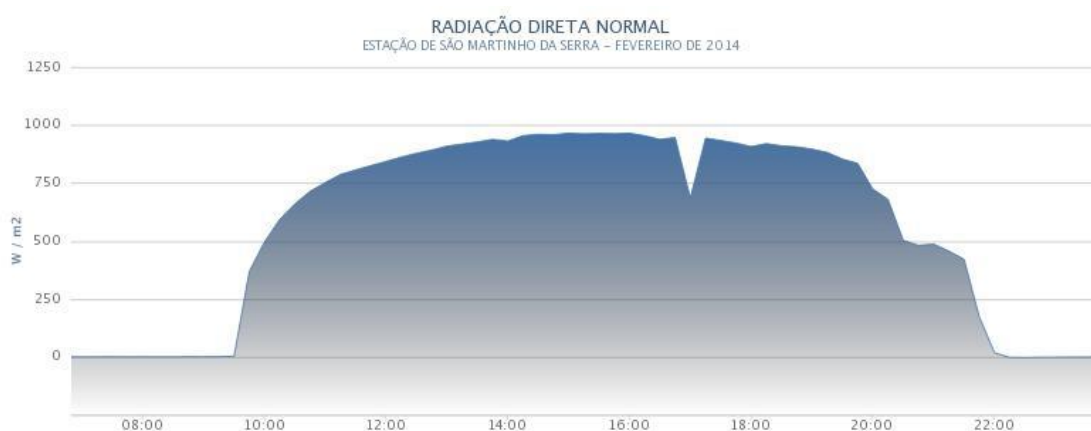


Figura 5 – Dados Reais de Radiação Solar do Dia 16 de Fevereiro de 2014.

Fonte: Projeto Sonda

Para a estação inverno, foram utilizados dados do dia 12 de julho de 2014. Os dados podem ser vistos na figura 6.

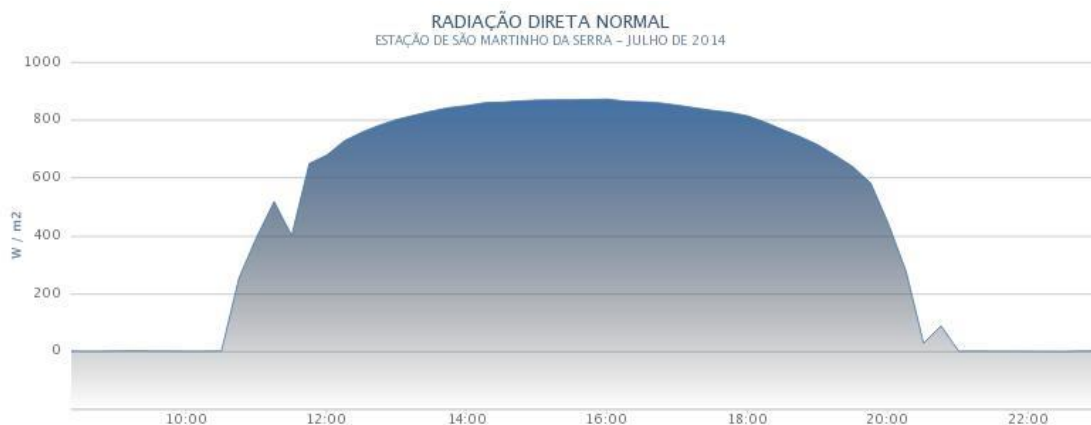


Figura 6 – Dados Reais de Radiação Solar do Dia 12 de Julho de 2014.

Fonte: Projeto Sonda

Os dados utilizados apresentam horários conforme o meridiano de Greenwich, ou seja, adiantados em três horas em relação ao horário oficial do Brasil (horário de Brasília). Como no horário de verão os relógios de algumas regiões, incluindo a região sul, são adiantados em uma hora, a diferença em relação ao meridiano de Greenwich cai para duas horas. Por isso os gráficos apresentam incidência inicial de radiação solar em torno de 10h30min (dez horas e 30 minutos) no inverno e 09h30min (nove horas e 30 minutos) no verão.

2.4 Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são constituídos através da conexão de inúmeras células fotovoltaicas.

A célula fotovoltaica é o principal elemento de um painel fotovoltaico. O seu circuito elétrico equivalente pode ser visualizado na figura 7. A corrente extraída do painel é representada pela fonte de corrente I_{pv} , já a corrente do diodo é representada por I_d . As resistências série e paralela são representadas, respectivamente, pelas simbologias R_s e R_p . Estas células geram uma tensão em torno de 0,6 V e potências de 1 a 3W. Para que essa tensão possa ser aumentada, as células são arranjadas em série e paralelo, formando módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, um painel fotovoltaico.

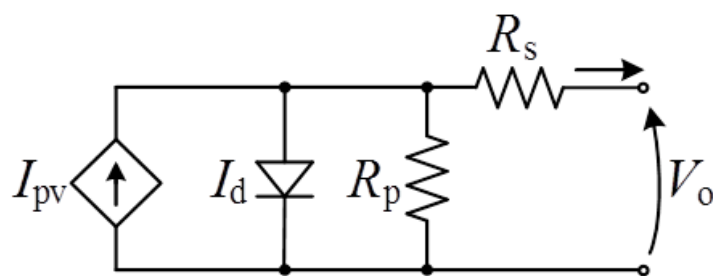


Figura 7 – Circuito Elétrico Equivalente de Uma Célula Fotovoltaica.

2.4.1 Arranjos Fotovoltaicos

Para se obter valores significativos de tensão e corrente, necessita-se de conexões ou arranjos entre os vários módulos fotovoltaicos, a fim de que a tensão e corrente de saída do painel fotovoltaico correspondam a valores próximos da necessidade da carga [12].

Para o aumento da tensão, devem-se conectar os módulos fotovoltaicos em série. Do mesmo modo, para a elevação da corrente elétrica, devem-se conectar os módulos fotovoltaicos em paralelo [12].

As figuras 8 e 9 ilustram, respectivamente, um exemplo de conexão série-paralelo dos módulos fotovoltaicos, e um painel fotovoltaico, com as suas conexões entre células e módulos.

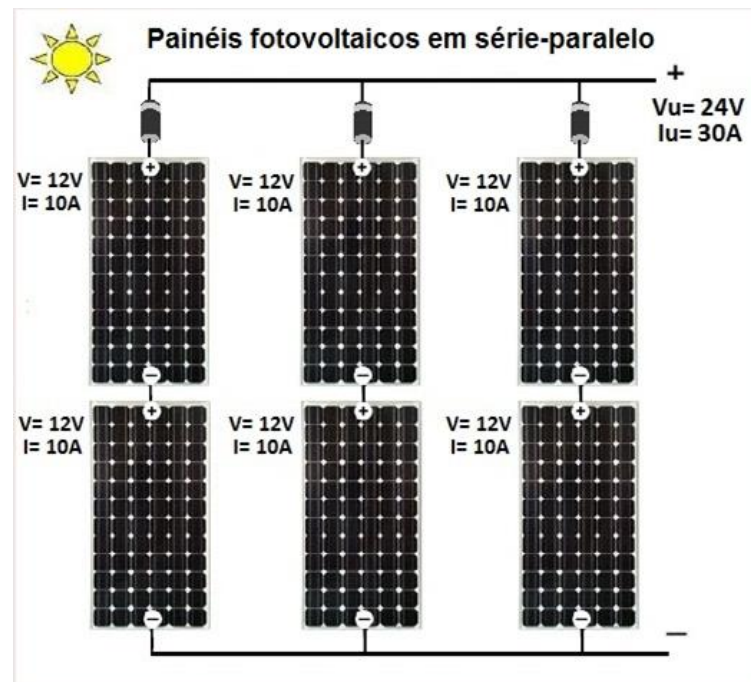


Figura 8 – Ligação Série-Paralelo de Módulos Fotovoltaicos.

Fonte: MPPT Solar

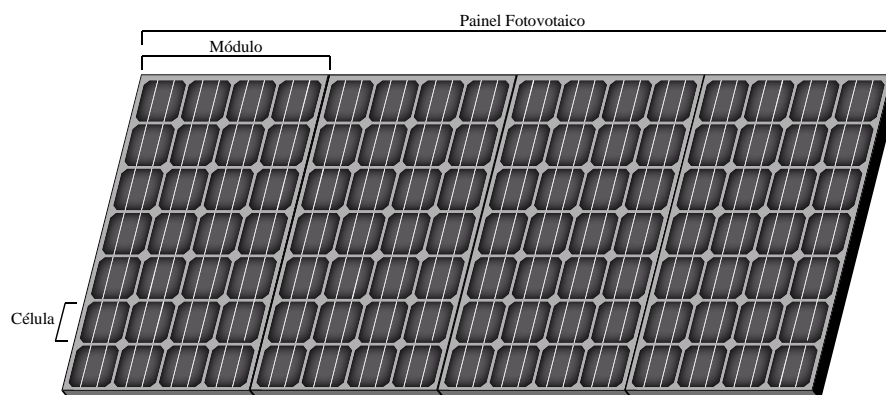


Figura 9 – Esquema de Um Painel Fotovoltaico.

2.5 Conclusão

Este capítulo apresentou conceitos básicos para a compreensão do funcionamento de uma célula fotovoltaica, bem como os principais parâmetros envolvidos diretamente no rendimento e eficiência, vitais para se entender o funcionamento de um painel fotovoltaico.

Os dados de radiação solar apresentaram similaridades em sua composição para as duas estações climáticas analisadas. Porém, pode-se perceber uma incidência de radiação maior e mais longa em termos de tempo no verão. Isto pode ser explicado pelo horário de verão, pratica adotada em alguns estados com o objetivo de deslocar o horário de pico de energia, onde os relógios são adiantados em uma hora. Apesar disso, os dois gráficos apresentaram a variação necessária para validar os limites de operação dos conversores CC-CC e realizar o rastreamento do ponto de máxima potência do sistema fotovoltaico.

3 CONVERSORES ESTÁTICOS CC/CC NÃO ISOLADOS

3.1 Introdução

A variação do ponto de máxima potência ocorre devido à variação da temperatura e da radiação solar, conforme visto nas seções 2.2.1 e 2.2.2. Esta característica sugere o uso de um estágio de processamento de energia para manter o sistema operando sempre próximo ao ponto de máxima potência. Desta forma, nas próximas seções serão estudados os principais conversores CC-CC e os limites de operação dos mesmos no rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.

Conversores estáticos CC-CC são conversores chaveados formados por elementos semicondutores e elementos passivos, como indutores e capacitores. São ditos não isolados porque não apresentam nenhuma isolação entre a fonte de alimentação e a carga, diferentemente de conversores isolados, como por exemplo, o conversor flyback [14].

Existe uma infinidade de conversores CC/CC não isolados. Dentre os mais comuns, destacam-se:

- *Buck*
- Boost
- *Buck-Boost*
- Sepic
- Cúk
- Zeta

3.2 Conversor *Buck* ou Conversor Rebaixador

O conversor *Buck*, também conhecido como *step-down*, é um conversor não isolado rebaixador de tensão, ou seja, produz em sua saída um valor médio de tensão igual ou inferior ao valor médio de tensão de entrada. Este tipo de conversor é concebido a fim de possibilitar uma variação de tensão contínua na carga de zero até o valor da fonte de alimentação [14].

O conversor *Buck* tem como característica, se comportar como uma fonte de tensão na sua entrada e uma fonte de corrente na sua saída, como pode ser visto na figura 10.

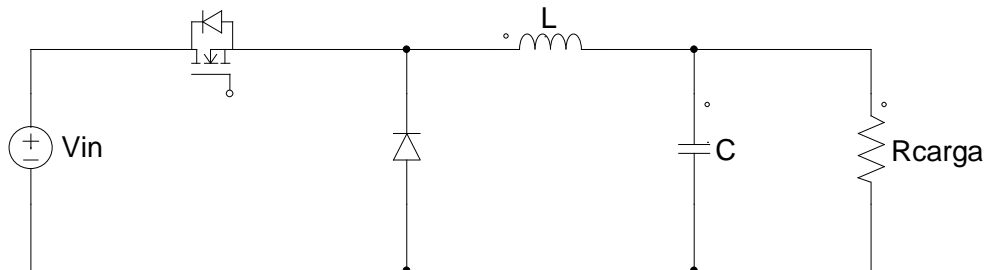


Figura 10 – Circuito Elétrico do Conversor *Buck*.

Existem três modos de operação do conversor *Buck*:

- Modo de condução contínua
- Modo de condução descontínua
- Modo de operação crítica.

No modo de condução contínua, a corrente no indutor é sempre positiva, ou seja, não se anula durante o período de comutação [14].

O ganho do conversor *Buck* é linear a sua razão cíclica, conforme a equação 3.1 e ilustrado na figura 11.

$$\frac{V_o}{V_i} = G = D \quad (3.1)$$

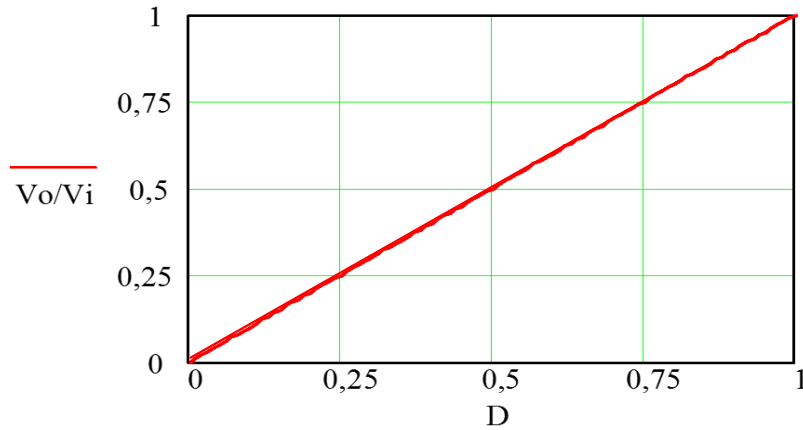


Figura 11 – Ganho do Conversor *Buck* a Partir da Variação da Razão Cíclica.

3.2.1 Região de operação do conversor *Buck*

A região de operação nada mais é do que a faixa de operação onde o conversor consegue rastrear o ponto de máxima potência. Cada conversor possui uma faixa de operação, definida por parâmetros como a carga e a razão cíclica do conversor.

Primeiramente, definimos a tensão de saída do conversor V_{out} como a seguinte relação, conforme visto em [15]:

$$V_{out} = I_{out} * R_{carga} \quad (3.2)$$

Definindo o ganho de tensão e de corrente do conversor, tem-se:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = G \quad (3.3)$$

$$\frac{I_{in}}{I_{out}} = G \quad (3.4)$$

Isolando V_{out} e I_{out} , tem-se:

$$V_{out} = G * V_{in} \quad (3.5)$$

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{G} \quad (3.6)$$

Substituindo na equação 3.2, tem-se [15]:

$$\frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{R_{carga}}{G^2} \quad (3.7)$$

A tangente de um ângulo qualquer θ é dada pelo cateto oposto dividido pelo cateto adjacente, ilustrado na equação 3.8.

$$\tan \theta = \frac{\textit{cateto oposto}}{\textit{cateto adjacente}} \quad (3.8)$$

Isolando θ , tem-se:

$$\theta = \textit{Atan} \frac{\textit{cateto oposto}}{\textit{cateto adjacente}} \quad (3.9)$$

Analisando a equação 3.7, tem-se que R representa o cateto adjacente do ângulo e G^2 representa o cateto oposto do ângulo [15].

Substituindo em 3.9, tem-se:

$$\theta = \textit{atan} \frac{G^2}{R_{carga}} \quad (3.10)$$

Substituindo a equação 3.1 em 3.10, tem-se:

$$\theta = \textit{atan} \frac{D^2}{R_{carga}} \quad (3.11)$$

Analisando a equação 3.11, observa-se que o ângulo de operação depende apenas da variação da razão cíclica, pois a carga é estática. Como a razão cíclica varia entre 0 e 1, pode-se definir o ângulo máximo e o ângulo mínimo de operação do conversor, determinando assim a sua região de operação [15].

Para $D = 0$, tem-se:

$$\theta_{min} = \text{atan} \frac{0^2}{R_{carga}} = 0 \quad (3.12)$$

Para $D = 1$, tem-se:

$$\theta_{max} = \text{atan} \frac{1^2}{R_{carga}} = \text{Atan} \frac{1}{R_{carga}} \quad (3.13)$$

3.3 Conversor Boost ou Conversor Elevador

O conversor *boost*, também conhecido como *step-up*, é um conversor CC não isolado elevador de tensão, ou seja, o valor de tensão em sua saída é sempre superior ao valor da fonte de alimentação, ou no pior dos casos, igual. Este conversor, assim como o conversor *Buck*, se caracteriza pela sua simplicidade, uma vez que utiliza apenas um indutor, um diodo, uma chave e um capacitor como componentes, se diferenciando do conversor *Buck* apenas pela arranjo dos componentes [14].

Diferentemente do conversor *Buck*, o conversor *boost* tem como característica possuir um indutor em série com a fonte de alimentação, caracterizando-se como uma fonte de corrente em sua entrada e, necessariamente, uma fonte de tensão em sua saída. A figura 12 mostra o circuito elétrico do conversor *Boost* [14].

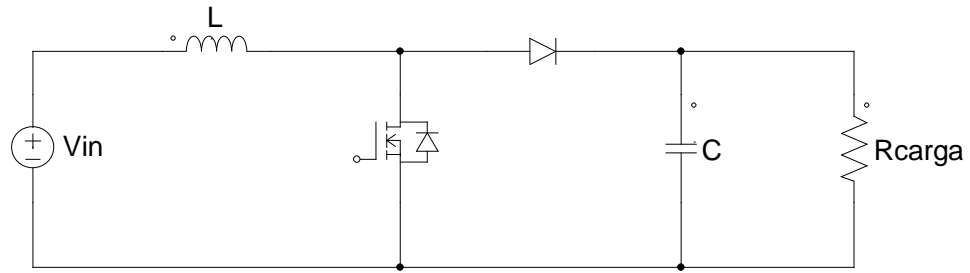


Figura 12– Circuito Elétrico do Conversor *Boost*.

O ganho do conversor *boost* em termos da razão cíclica é dado pela equação 3.14 e ilustrado pela figura 13.

$$\frac{V_o}{V_i} = G = \frac{1}{1 - D} \quad (3.14)$$

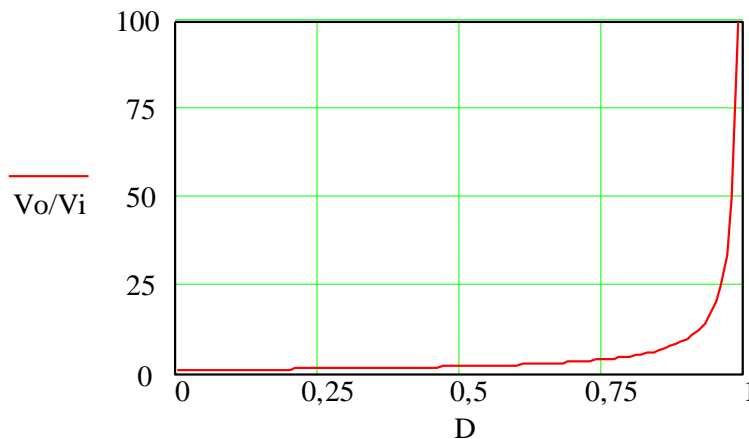


Figura 13 – Ganho do Conversor *Boost* a Partir da Variação da Razão Cíclica.

3.3.1 Região de operação do conversor *boost*

Da mesma forma que o conversor *Buck* possui uma região de operação dependente da carga e da razão cíclica, o mesmo ocorre com o conversor *boost*.

A equação 3.9 vista anteriormente é comum também ao conversor *boost*, ou seja, são iguais para os dois conversores.

Aplicando a equação 3.14 na equação 3.9, conforme visto em [15]. Tem-se:

$$\theta = \text{atan} \frac{1^2}{(1 - D)^2 * R_{carga}} \quad (3.15)$$

Considerando que a razão cíclica varia entre 0 e 1, podemos definir os ângulos máximos e mínimos de operação, definindo a região de operação do conversor *boost* [15].

Para $D = 0$, tem-se:

$$\theta_{min} = \text{atan} \frac{1^2}{(1 - 0)^2 * R_{carga}} = \text{atan} \frac{1}{R_{carga}} \quad (3.16)$$

Para $D = 1$, tem-se:

$$\theta_{max} = \text{atan} \frac{1^2}{(1 - 1)^2 * R_{carga}} = \text{atan} \frac{1}{0} = 90^\circ \quad (3.17)$$

Analisando as equações 3.16 e 3.17, percebe-se que a região de operação mínima do conversor *boost* é exatamente a região de operação máxima do conversor *Buck*, ou seja, toda a região proibida do conversor *boost*, setor abaixo da região mínima de operação, é exatamente a região de operação do conversor *Buck*. Do mesmo modo, a região proibida do conversor *Buck* é a região de operação do conversor *boost*. Pode-se dizer então que um conversor é o complemento do outro.

3.4 Conversor *Buck-Boost* ou Conversor Rebaixador/Elevador

Os conversores vistos até o momento são classificados como conversores diretos, ou seja, a transferência de potência entre a entrada e a saída do conversor é direta, sem a passagem por elementos acumuladores de energia.

O conversor *Buck-Boost* ou *Step-Up/Down*, é um conversor com características de fonte de tensão na entrada e fonte de tensão na saída, ou seja, um conversor à acumulação indutiva, onde o fluxo de carga entre a entrada e a saída pode ser controlado pelo indutor L [14].

A principal característica do conversor *Buck-Boost*, além de controlar a tensão de saída para valores acima ou abaixo da tensão de entrada, é que a polaridade da tensão de saída é invertida em relação a tensão de entrada. Essa característica será melhor observada no decorrer deste trabalho [14].

A figura 14 ilustra o circuito elétrico de um conversor *Buck-Boost*.

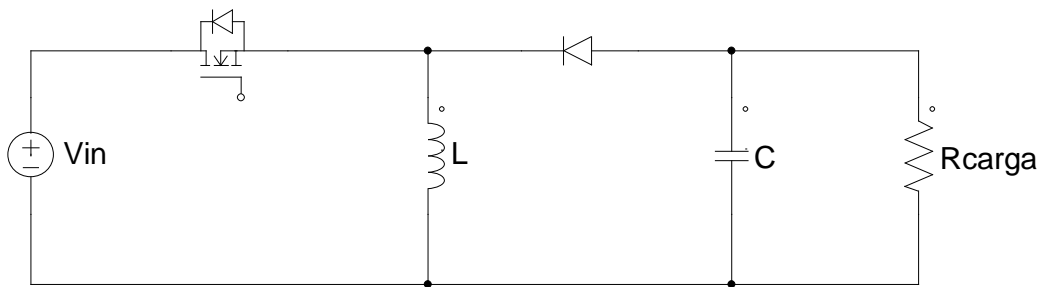


Figura 14 – Circuito Elétrico do Conversor *Buck-Boost*.

O ganho do conversor *Buck-Boost* é dado pela equação 3.18 e ilustrado pela figura 15.

$$\frac{V_o}{V_i} = G = \frac{D}{1 - D} \quad (3.18)$$

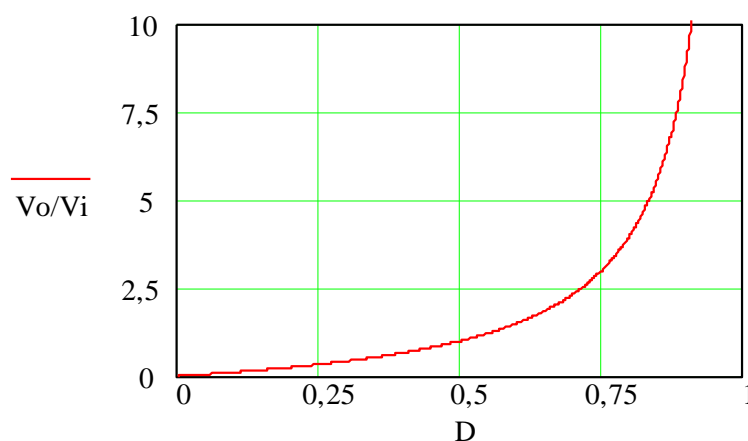


Figura 15 – Ganho do Conversor *Buck-Boost* a Partir da Variação da Razão Cíclica.

3.4.1 Região de Operação do Conversor *Buck-Boost*

Conforme visto nas seções anteriores, os conversores possuem uma região de operação que delimita a capacidade do conversor de rastrear o ponto de máxima potência.

A equação 3.9 vista anteriormente, também é comum ao conversor *Buck-Boost*.

Aplicando a equação 3.18 na equação 3.9, conforme visto em [15]. Tem-se:

$$\theta = \text{atan} \frac{D^2}{(1 - D)^2 * R_{carga}} \quad (3.19)$$

Considerando que a razão cíclica varia entre 0 e 1, podemos definir os ângulos máximos e mínimos de operação, definindo a região de operação do conversor *Buck-Boost* [15].

Para $D = 0$, tem-se:

$$\theta_{min} = \text{atan} \frac{0^2}{(1 - 0)^2 * R_{carga}} = 0^\circ \quad (3.20)$$

Para $D = 1$, tem-se:

$$\theta_{max} = \text{atan} \frac{1^2}{(1 - 1)^2 * R_{carga}} = \text{Atan} \frac{1}{0} = 90^\circ \quad (3.21)$$

A tabela 1 apresenta de forma resumida os ângulos de operação, bem como os ângulos máximos e mínimos de operação.

Tabela 1. Região de Operação dos Conversores.

| Conversor | Ganho | Ângulo Efetivo | Ângulo Mínimo | Ângulo Máximo |
|-------------------|---------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Buck | $G = D$ | $\theta = \text{Atan} \frac{D^2}{R}$ | $\theta = \text{Atan} \frac{0^2}{R} = 0^\circ$ | $\theta = \text{Atan} \frac{1^2}{R} = \frac{1}{R}$ |
| Boost | $G = \frac{1}{1-D}$ | $\theta = \text{Atan} \frac{1^2}{(1-D)^2 * R}$ | $\theta = \text{Atan} \frac{1^2}{(1-0)^2 * R} = \frac{1}{R}$ | $\theta = \text{Atan} \frac{1^2}{(1-1)^2 * R} = 90^\circ$ |
| Buck-boost | $G = \frac{D}{1-D}$ | $\theta = \text{Atan} \frac{D^2}{(1-D)^2 * R}$ | $\theta = \text{Atan} \frac{0^2}{(1-0)^2 * R} = 0^\circ$ | $\theta = \text{Atan} \frac{1^2}{(1-1)^2 * R} = 90^\circ$ |

3.5 Conclusão

Este capítulo apresentou noções e conceitos acerca dos conversores estáticos CC-CC mais utilizados, incluindo os conversores *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*, utilizados neste trabalho.

Conforme mencionado anteriormente, e analisando a região de operação destes conversores, pode-se notar que os conversores *Buck* e *Boost* atuam em regiões de operações diferentes, mas complementares, ou seja, o limite final de operação de um é o limite inicial de operação do outro. Desta forma, foi desenvolvido o conversor *Buck-Boost* que, como o próprio nome já descreve, é uma união dos conversores *Buck* e *Boost*. A partir deste conversor, pôde-se abranger uma área muito maior de operação sem perdas de desempenho e eficiência.

Vale ressaltar que, na prática, nenhum destes conversores consegue atingir os limites máximo ou mínimo de operação teóricos vistos anteriormente, isso se deve ao fato de os conversores possuírem perdas, ocasionadas tanto pela construção dos mesmos, com peças próximas operando a altas frequências que causam o aquecimento do sistema, quanto pelas características dos próprios componentes utilizados.

Como este trabalho foi baseado apenas em simulações feitas em software, considerou-se o sistema como um sistema ideal, ou seja, sem as devidas perdas citadas acima.

4 TÉCNICAS DE MPPT (*Maximum power point tracking*)

4.1 Introdução

Nos últimos anos, com o aumento considerável do uso da energia em forma de radiação solar, tem-se buscado novas técnicas que, aplicadas aos painéis fotovoltaicos, possibilitem um aumento da confiabilidade e eficiência dos mesmos.

Os painéis fotovoltaicos apresentam uma eficiência de conversão baixa se comparada a outras formas conhecidas de geração de energia, em torno de 15%. Como a região de máxima potência gerada pelas células fotovoltaicas é extremamente dependente de condições meteorológicas, como a temperatura e a radiação, este valor de 15% tende a diminuir caso o painel fotovoltaico não opere na região de máxima potência [4].

Para a solução deste problema, várias técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência foram desenvolvidas, desde as mais simplistas até técnicas de alta complexidade, como lógicas Fuzzy e redes neurais, que necessitam de alto poder de processamento computacional [12].

Dentre as técnicas mais tradicionais, podem-se citar:

- Método de tensão constante
- Perturbação e Observação(P&O)
- Condutância Incremental

4.2 Método de tensão constante

O método de tensão constante é uma técnica simples e de fácil implementação, baseada na fixação do valor de tensão de saída do módulo fotovoltaico. Em outras palavras, pode-se dizer que a tensão de saída é mantida constante em um valor igual ou próximo da tensão de referência que garante a máxima potência. Isso garante que o sistema irá operar na região de máxima potência para qualquer condição de radiação solar [16].

As vantagens desse método são, como já citado acima, a sua simplicidade e facilidades na implementação, uma vez que é necessária a leitura de apenas um

parâmetro de saída do módulo, no caso a tensão de circuito aberto V_{oc} . Como desvantagem desse método, o valor de tensão de referência é determinado para uma temperatura fixa, ou seja, caso a temperatura do módulo aumente ou diminua, o ponto de tensão onde ocorre a máxima potência também mudará. Como a tensão do módulo é mantida constante, este não fornecerá a máxima potência do conjunto fotovoltaico [12].

Em resumo, o método de tensão constante é indicado para regiões onde não ocorram variações bruscas de temperatura, que façam o ponto de máxima potência se deslocar do ponto fixado anteriormente.

4.3 Perturbação e Observação (P&O)

O método de perturbação e observação, assim como o método de tensão constante, é uma técnica simples e de fácil implementação, sendo uma das primeiras técnicas a utilizar a tensão e a corrente de saída do módulo fotovoltaico.

O método funciona basicamente, como o nome já diz, em causar uma perturbação e analisar o resultado da mesma. Primeiramente, o sistema opera com uma determinada razão cíclica D , onde são obtidos os valores de tensão (V) e corrente (I). A partir desses valores, é calculada a potência de saída P (W) do módulo pela equação 4.1 [12].

$$P_{(W)} = V \cdot I \quad (4.1)$$

De posse do valor de potência de saída, é causada uma perturbação no sistema a fim de que se altere o valor da razão cíclica. Novamente são medidos os valores de tensão e corrente e, a partir destes, é calculada a nova potência P_1 . Posteriormente, é feita uma comparação entre a potência P_1 e a potência P . Se a diferença entre P_1 e P for maior que zero, conforme a equação 4.2, o sistema está indo em direção ao ponto de máxima potência. Caso a diferença entre P_1 e P seja menor que zero, conforme equação 4.3, o sistema está indo em direção oposta ao ponto de máxima potência, devendo ser alterado o sentido da perturbação causada a razão cíclica [12].

$$P_1 - P > 0 \quad (4.2)$$

$$P_1 - P < 0 \quad (4.3)$$

O processo continua infinitamente, mesmo após o encontro do ponto de máxima potência, onde o sistema fica incrementando e decrementando em torno do ponto. Com isso, surgem duas situações distintas. A primeira situação é a escolha do passo ser muito grande, entenda-se como passo a diferença entre as razões cíclicas medidas. Com isso, o sistema apresenta uma boa resposta dinâmica e uma má resposta em regime permanente, ou seja, o tempo de encontro do ponto de máxima potência é rápido, mas a oscilação em torno dele em regime permanente é grande, devido ao tamanho do passo dado. Em contrapartida, escolhendo um passo pequeno, o sistema apresentará uma boa resposta em regime permanente, pois a oscilação será pequena em torno do PMP, e uma má resposta dinâmica devido ao passo ser pequeno e levar bastante tempo até alcançar o PMP [12] [16].

Em resumo, o método de perturbação e observação se mostra eficiente e preciso no rastreamento do PMP. Mas como se pode perceber, a escolha do passo pequeno resulta em um tempo de alcance do PMP significativo. Isso se apresentará como um problema em dias nublados, onde a radiação solar muda rapidamente, fazendo com que o PMP se desloque e seja demorado para alcançá-lo. Para a solução deste problema, existem adaptações que consistem em variar automaticamente o tamanho do passo, fazendo com que o mesmo reduza ao ponto que se é aproximado do PMP. Uma destas adaptações é conhecida como condutância incremental.

4.4 Condutância Incremental

O método de condutância incremental é um método de MPPT que alia precisão e rapidez, sendo por isso considerado o melhor entre os métodos tradicionais.

O método funciona, basicamente, a partir do cálculo da derivada da curva $P \times V$. Quando a derivada $\frac{dP}{dV} = 0$, o sistema se encontra no ponto de máxima potência. Primeiramente, o método realiza as leituras de tensão e corrente de saídas do módulo fotovoltaico, calculando assim a potência P_1 de saída do módulo, em watts.

Posteriormente, é realizada uma nova leitura dos valores e calculado a potência P_2 de saída do módulo [12].

A localização do MPP obedece a equação 4.4.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (4.4)$$

Onde, ΔI e ΔV representam, respectivamente, a diferente de corrente e de tensão das leituras 1 e 2 realizadas. Na segunda etapa, o método analisa o resultado da derivada $\frac{dP}{dV}$. Caso $\frac{dP}{dV} < 0$, o ponto de operação do método se encontra a direita do ponto de máxima potência, sendo necessário aumentar a razão cíclica, de forma que o ponto se mova para a esquerda. Caso $\frac{dP}{dV} > 0$, o ponto se encontra a esquerda do ponto de máxima potência, sendo necessário elevar a razão cíclica, de forma que o ponto se mova para a direita. Caso $\frac{dP}{dV} = 0$, o ponto de operação se encontra exatamente no ponto onde ocorre a máxima potência.

Este método se destaca pela ótima resposta dinâmica e pequena oscilação em regime permanente, uma vez que sua resposta de rastreamento do MPP é rápida, pois o método utiliza a própria curva da derivada $P \times V$ como forma de determinar o tamanho do passo ΔD . Em outras palavras, quando o ponto do módulo fotovoltaico se encontra distante do ponto de máxima potência, a derivada possui valor elevado e o método determina um passo ΔD grande para chegar mais rapidamente ao MPP. Conforme o ponto de operação se aproxima do MPP, a derivada diminui o seu valor, assim, o método interpreta que o MPP está relativamente próximo e diminui gradativamente o passo ΔD . Quando a derivada atinge o valor zero, o passo escolhido pelo método é pequeno, com isso reduz-se bastante as oscilações de regime permanente [12].

Em resumo, o sinal da derivada determina se o ponto se encontra a esquerda ou a direita do MPP, enquanto o módulo da derivada determina o tamanho do passo ΔD a ser dado.

4.5 Conclusão

O capítulo apresentou as técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência mais utilizadas. A tabela 2 mostra a comparação entre as técnicas de MPPT vistas anteriormente. Evidentemente que as técnicas computacionais mais complexas, como lógica fuzzy e redes neurais possuem uma convergência muito mais rápida que as técnicas mais usuais. Porém, a técnica de perturbação e observação se mostrou simples e de fácil implementação, apresentando ótimos resultados, sendo a escolhida para este trabalho.

Tabela 2. Comparação entre as técnicas de MPPT mais utilizadas.

| Técnica de MPPT | Dependência do Painel Fotovoltaico | Confiabilidade | Complexidade | Velocidade de Convergência | Implementação |
|---------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| <i>Tensão Constante</i> | <i>Sim</i> | <i>Baixa</i> | <i>Baixa</i> | <i>Média</i> | <i>Analógica/Digital</i> |
| <i>Perturbação e Observação</i> | <i>Não</i> | <i>Média</i> | <i>Baixa</i> | <i>Variável</i> | <i>Analógica/Digital</i> |
| <i>Condutância Incremental</i> | <i>Não</i> | <i>Média</i> | <i>Média</i> | <i>Variável</i> | <i>Digital</i> |
| <i>Hill Climbing</i> | <i>Não</i> | <i>Média</i> | <i>Baixa</i> | <i>Variável</i> | <i>Analógica/Digital</i> |
| <i>Lógica Fuzzy</i> | <i>Sim</i> | <i>Média</i> | <i>Alta</i> | <i>Rápida</i> | <i>Digital</i> |
| <i>Redes Neurais</i> | <i>Sim</i> | <i>Média</i> | <i>Alta</i> | <i>Rápida</i> | <i>Digital</i> |

Fonte: Adaptado de CHAPMAN, ESRAM, 2007.

5 PROJETO E RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

5.1 Conversor *Buck*

A seguir, serão apresentados o dimensionamento dos componentes e os resultados obtidos em simulação para o conversor *Buck*.

5.1.1 Dimensionamento dos componentes

Para dimensionarmos corretamente os componentes do sistema, precisamos primeiramente das características do painel fotovoltaico. O painel fotovoltaico escolhido para o projeto foi o KD245GH-4FB desenvolvido pela empresa Kyocera que apresenta parâmetros expressos na tabela 3.

Tabela 3. Especificações do painel fotovoltaico KD245GH-4FB.

| Grandeza | Valor |
|------------------------------------------|--------------|
| Potência Máxima (P_{max}) | 245 W |
| Tensão de Máxima Potência (V_{mp}) | 29,8 V |
| Corrente de Máxima Potência (I_{mp}) | 8,23 A |
| Tensão de circuito Aberto (V_{oc}) | 36,9 V |
| Corrente de Curto Circuito (I_{sc}) | 8,91 A |
| Voltagem Máxima do sistema | 1000 V |
| Coeficiente de temperatura para V_{oc} | -0,36 V/°C |
| Coeficiente de temperatura para I_{sc} | 0,06 A/°C |
| Número de Células do Painel | 60 |

Fonte: Kyocera

Para o dimensionamento dos componentes e da carga, necessitamos apenas dos valores de potência máxima, tensão de máxima potência e corrente de máxima potência do painel fotovoltaico. A tensão de saída do sistema foi obtida a partir da razão cíclica definida em 0,5 a fim de permitir uma análise justa de todos os conversores abordados neste trabalho. Os dados especificados para o projeto do conversor *Buck* estão ilustrados na tabela 4.

Tabela 4. Especificação do projeto do conversor Buck.

| Grandeza | Valor |
|-------------------------------------|--------------|
| Potência de Saída (P_{out}) | 245 W |
| Tensão de Entrada (V_{in}) | 29,8 V |
| Corrente de Entrada (I_{in}) | 8,23 A |
| Tensão de Saída (V_{out}) | 15 V |
| Frequência de Chaveamento (F_c) | 10 KHz |

De posse de todos os parâmetros necessários, o dimensionamento dos componentes foi calculado conforme observado em [12] e [14].

- Corrente de Saída:

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{245}{15} = 16,33 \text{ A} \quad (5.1)$$

- Resistência da Carga:

$$R_{carga} = \frac{V_{out}}{I_{out}} = \frac{15}{16,33} = 0,9183 \Omega \quad (5.2)$$

- Razão Cíclica de Operação:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{15}{29,8} = 0,5033 \quad (5.3)$$

- Ondulação Máxima de Corrente de Entrada:

$$\Delta I_{Linmax} = 0,1 * I_{in} = 0,1 * 8,23 = 0,823 \text{ A} \quad (5.4)$$

- Ondulação Máxima de Corrente de Saída:

$$\Delta I_{Loutmax} = 0,1 * I_{out} = 0,1 * 16,33 = 1,633 \text{ A} \quad (5.5)$$

- Ondulação Máxima de Tensão de Entrada:

$$\Delta V_{Cinmax} = 0,1 * V_{in} = 0,1 * 29,8 = 2,98 \text{ V} \quad (5.6)$$

- Ondulação Máxima de Tensão de Saída:

$$\Delta V_{Coutmax} = 0,1 * V_{out} = 0,1 * 15 = 1,5 \text{ V} \quad (5.7)$$

- Capacitor de Entrada do Filtro LC:

$$C_{filtro} = \frac{I_{out}}{4 * F_c * \Delta V_{Cinmax}} = \frac{1,633}{4 * 10000 * 2,98} = 0,1370 \text{ mF} \quad (5.8)$$

- Indutor de Entrada do Filtro LC:

$$L_{filtro} = \frac{1,633}{31 * 10000^2 * 0,00013 * 0,823} = 46,72 \text{ } \mu\text{H} \quad (5.9)$$

- Capacitor de Saída do Conversor *Buck*:

$$C = \frac{I_{out} * D}{F_c * \Delta V_{Coutmax}} = \frac{16,33 * 0,5033}{10000 * 1,5} = 0,5480 \text{ mF} \quad (5.10)$$

- Indutor do Conversor *Buck*:

$$L = \frac{V_{in}}{4 * F_c * \Delta I_{Loutmax}} = \frac{29,8}{4 * 10000 * 1,633} = 0,4561 \text{ mF} \quad (5.11)$$

A tabela 5 apresenta, de forma resumida, todos os componentes do conversor *Buck* calculados anteriormente.

Tabela 5. Componentes do conversor *Buck*.

| Grandeza | Valor |
|---------------------------------------------|---------------------|
| <i>Razão Cíclica</i> | 0,5033 |
| <i>Carga</i> | 0,9183 Ω |
| <i>Indutor do Filtro LC</i> | 46,72 μH |
| <i>Capacitor do Filtro LC</i> | 0,1370 mF |
| <i>Indutor do Conversor Buck</i> | 0,4561 mH |
| <i>Capacitor de Saída do Conversor Buck</i> | 0,5480 mF |

5.1.2 Determinação da Região de Operação do Conversor

Conforme visto no capítulo 6, os conversores estáticos possuem uma região de operação, região que está diretamente relacionada com a carga à que o conversor é submetido e a razão cíclica de operação.

Para determinar a região de operação do conversor *Buck*, utiliza-se os valores de carga e razão cíclica definidos nas equações 5.2 e 5.3, aplicados à equação 3.11 vista anteriormente.

Para $R_{carga} = 0,9183\Omega$ e $D = 0,5033$, define-se o ângulo de operação do conversor, ângulo que equivale ao conversor operando com uma radiação de 1000 W/m²:

$$\theta = \text{Atan} \frac{D^2}{R} = \frac{0,5033^2}{0,9183} = 15,42^\circ \quad (5.12)$$

Para definir a região máxima e mínima de operação, define-se a razão cíclica D variando entre zero e um. Para a região mínima de operação, considera-se a razão cíclica como sendo zero, assim, tem-se:

$$\theta_{min} = \text{Atan} \frac{0^2}{0,9183} = 0^\circ \quad (5.13)$$

Para a região máxima de operação, considera-se a razão cíclica como sendo um, assim tem-se:

$$\theta_{max} = \text{Atan} \frac{1^2}{0,9183} = 47,43^\circ \quad (5.14)$$

Fazendo uma breve análise entre o ponto de operação e a região máxima de operação, percebe-se que o ponto de operação calculado para o conversor *Buck* se encontra dentro da faixa de operação calculada. A figura 16 ilustra mais facilmente a região de operação do conversor, bem como seu ponto de operação para radiações de 1000 W/m².

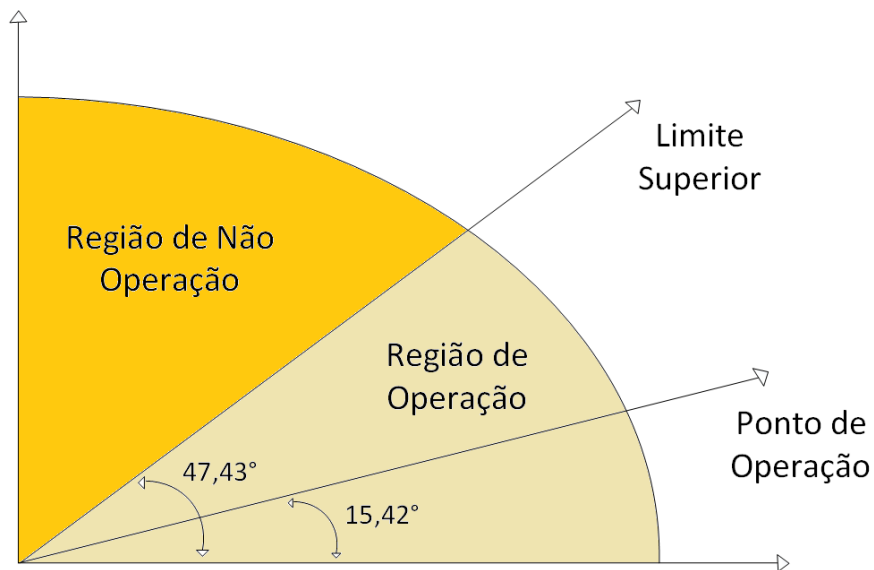


Figura 16 – Região de operação do Conversor *Buck*.

5.1.3 Simulações

Para as simulações a seguir, foram utilizados dados reais de radiação solar, obtidos no projeto SONDA ao longo de um dia aleatório para duas estações climáticas definidas: Verão e Inverno. As simulações foram realizadas com o auxílio do software PSIM, da POWERSIM, utilizando o método de Perturbação e Observação, que apresenta uma boa eficiência aliado a simplicidade de construção e modelagem. A temperatura foi fixada em 25°, visto que este trabalho visa avaliar apenas a variação da radiação solar.

Os resultados obtidos a seguir visam comprovar a teoria abordada anteriormente e averiguar se a utilização desta topologia em um cenário real é viável.

5.1.3.1 Verão

Para a estação climática do verão, foram utilizados dados do dia 16 de fevereiro de 2014, ilustrados na figura 5 vista anteriormente na seção 2.3.4.

O circuito simulado é observado na figura 17.

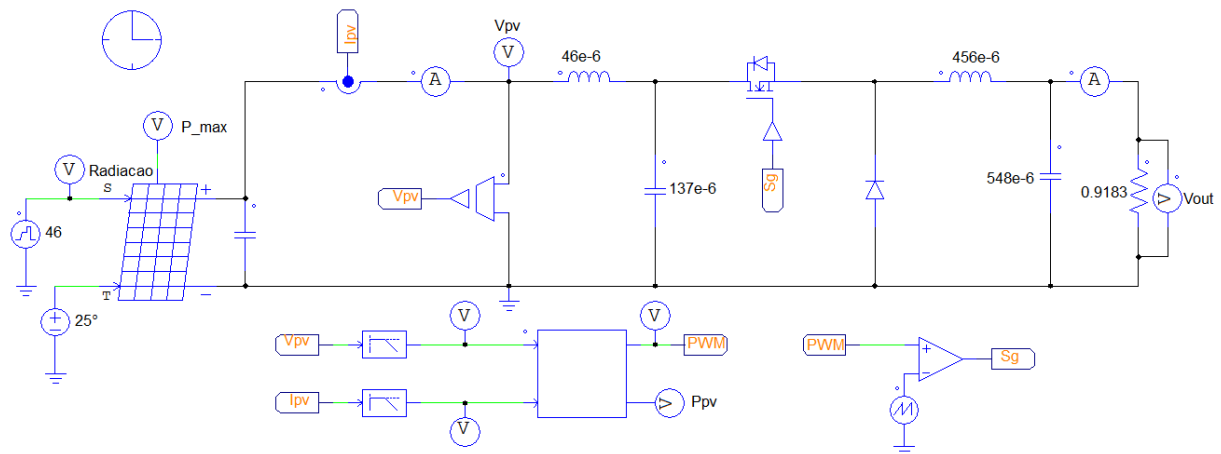


Figura 17 – Circuito Simulado no Software PSIM.

Na entrada do conversor *Buck*, utilizou-se um filtro LC, a fim de se filtrar possíveis indutâncias parasitas. O sistema de controle é composto por dois filtros passa-baixa, a fim de se atenuar frequências parasitas e por um bloco lógico contendo o algoritmo de perturbação e observação devidamente projetado para este trabalho. Para simulação da radiação solar, utilizou-se uma fonte do tipo piecewise, que permite a inserção de valores em determinados tempos. Desta forma, é possível avaliar todos os pontos de radiação no decorrer do dia.

As figuras abaixo ilustram os resultados obtidos:

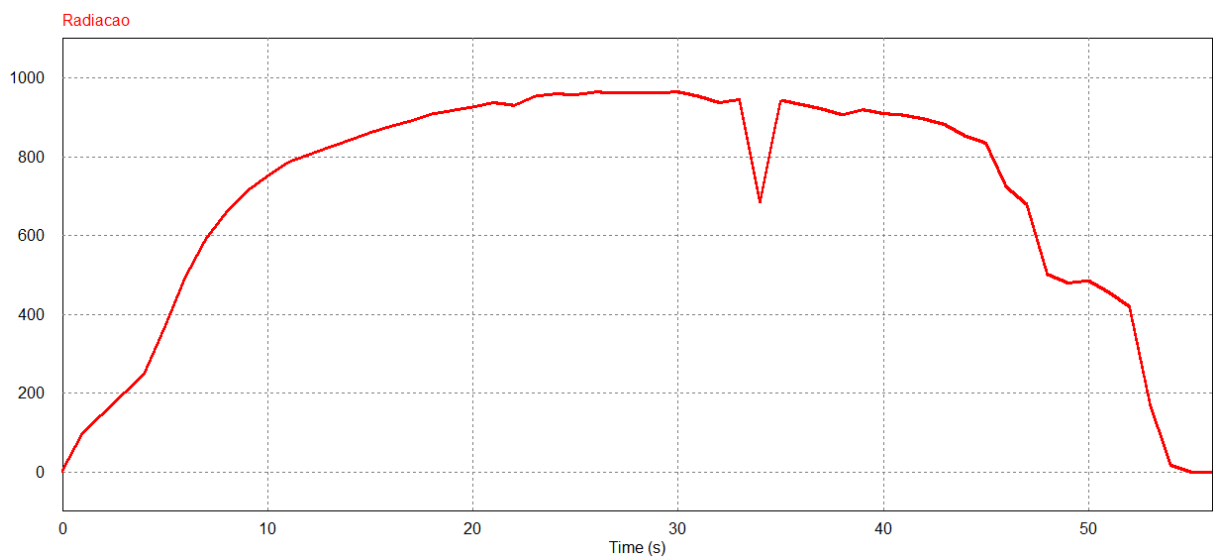


Figura 18 – Radiação Solar simulada na Fonte Piecewise do Software PSIM.

A figura 18 apresenta a forma de onda de radiação gerada pela fonte piecewise após serem colocados os dados de radiação. Nota-se que a onda é exatamente a mesma da radiação obtida do projeto SONDA.

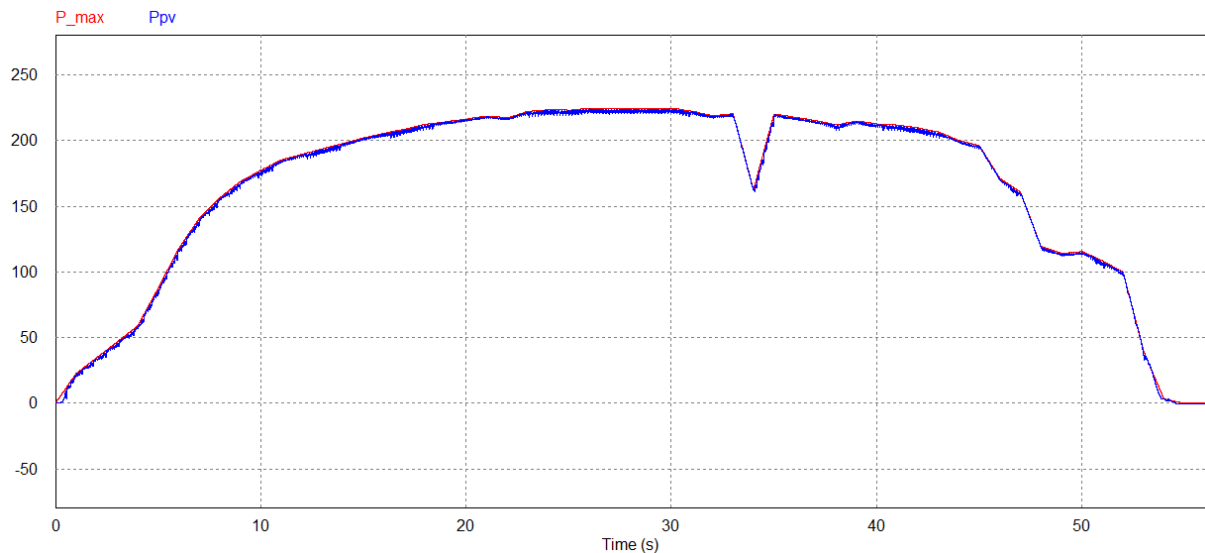


Figura 19 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul).

A figura 19 mostra duas curvas: Em vermelho a potência máxima do painel e em azul a potência de saída entregue à carga. Nota-se, primeiramente, que as duas curvas seguem o mesmo formato da curva de radiação, isto se justifica pelo fato de que a cada variação da radiação, a potência máxima do painel também muda, seguindo o mesmo formato da radiação. Posteriormente, percebe-se que a curva em azul, que é a potência de saída da carga, praticamente se sobrepõe a curva de máxima potência, ou seja, o conversor *Buck* através do método de perturbação e observação consegue extrair praticamente a potência máxima do painel durante todo o dia.

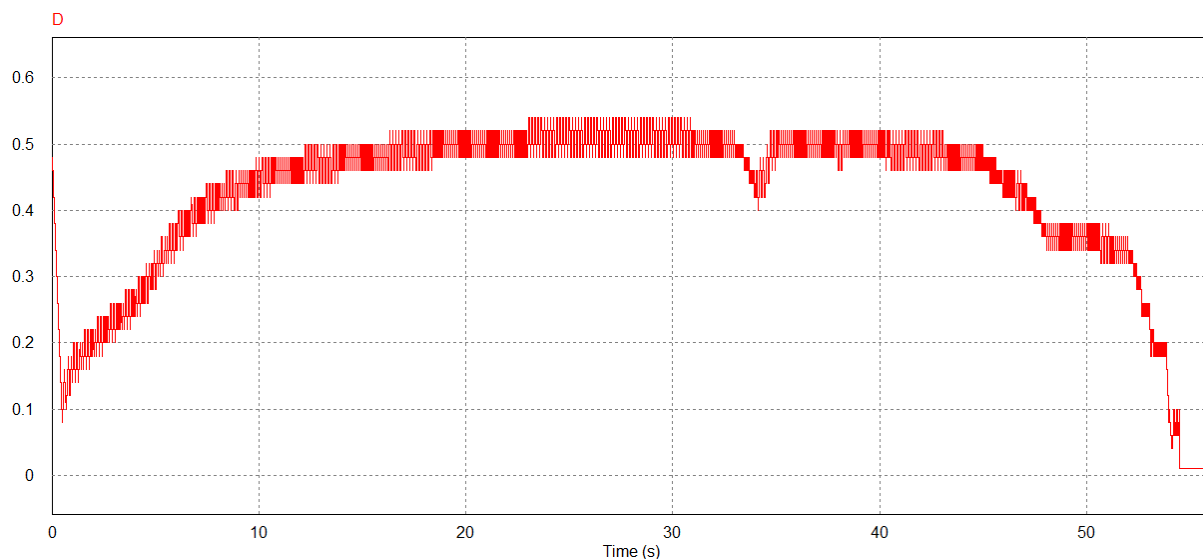


Figura 20 – Variação da Razão Cíclica.

A figura 20 mostra a variação da razão cíclica. Percebe-se que seus valores são em torno de 0.5 durante os valores mais altos de radiação, comprovando o que tinha sido visto anteriormente na equação 5.3.

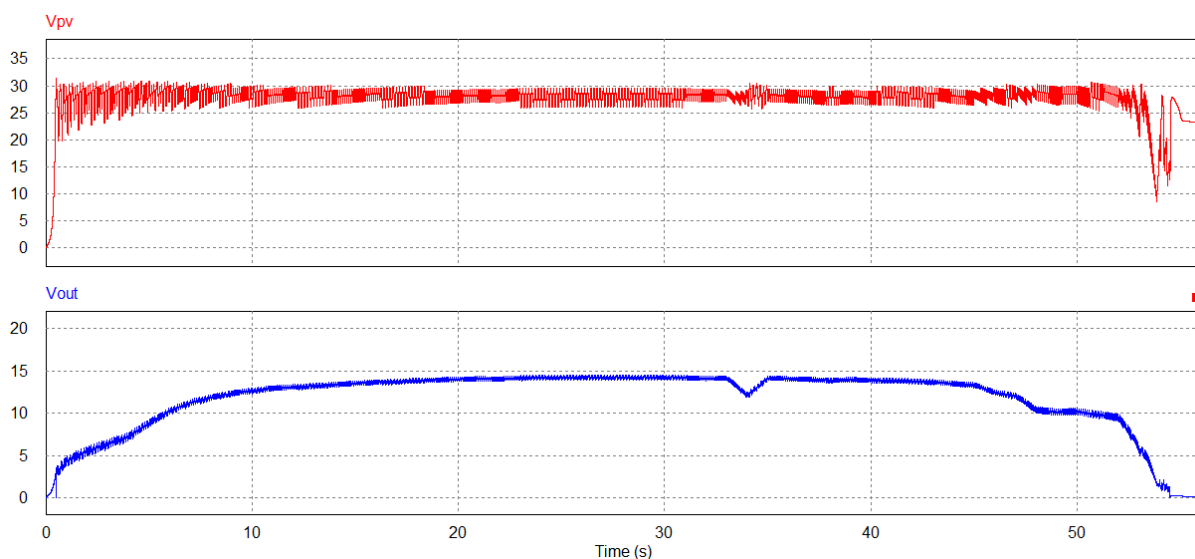


Figura 21 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul).

A figura 21 mostra a tensão de entrada em vermelho, e a tensão de saída em azul. Vê-se que, a tensão de entrada corresponde, proximamente, aos valores de tensão do painel e a tensão de saída exatamente a metade do valor da tensão de entrada, definida pela razão cíclica 0,5 vista anteriormente, e característica do conversor *Buck*.

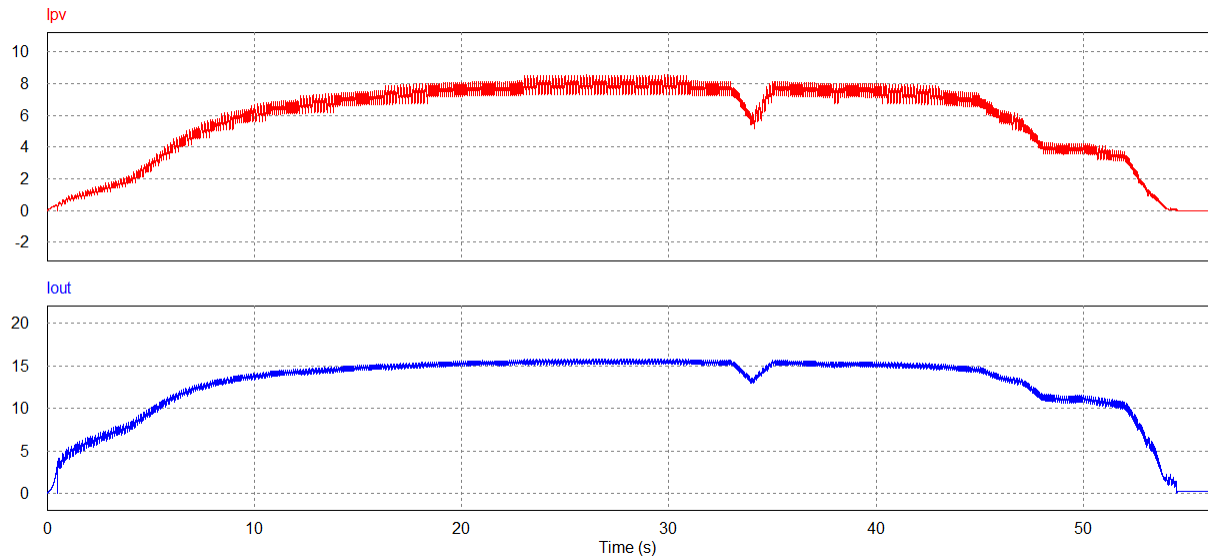


Figura 22 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul).

A figura 22 mostra a corrente de entrada em vermelho e a corrente de saída em azul. Nota-se que, como visto na equação 5.1, a corrente de saída é praticamente o dobro da corrente de entrada. Isto se justifica pelo fato de a tensão de saída ser a metade do valor da tensão de entrada, logo a corrente de saída necessita ser o dobro da corrente de entrada, a fim de que a potência entregue a carga seja a potência máxima extraída do painel fotovoltaico.

5.1.3.2 Inverno

Para o inverno, foram utilizados dados de radiação do dia 12 de Julho de 2014, vistos anteriormente na figura 6. O circuito simulado é o mesmo visto da figura 17.

Os resultados obtidos estão nas figuras 23, 24, 25, 26 e 27 abaixo.

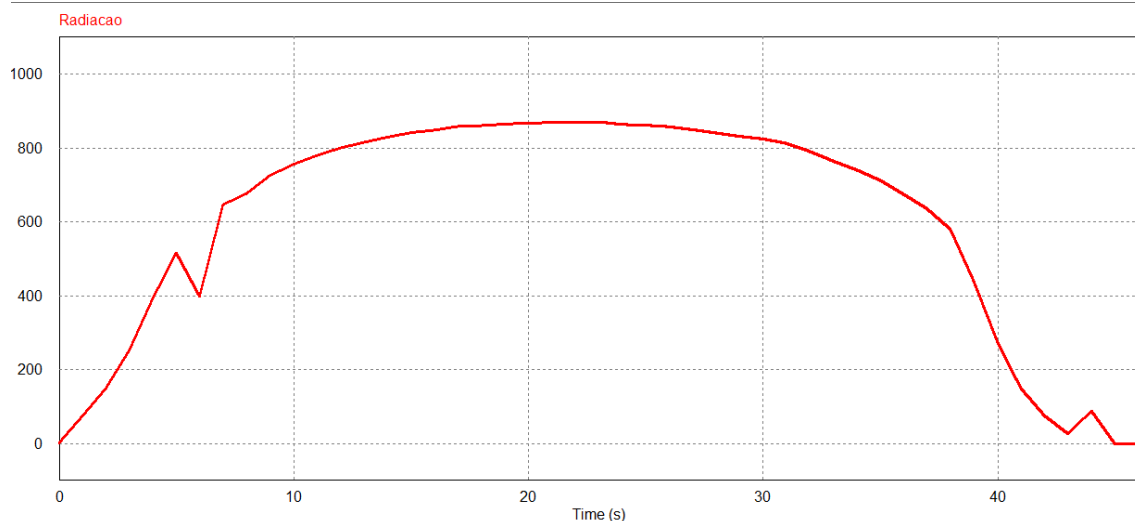


Figura 23 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM.

Da mesma forma que a curva de radiação do verão representa a forma de onda obtida no projeto SONDA, a curva de radiação do inverno representa exatamente os valores obtidos para o dia 12 de Julho de 2014

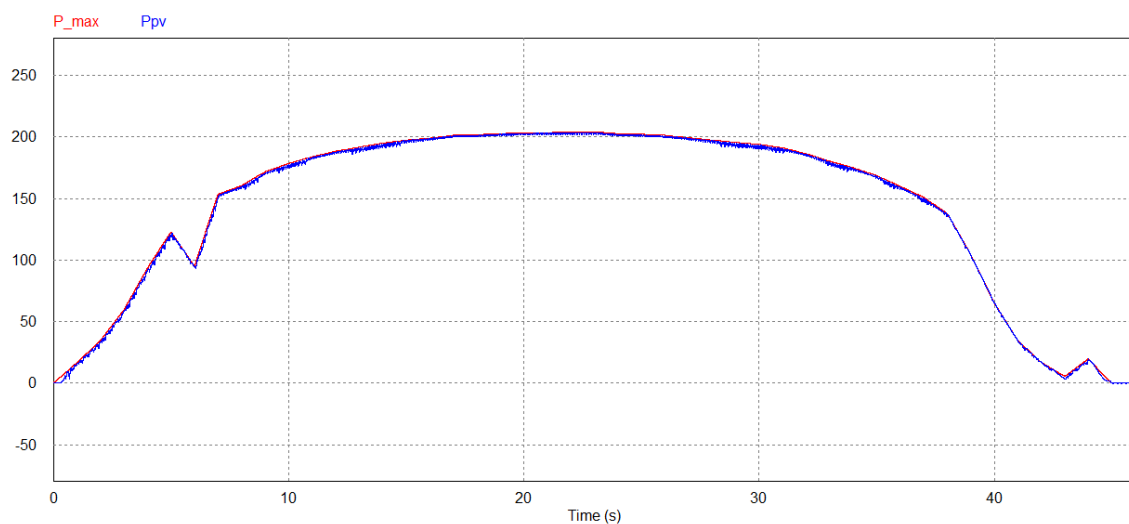


Figura 24 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul).

A figura 24 representa a potência máxima gerada pelo painel fotovoltaico (vermelho) e a potência extraída pelo conversor e entregue à carga (azul). Nota-se que, do mesmo modo que ocorreu no verão, que o conversor *Buck* conseguiu extrair

a máxima potência do painel fotovoltaico durante o decorrer do dia, mesmo em grandes variações de radiação.

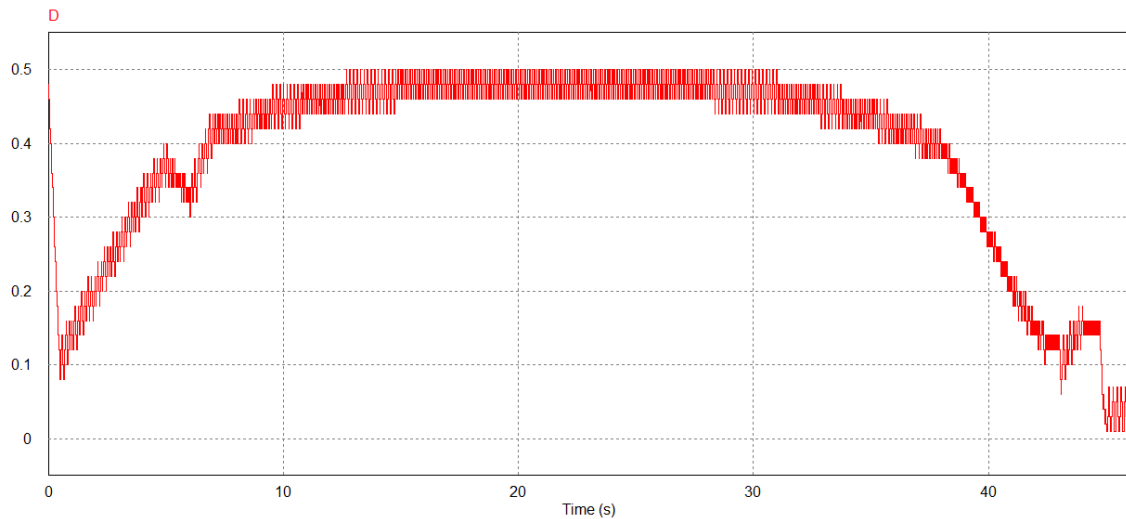


Figura 25 – Variação da Razão Cíclica.

A figura 25 mostra a variação da razão cíclica, vê-se que a mesma se comporta do mesmo modo que na teoria vista, variando em torno de 0,5 para radiações máximas.

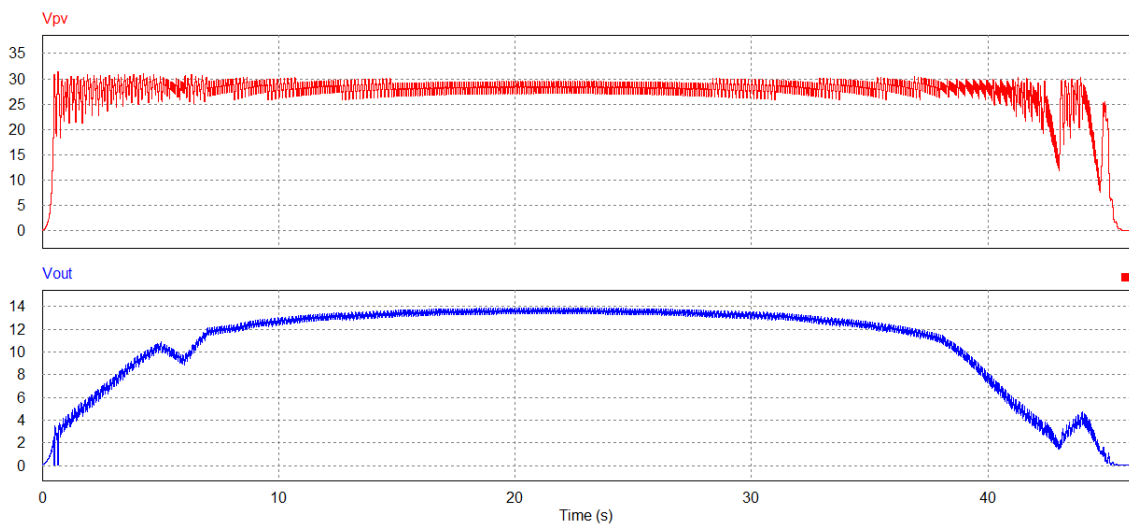


Figura 26– Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul).

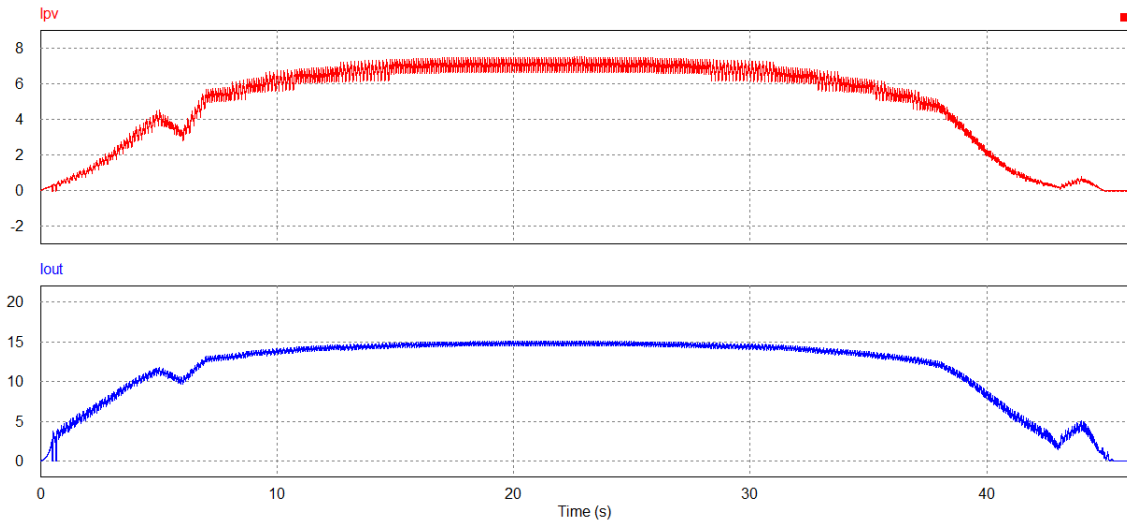


Figura 27 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul).

As figuras 26 e 27 mostram variações de tensão e corrente de entrada (vermelho) em relação a tensão e corrente da saída (azul), respectivamente. Nota-se que a tensão de saída e a corrente de saída não chegam aos valores de 15 V e 16,33 A, respectivamente. Isto se justifica pelo fato de que os valores de radiação do dia analisado não atingiram 1000 W/m², valor considerado para os devidos cálculos, ficando em torno de 850 W/m² no seu pico. Com isso, a tensão e a corrente geradas pelo painel não atingem os valores pré-determinados pelo fabricante e utilizados nos cálculos anteriores.

5.2 Conversor *Boost*

A seguir, serão apresentados o dimensionamento dos componentes e os resultados obtidos em simulação para o conversor *Boost*.

5.2.1 Projeto e Dimensionamento

Para o dimensionamento dos componentes do conversor *Boost*, necessita-se primeiramente dos dados de tensão de entrada (V_{in}), corrente de entrada (I_{in}) e potência de saída do painel fotovoltaico (P_{out}), especificados anteriormente na tabela 2. Da mesma forma do conversor *Buck*, a tensão de saída do conversor *Boost* foi definida com base na razão cíclica (D) fixada em 0,5. Resultando em uma tensão de saída (V_{out}) de 60 V.

Os dados para o projeto dos componentes do conversor *Boost* se encontram na tabela 6.

Tabela 6. Especificação do projeto do conversor Boost.

| Grandeza | Valor |
|-----------------------------------------------------|---------------|
| <i>Potência de Saída (P_{out})</i> | <i>245 W</i> |
| <i>Tensão de Entrada (V_{in})</i> | <i>29,8 V</i> |
| <i>Corrente de Entrada (I_{in})</i> | <i>8,23 A</i> |
| <i>Tensão de Saída (V_{out})</i> | <i>60 V</i> |
| <i>Frequência de Chaveamento (F_c)</i> | <i>10 KHz</i> |

A metodologia utilizada para os cálculos é a mesma do conversor *Buck* e segue os métodos vistos em [12] e [14].

- Corrente de Saída:

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{245}{60} = 4,08A \quad (5.15)$$

- Resistência da Carga:

$$R_{carga} = \frac{V_{out}}{I_{out}} = \frac{60}{4,08} = 14,69\Omega \quad (5.16)$$

- Razão Cíclica de Operação:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{29,8}{60} = 0,5033 \quad (5.17)$$

- Ondulação Máxima de Corrente de Entrada:

$$\Delta I_{Linmax} = 0,01 * I_{in} = 0,01 * 8,23 = 0,0823 \quad (5.18)$$

- Ondulação Máxima de Tensão de Saída:

$$\Delta V_{Coutmax} = 0,01 * V_{out} = 0,01 * 60 = 0,6 \quad (5.19)$$

- Indutor de Entrada do Conversor *Boost*:

$$L = \frac{V_{in} * D}{\Delta I_{Linmax} * F_c} = \frac{29,8 * 0,5033}{0,0823 * 10000} = 18,22mH \quad (5.20)$$

- Capacitor de Saída do Conversor *Boost*:

$$C = \frac{I_{out} * D}{F_c * \Delta V_{Coutmax}} = \frac{4,08 * 0,5033}{10000 * 0,6} = 342,5\mu F \quad (5.21)$$

A tabela 7 abaixo apresenta de forma resumida os componentes e seus respectivos valores, calculados anteriormente.

Tabela 7. Componentes do conversor Boost.

| Grandeza | Valor |
|----------------------------------------------|-----------------|
| <i>Razão Cíclica</i> | <i>0,5033</i> |
| <i>Carga</i> | <i>14,69 Ω</i> |
| <i>Indutor do Conversor Boost</i> | <i>18,22 mH</i> |
| <i>Capacitor de Saída do Conversor Boost</i> | <i>342,5 μF</i> |

5.2.2 Determinação de Região de Operação do Conversor *Boost*

Conforme visto anteriormente, o conversor *Boost* possui uma região de operação, região onde garante o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), e uma região de não operação, onde não conseguirá localizar o ponto de maior potência. Essa região é definida, pela razão cíclica do conversor e pela carga à qual o conversor é submetido.

Considerando a razão cíclica e carga previamente determinadas nas equações 5.16 e 5.17, tem-se:

- Ângulo de operação:

$$\theta = \text{Atan} \frac{1^2}{(1 - D)^2 * R} = \frac{1^2}{(1 - 0,5033)^2 * 14,69} = 15,42^\circ \quad (5.22)$$

O ângulo de operação é o ângulo onde o conversor opera quando a radiação incidente é igual a 1000 W/m². Para delimitar o ângulo máximo e o ângulo mínimo de operação do conversor, considera-se a razão cíclica (*D*) como sendo zero e um.

Para *D* = 0, tem-se a região mínima de operação do conversor:

$$\theta_{min} = \text{Atan} \frac{1^2}{(1 - 0)^2 * R} = \frac{1^2}{14,69} = 3,89^\circ \quad (5.23)$$

Para *D* = 1, tem-se a região máxima de operação do conversor:

$$\theta_{max} = \text{Atan} \frac{1^2}{(1 - 1)^2 * R} = \frac{1^2}{0} = 90^\circ \quad (5.24)$$

A figura 28 ilustra mais facilmente a região de operação do conversor *Boost*, bem como o ângulo de operação para a razão cíclica de 0,5033.

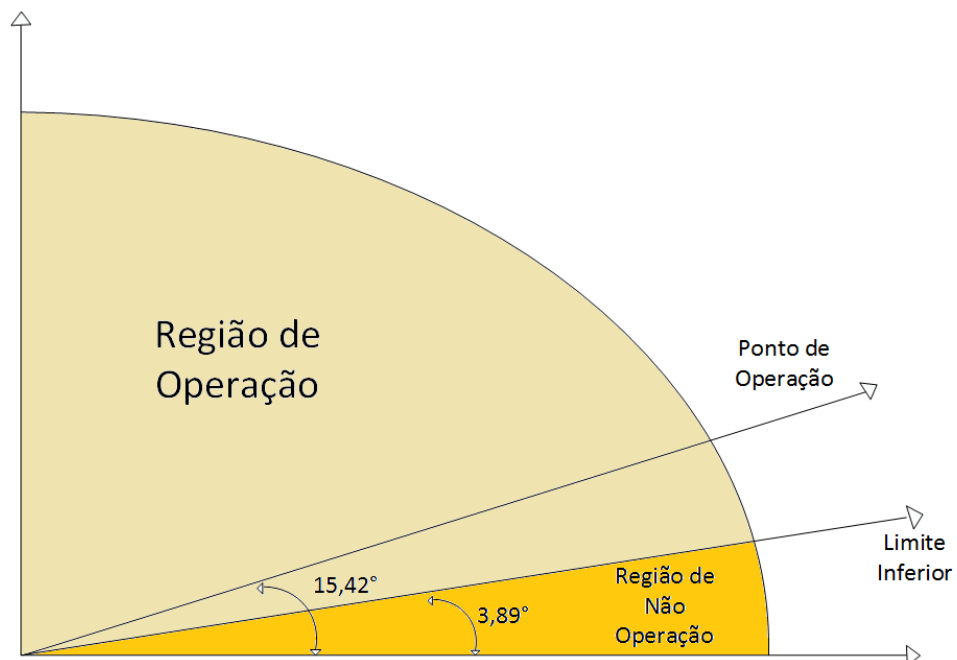


Figura 28 – Região de operação do Conversor *Boost*.

5.2.3 Simulações

Para as simulações do conversor *Boost*, foram utilizados os mesmos dados de radiação do verão e do inverno utilizados no conversor *Buck*. Relembrando que o conversor *Boost* é um conversor elevador, portanto, para manter a razão cíclica em 0,5 é necessário estabelecer uma tensão de saída de 60V.

Como o conversor *Boost* se caracteriza como uma fonte de corrente em sua entrada, não é necessário a utilização do filtro LC, visto que as indutâncias parasitas não afetarão o sinal enviado pelo painel ao conversor.

5.2.3.1 Verão

Foram utilizados dados de radiação do dia 16 de Fevereiro de 2014, vistos anteriormente na figura 5.

O circuito simulado no software PSIM é ilustrado pela figura 29.

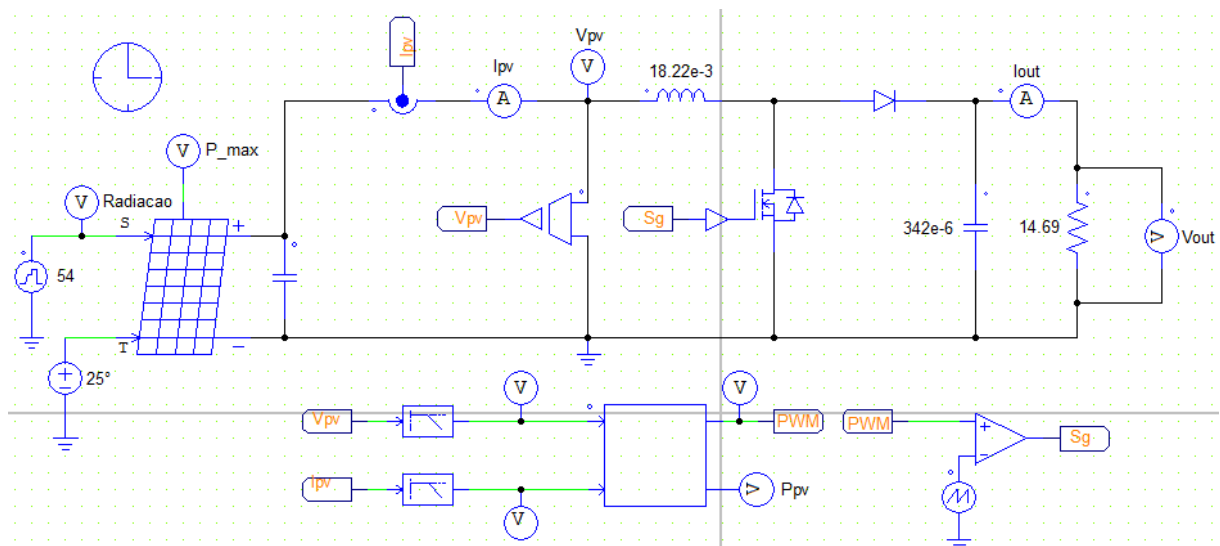


Figura 29 – Circuito Simulado no Software PSIM.

As figuras 30, 31, 32, 33 e 34 mostram os resultados obtidos após a simulação do circuito.

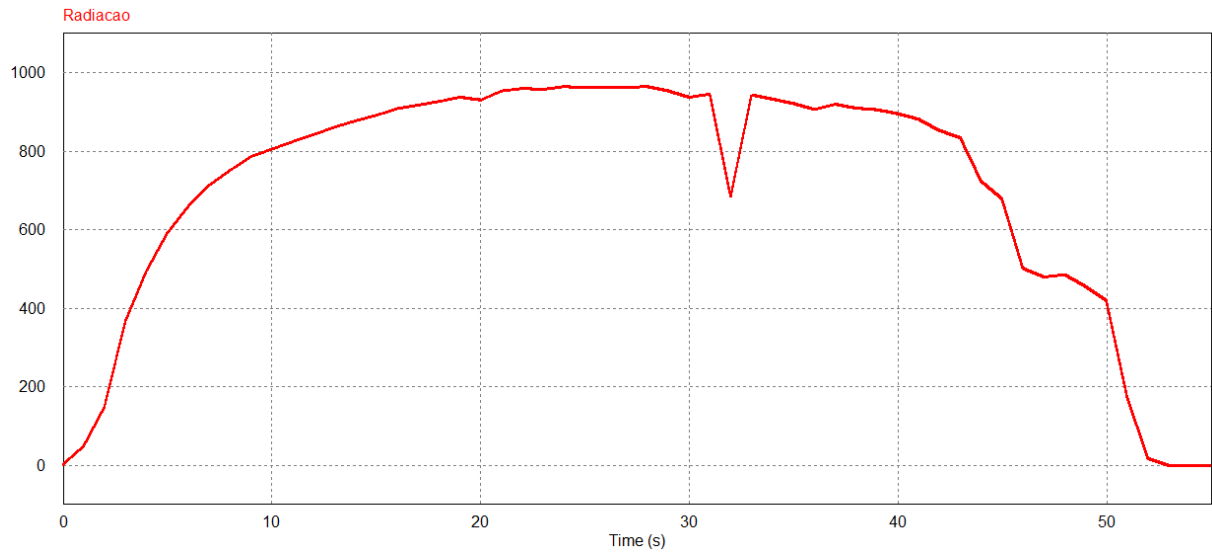


Figura 30 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM.

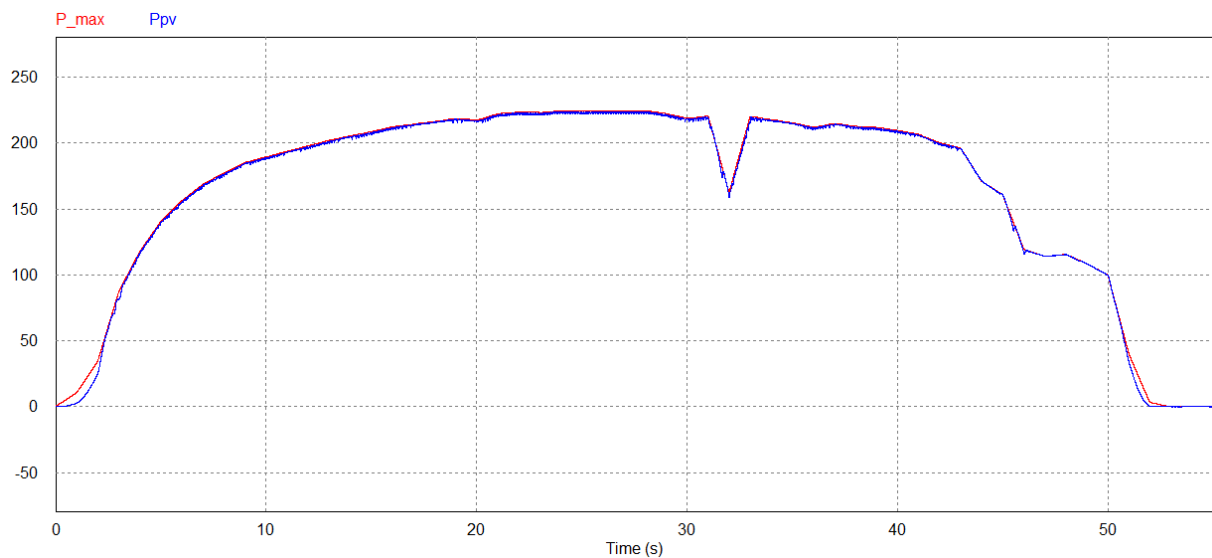


Figura 31 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul).

As figuras 30 e 31 mostram, respectivamente, a forma de onda de radiação utilizada na entrada do painel fotovoltaico, e a potência máxima (vermelho) e potência extraída do painel (azul).

Com relação à figura 31, é possível observar que o conversor *Boost* tem dificuldades em rastrear o ponto de máxima potência para radiações baixas, isto se deve a sua região de operação, vista anteriormente na equação 5.23. Para o ângulo

de $3,89^\circ$, a radiação correspondente é, em torno de, 230 W/m^2 . Então para valores abaixo de 230 W/m^2 , o conversor não consegue garantir o rastreamento do ponto de máxima potência, teoria comprovada na figura 31.

Para o restante dos valores de radiação, o conversor consegue rastrear satisfatoriamente o MPP durante o decorrer do dia.

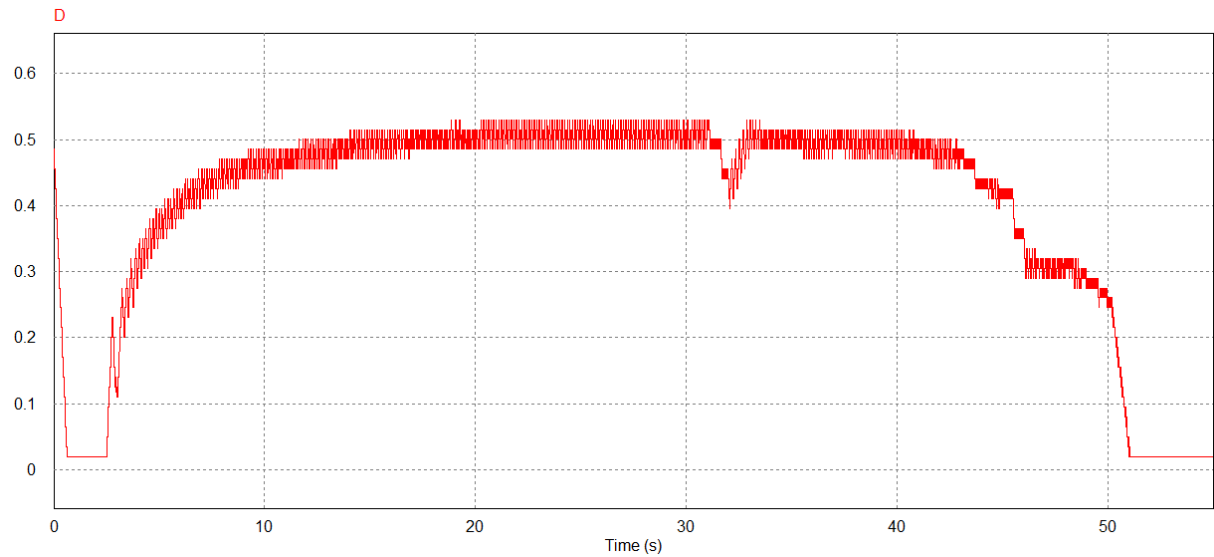


Figura 32 – Variação da Razão Cíclica.

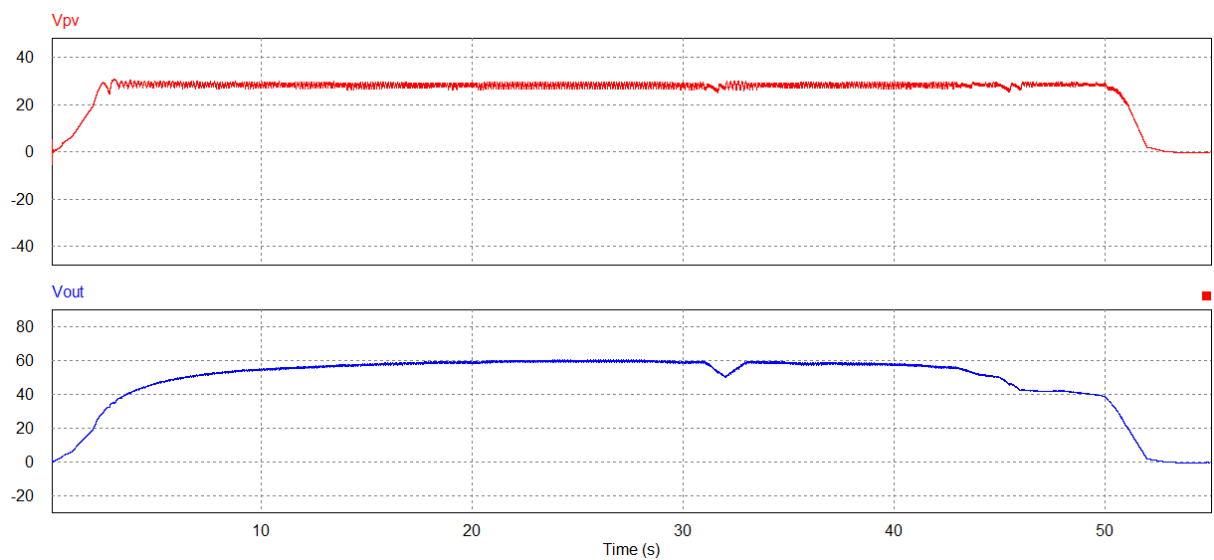


Figura 33 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul).

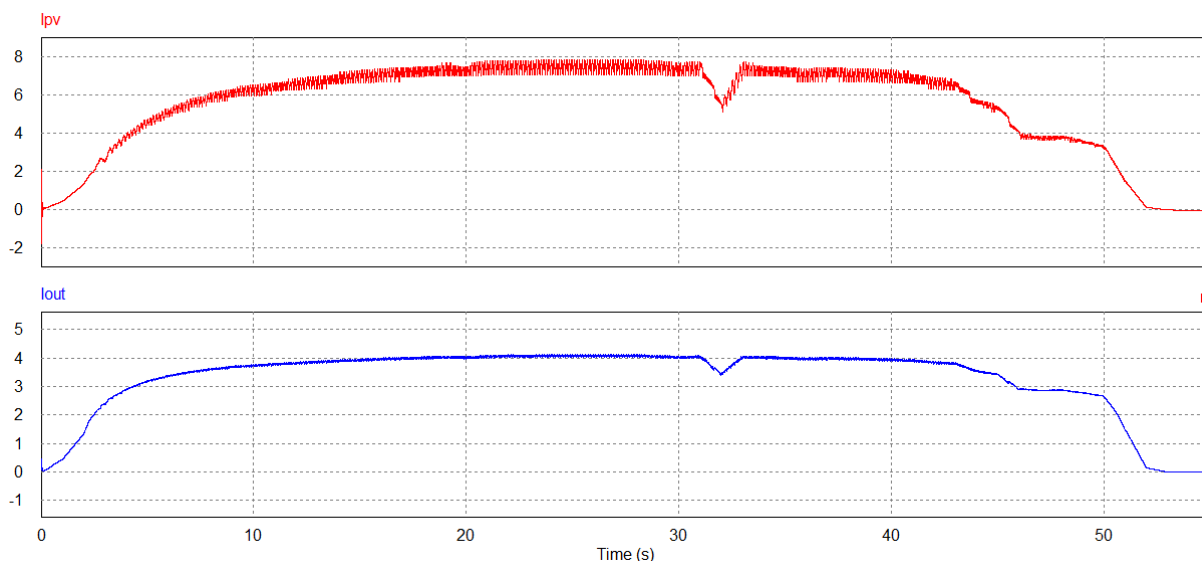


Figura 34 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul).

As figuras 32, 33 e 34 mostram, respectivamente, a razão cíclica do conversor, a tensão de entrada (vermelho) e a tensão de saída (azul), e a corrente de entrada (vermelho) e a corrente de saída (azul).

Com relação a tensão de entrada e saída, vemos que o conversor consegue perfeitamente elevar a tensão de entrada de 30 V para 60 V na tensão de saída.

Do mesmo modo que a tensão é elevada, a corrente de saída é reduzida frente a corrente de entrada.

5.2.3.2 Inverno

Foram utilizados dados de radiação do dia 12 de Julho de 2014, vistos anteriormente na figura 6.

O circuito simulado no software PSIM é o mesmo simulado anteriormente no verão, ilustrado pela figura 29.

Os resultados obtidos estão expostos nas figuras 35, 36, 37, 38 e 39.

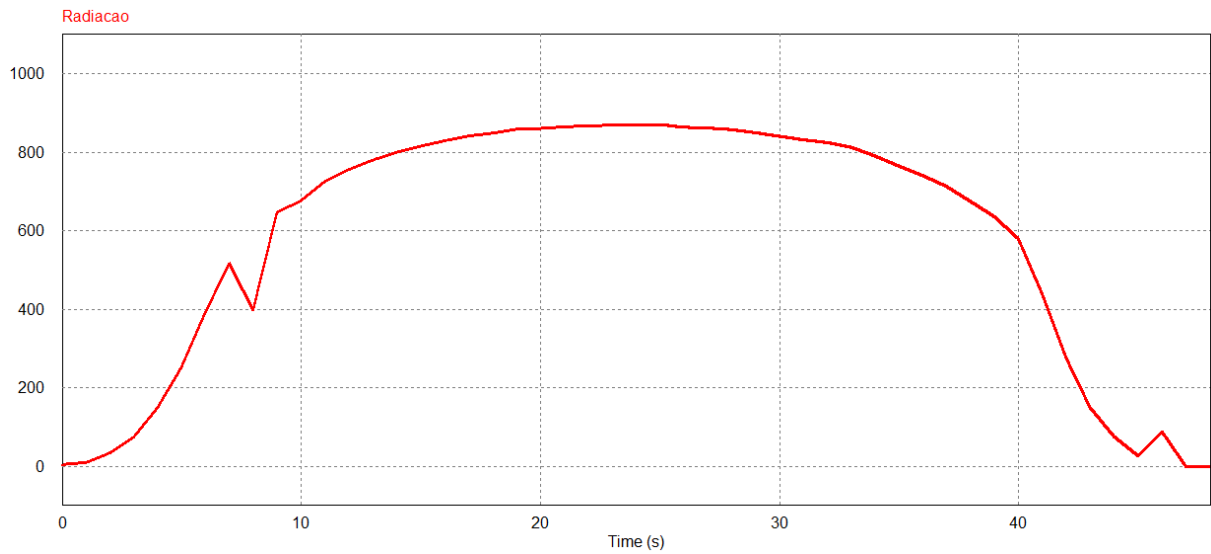


Figura 35 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM.

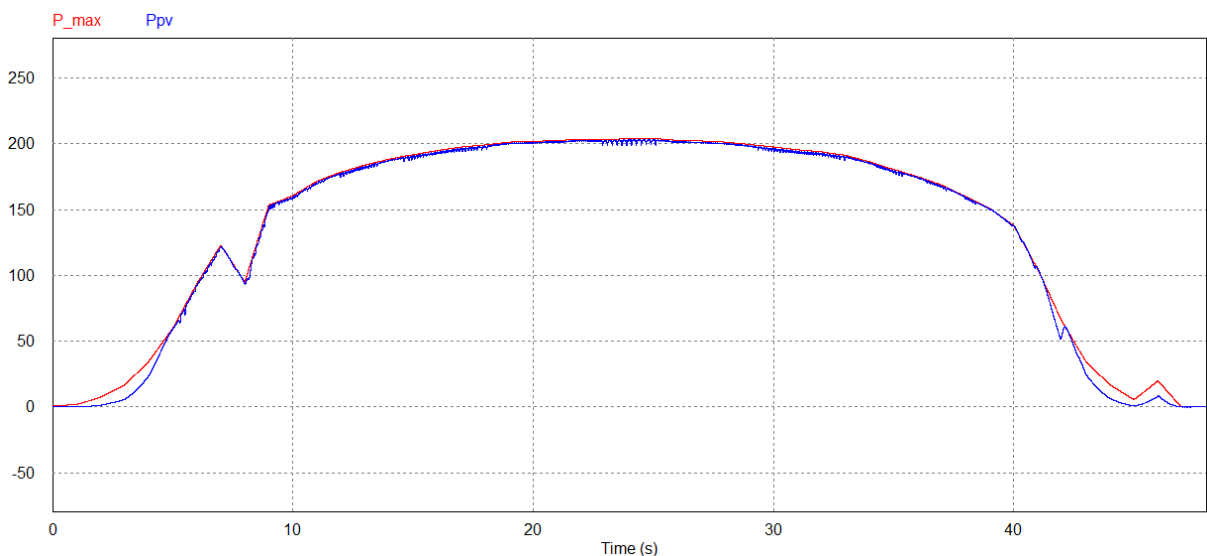


Figura 36 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul).

As figuras 35 e 36 mostram, respectivamente, a forma de onda da radiação e, a potência máxima (vermelho) e a potência extraída do painel (azul).

Novamente, o conversor *Boost* apresentou dificuldades para rastrear a máxima potência em radiações baixas, fato explicitado e explicado anteriormente. Porém, ao restante do dia, o conversor consegue rastrear o ponto de máxima potência satisfatoriamente.

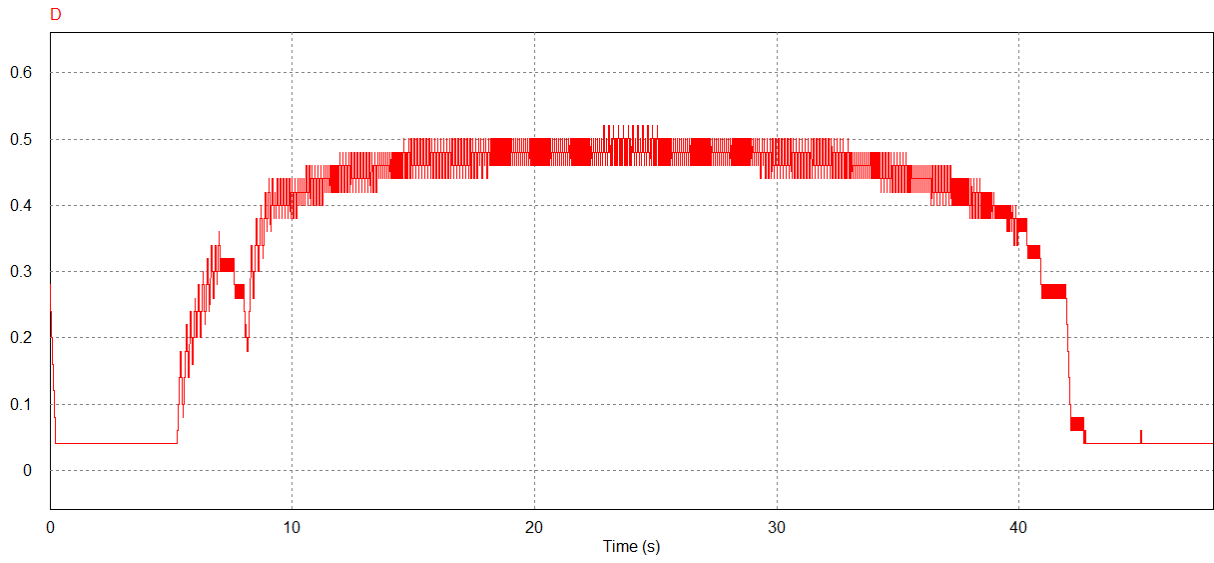


Figura 37 – Variação da Razão Cíclica.

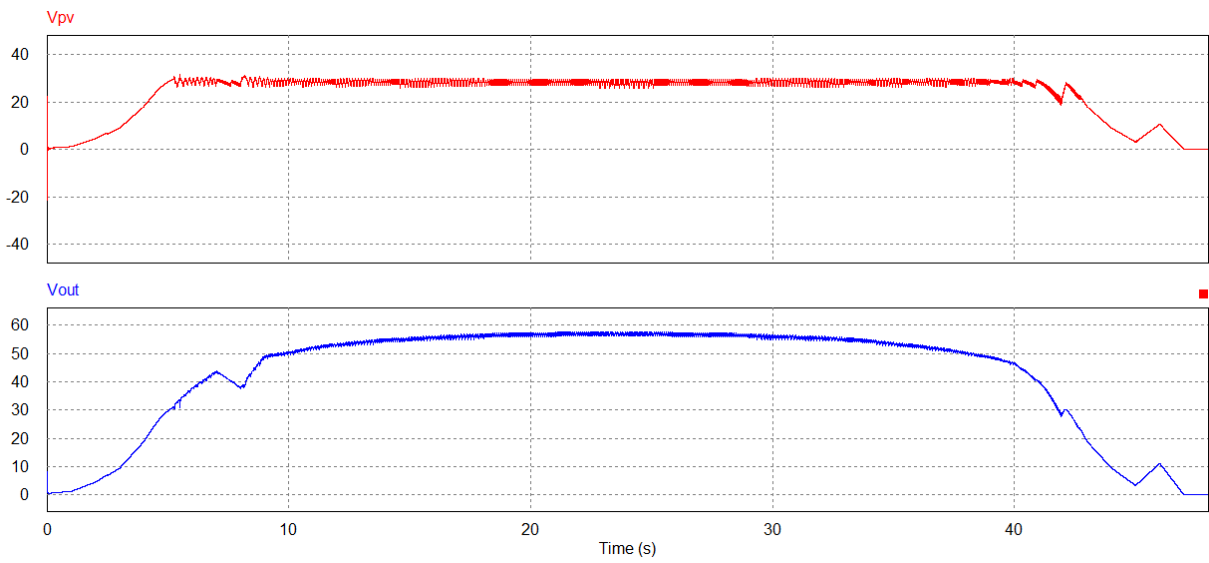


Figura 38 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul).

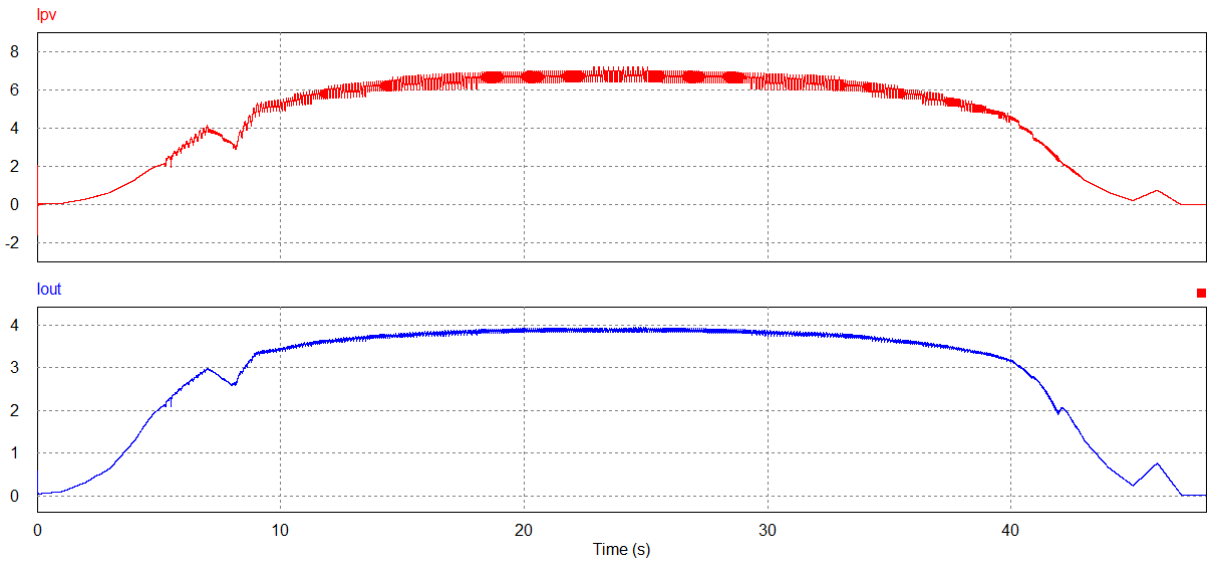


Figura 39 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul).

As figuras 37, 38 e 39 apresentam, respectivamente, a razão cíclica, tensões e correntes de entrada (vermelho) e saída (azul).

5.3 Conversor *Buck-Boost*

A seguir, serão apresentados o dimensionamento dos componentes e os resultados obtidos em simulação para o conversor *Buck-Boost*.

5.3.1 Projeto e Dimensionamento

Para o dimensionamento dos componentes do conversor *Buck-Boost*, foi estipulada uma razão cíclica de 0,5, conforme visto nos outros conversores. Isto resulta em uma tensão de saída de V_{out} de 30 V, mesmo valor da tensão de entrada V_{in} .

Para os cálculos seguintes, foram utilizados os valores de potência, tensão e corrente de entrada, vistos na tabela 2. Resultando nos valores ilustrados na tabela 8.

Tabela 8. Especificação do projeto do conversor Buck-Boost.

| Grandeza | Valor |
|-------------------------------------|--------------|
| Potência de Saída (P_{out}) | 245 W |
| Tensão de Entrada (V_{in}) | 29,8 V |
| Corrente de Entrada (I_{in}) | 8,23 A |
| Tensão de Saída (V_{out}) | 30 V |
| Frequência de Chaveamento (F_c) | 10 KHz |

Utilizando-se da metodologia vista anteriormente, vista em [12] e [14], têm-se os seguintes valores abaixo.

- Corrente de Saída:

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{245}{30} = 8,16 \text{ A} \quad (5.25)$$

- Resistência da Carga:

$$R_{carga} = \frac{V_{out}}{I_{out}} = \frac{30}{8,16} = 3,67\Omega \quad (5.26)$$

- Razão Cíclica de Operação:

$$D = \frac{V_{out}}{(V_{out} + V_{in})} = \frac{30}{30 + 29,8} = 0,501 \quad (5.27)$$

- Ondulação Máxima de Corrente de Entrada:

$$\Delta I_{Linmax} = 0,1 * I_{in} = 0,1 * 8,23 = 0,823 \quad (5.28)$$

- Ondulação Máxima de Corrente de Saída:

$$\Delta I_{Loutmax} = 0,1 * I_{out} = 0,1 * 8,16 = 0,816 \quad (5.29)$$

- Ondulação Máxima de Tensão de Entrada:

$$\Delta V_{Cinmax} = 0,1 * V_{in} = 0,1 * 29,8 = 2,98 \quad (5.30)$$

- Ondulação Máxima de Tensão de Saída:

$$\Delta V_{Coutmax} = 0,1 * V_{out} = 0,1 * 30 = 3 \quad (5.31)$$

- Capacitor de Entrada do Filtro LC:

$$C_{filtro} = \frac{I_{out}}{4 * F_c * \Delta V_{Cinmax}} = \frac{8,16}{4 * 10000 * 2,98} = 68,5\mu F \quad (5.32)$$

- Indutor de Entrada do Filtro LC:

$$L_{filtro} = \frac{8,16}{31 * 10000^2 * 68,5\mu * 0,823} = 46,72\mu H \quad (5.33)$$

- Capacitor de Saída do Conversor *Buck*:

$$C = \frac{I_{out} * D}{F_c * \Delta V_{Coutmax}} = \frac{8,16 * 0,5033}{10000 * 3} = 136,5\mu F \quad (5.34)$$

- Indutor do Conversor *Buck*:

$$L = \frac{V_{in}}{4 * F_c * \Delta I_{Loutmax}} = \frac{29,8}{4 * 10000 * 0,816} = 912,2 \mu H \quad (5.35)$$

A tabela 9 apresenta de forma resumida todos os componentes do conversor *Buck-Boost* calculados anteriormente.

Tabela 9. Componentes do conversor Buck-Boost.

| Grandeza | Valor |
|---------------------------------------------|--------------|
| <i>Razão Cíclica</i> | 0,5033 |
| <i>Carga</i> | 3,67 Ω |
| <i>Indutor do Filtro LC</i> | 46,72 μH |
| <i>Capacitor do Filtro LC</i> | 68,5 μF |
| <i>Indutor do Conversor Buck</i> | 912,2 μH |
| <i>Capacitor de Saída do Conversor Buck</i> | 136,5 μF |

5.3.2 Região de Operação do Conversor Buck-Boost

Do mesmo modo que os conversores *Buck* e *Boost*, o conversor *Buck-Boost* possui uma região de operação que garante que o ponto rastreado será o ponto de máxima potência. A região de operação é determinada pela razão cíclica do conversor e pela carga.

Considerando a razão cíclica e carga previamente determinadas nas equações 5.26 e 5.27, tem-se:

- Ângulo de operação:

$$\theta = \text{Atan} \frac{D^2}{(1-D)^2 * R} = \frac{0,5016^2}{(1-0,5016)^2 * 3,67} = 15,42^\circ \quad (5.36)$$

Para determinar a região máxima e mínima de operação, considera-se D como sendo 0 e 1.

- Para $D = 0$, têm-se:

$$\theta_{min} = \text{Atan} \frac{D^2}{(1-D)^2 * R} = \frac{0^2}{(1-0)^2 * 3,67} = 0^\circ \quad (5.37)$$

- Para $D = 1$, têm-se:

$$\theta_{max} = \text{Atan} \frac{D^2}{(1-D)^2 * R} = \frac{1^2}{(1-1)^2 * 3,67} = 90^\circ \quad (5.38)$$

Após delimitar a região máxima e mínima de operação, percebe-se que o conversor *Buck-Boost* é capaz de operar em toda a região delimitada pela razão cíclica, ou seja, ele é capaz de operar desde a razão cíclica zero até a razão cíclica um.

A figura 40 mostra a região de operação do conversor *Buck-Boost*, bem como o seu ângulo de operação.

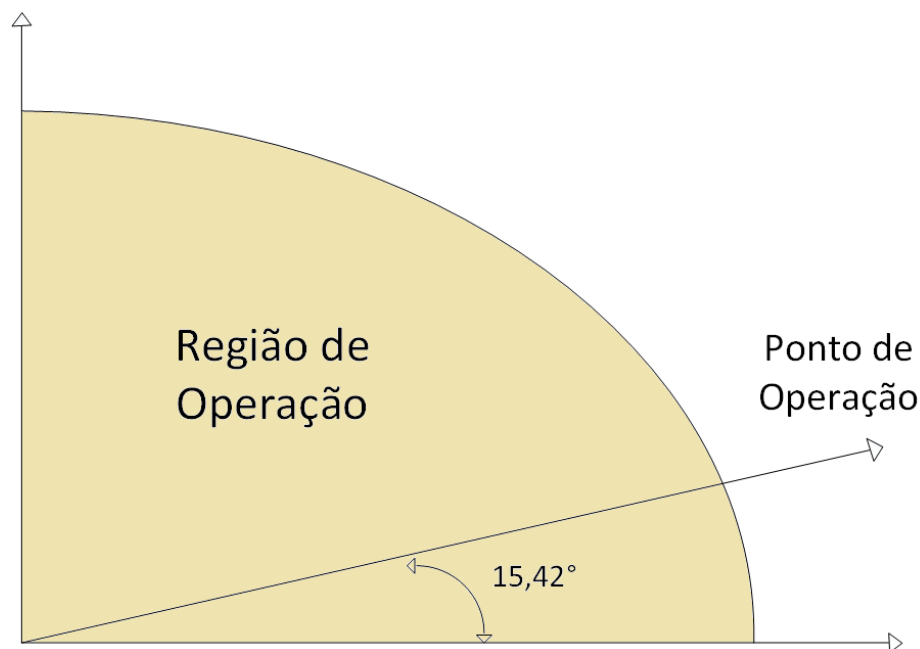


Figura 40 – Região de operação do Conversor *Buck-Boost*.

Na prática vemos que é praticamente impossível operar exatamente na razão cíclica zero e ou um, visto que os conversores possuem perdas que alteram a curva de ganho vista na seção 3.4.

5.3.3 Simulações

Para as simulações do conversor *Buck-Boost*, foram utilizados os mesmos dados de radiação solar utilizados para os outros conversores. Da mesma forma que, foram feitas simulações para o verão e para o inverno.

5.3.3.1 Verão

Foram utilizados dados de radiação do dia 16 de Fevereiro de 2014, vistos anteriormente na figura 5.

O circuito simulado no software PSIM é ilustrado pela figura 41.

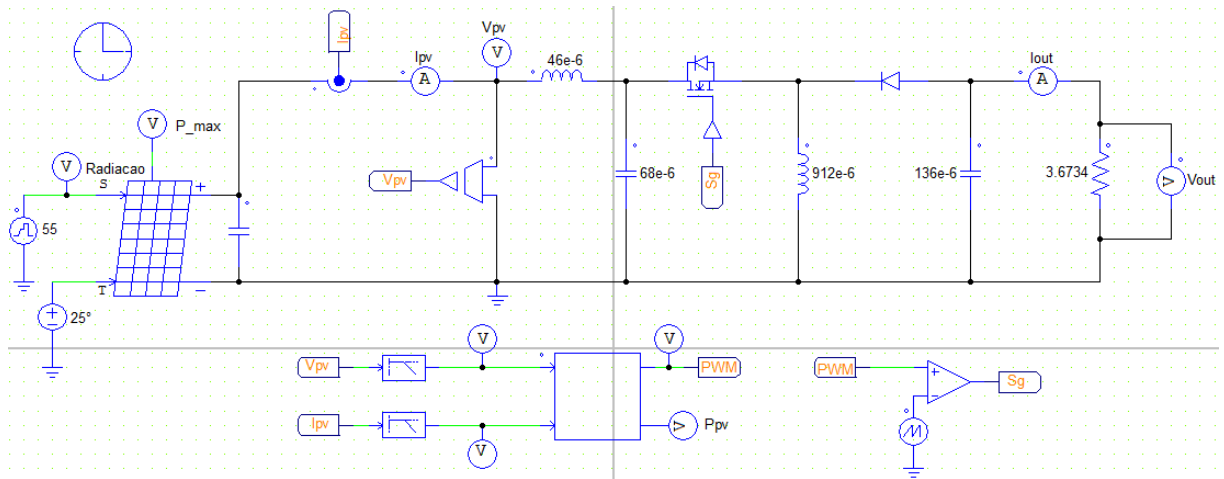


Figura 41 – Circuito Simulado no Software PSIM.

Os resultados obtidos após a simulação do circuito estão ilustrados pelas figuras 42, 43, 44, 45 e 46 abaixo.

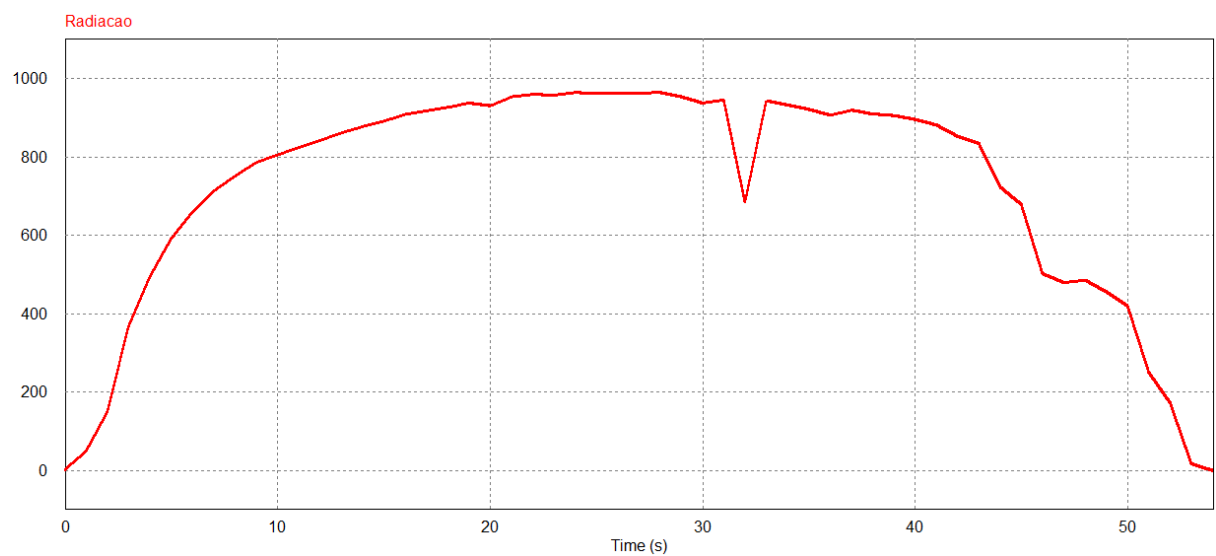


Figura 42 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM.

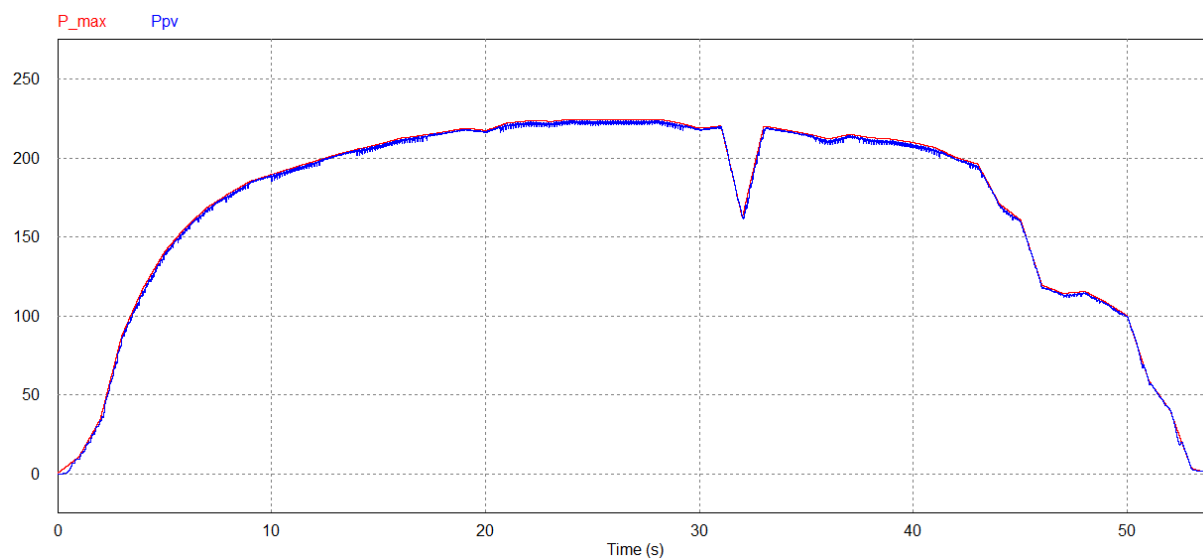


Figura 43 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul).

As figuras 42 e 43 mostram, respectivamente, a curva de radiação, e a potência máxima (vermelho) e potência extraída do painel (azul).

Conforme esperado, o conversor *Buck-Boost* consegue operar durante toda a faixa de radiação solar ao longo do dia, pois sua área de operação abrange toda a faixa de radiações incidentes possíveis.

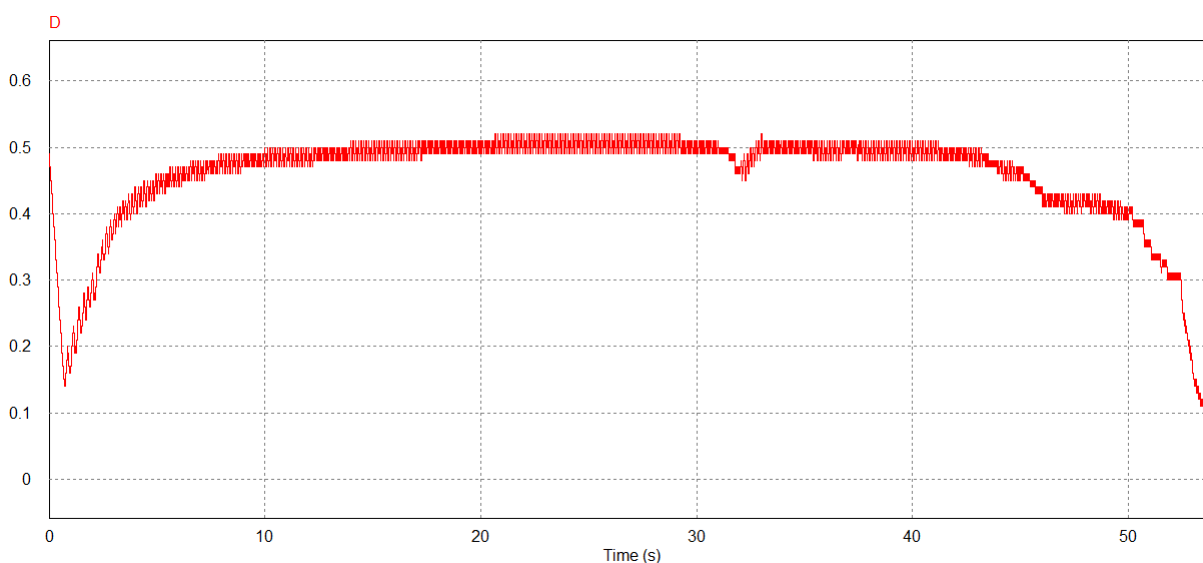


Figura 44 – Variação da Razão Cíclica.

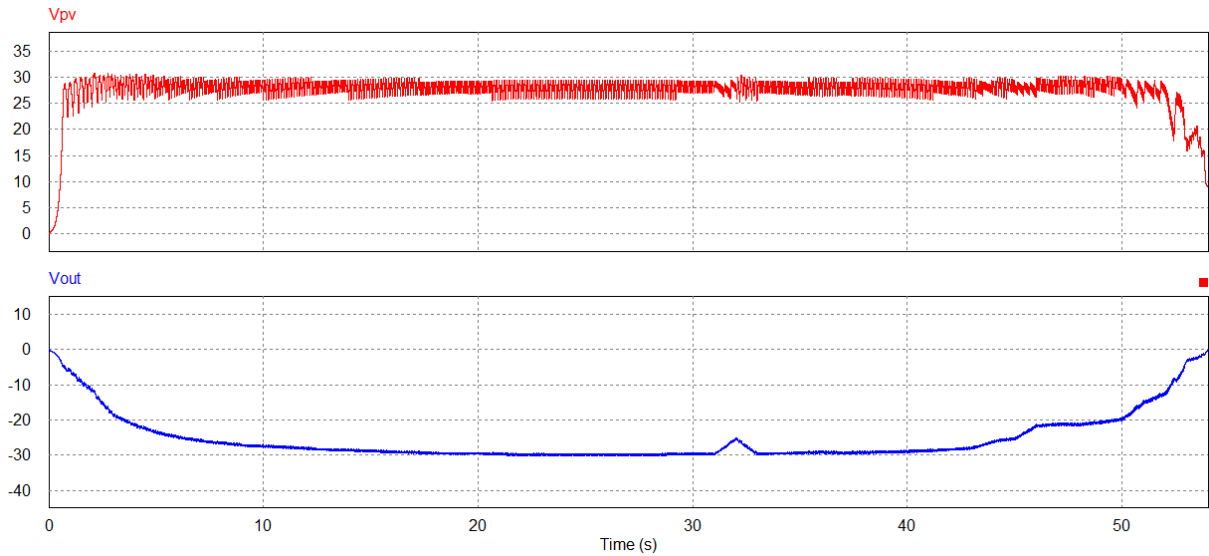


Figura 45 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul).

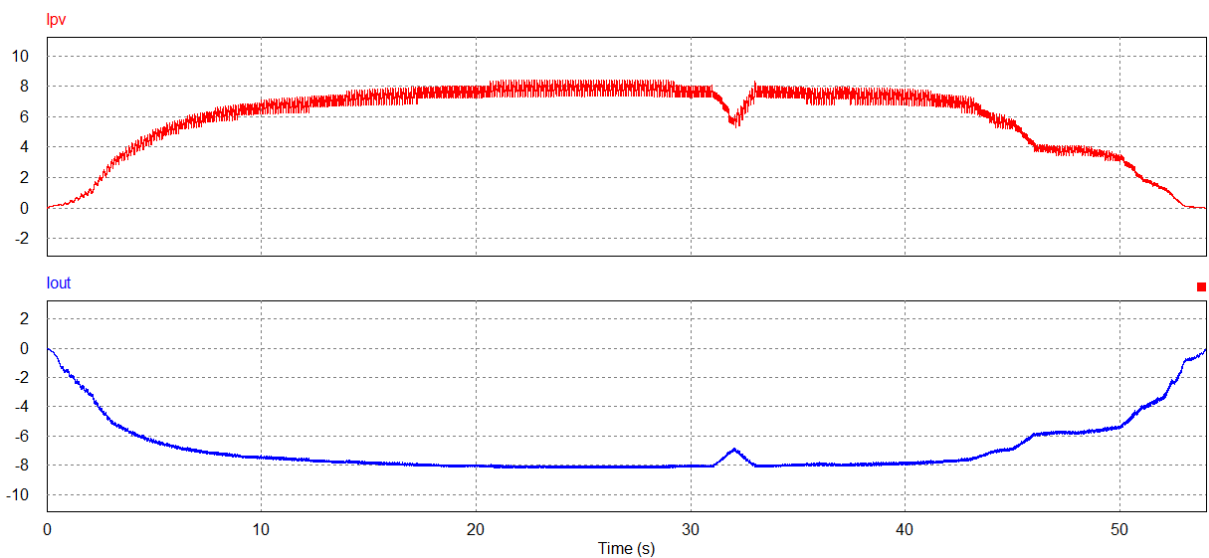


Figura 46 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul).

As figuras 44, 45 e 46 mostram, respectivamente, a razão cíclica, tensões e correntes de entrada (vermelho) e saída (azul).

O conversor *Buck-Boost*, conforme visto em teoria, tem por característica uma saída com polarização inversa, ou seja, os sinais obtidos na saída são negativos, ao contrário dos outros conversores abordados.

A tensão e corrente de saída se comportam como o esperado, tendo na saída do conversor os mesmos valores da sua entrada.

5.3.3.2 Inverno

Para a estação climática do inverno, foram utilizados dados de radiação do dia 12 de Julho de 2014, ilustrados na figura 6.

O circuito a ser simulado é o mesmo simulado para a estação verão, visto anteriormente na figura 41.

As figuras 47, 48, 49, 50 e 51 ilustram os resultados obtidos após a simulação do circuito.

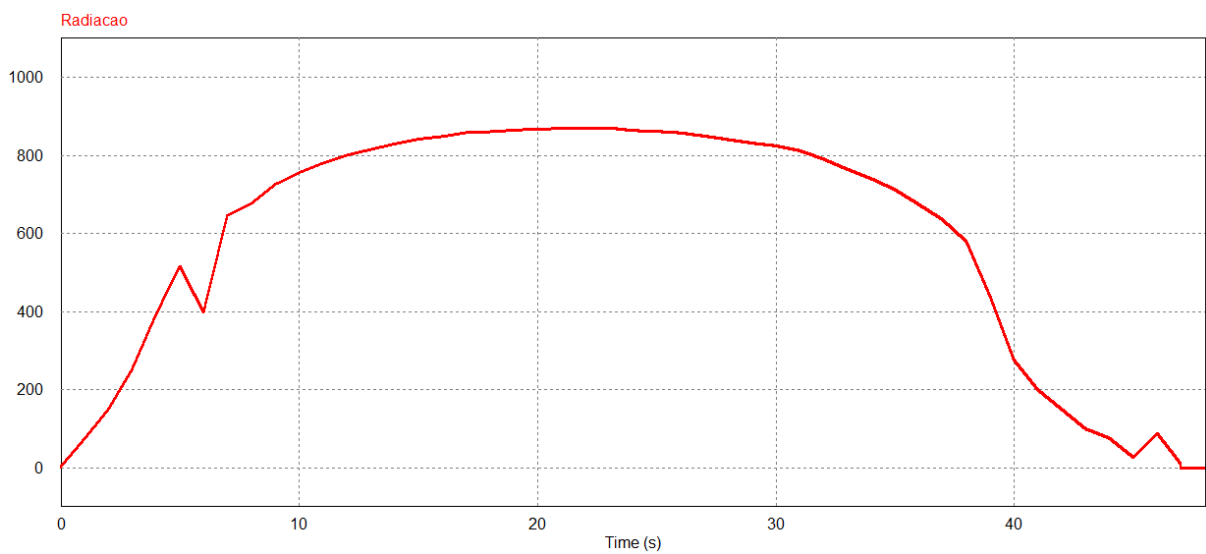


Figura 47 – Radiação Solar Simulada no Software PSIM.

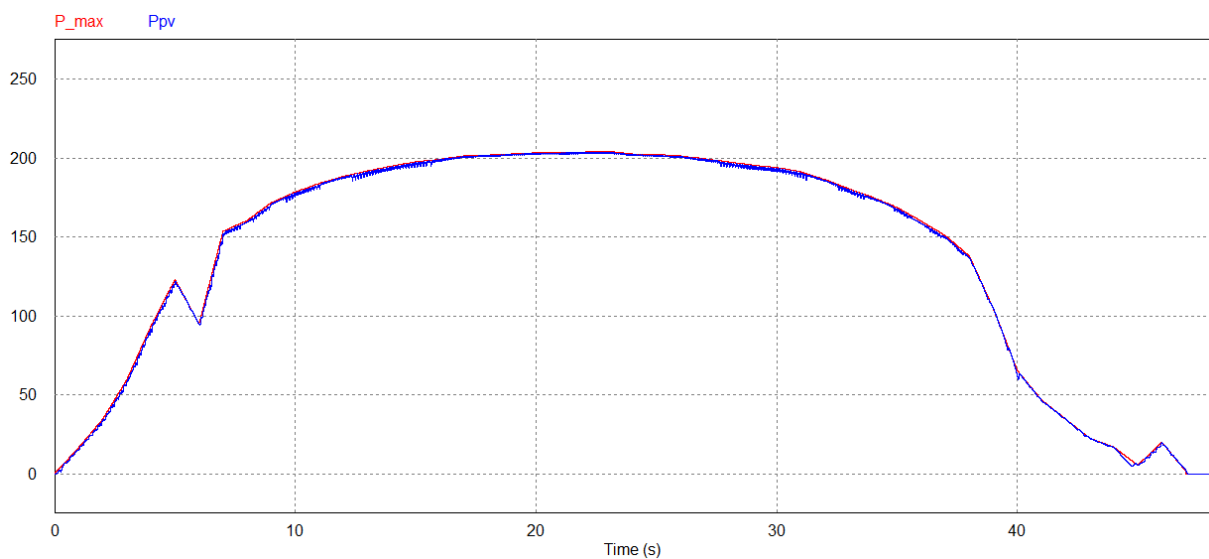


Figura 48 – Potência Máxima do Painel Fotovoltaico (Vermelho) e Potência Entregue à Carga (Azul).

As figuras 47 e 48 mostram, respectivamente, a curva de radiação solar e a potência máxima(vermelho) e potência extraída do painel(azul).

Do mesmo modo que na estação verão, vê-se que o conversor *Buck-Boost* consegue rastrear a potência máxima em toda faixa de radiação solar durante o decorrer do dia.

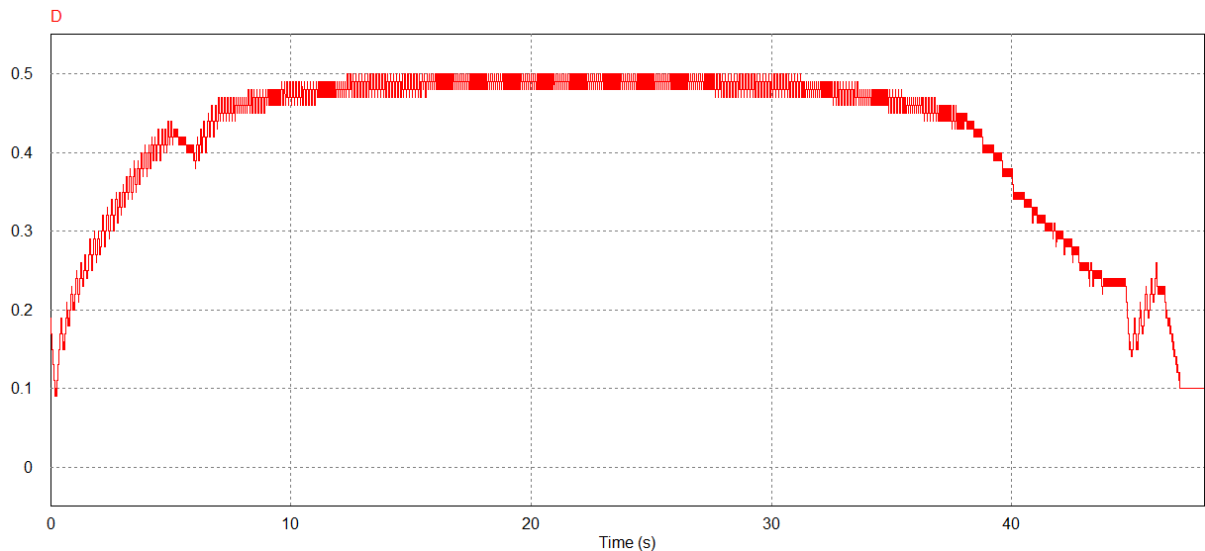


Figura 49 – Variação da Razão Cíclica.

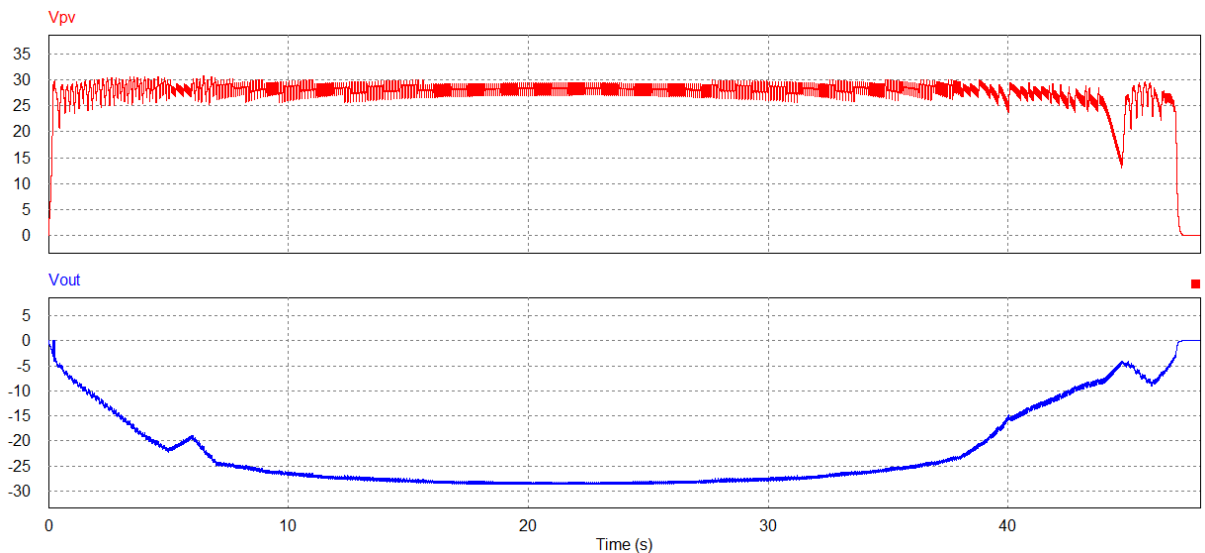


Figura 50 – Tensão de Entrada do Sistema (Vermelho) e Tensão de Saída (Azul).

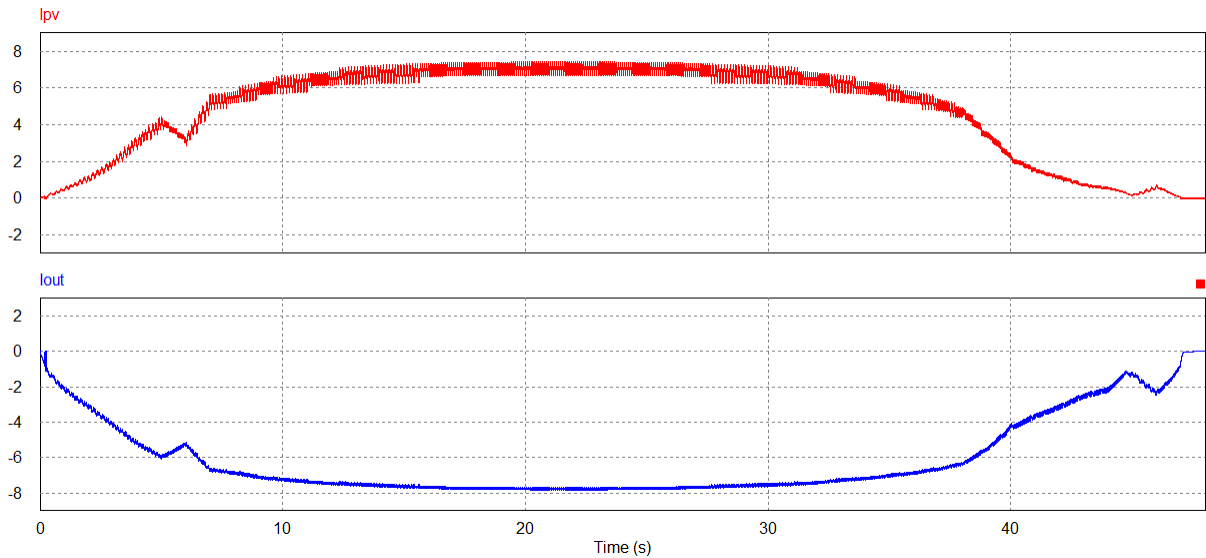


Figura 51 – Corrente de Entrada do Sistema (Vermelho) e Corrente de Saída (Azul).

As figuras 49, 50 e 51 mostram, respectivamente, a razão cíclica do conversor, as tensões e as correntes de entrada (vermelho) e saída (azul).

5.4 Conclusão

Este Capítulo apresentou os resultados teóricos obtidos através das simulações realizadas. Com base na teoria abordada, metodologia utilizada e resultados das simulações realizadas. Conclui-se que, tanto o conversor *Buck*, como o conversor *Boost* e o conversor *Buck-Boost*, operando tanto na estação climática verão quanto na estação climática inverno, conseguem satisfatoriamente extrair a potência máxima gerada pelo painel fotovoltaico durante quase todo o período de radiação solar incidente. O conversor *Boost*, por possuir sua região de operação a partir de um determinado ângulo até 90° , não consegue extrair satisfatoriamente a máxima potência para radiações baixas, no caso deste trabalho, radiações menores que 250 W/m^2 , fato comprovado nas simulações. Já o conversor *Buck* apresenta dificuldades em extrair a máxima potência para radiações altas. Porém, isso não ficou claro nas simulações porque a região de operação do sistema ficou dentro da região de operação do conversor *Buck*. Caso a região de operação ficasse acima da região máxima de operação do conversor, o sistema não conseguiria rastrear o ponto de máxima potência durante todo o dia.

O conversor *Buck-Boost*, como esperado, conseguiu rastrear a máxima potência durante todo o dia para as duas estações climáticas sem maiores dificuldades. Considerando que este conversor opera satisfatoriamente dentro de toda a faixa que compreende desde o ângulo zero até 90°, pode-se concluir que este conversor, assim como os demais, tiveram grande êxito dentro das suas limitações.

O método de perturbação e Observação (P&O) se mostrou eficiente mesmo frente às variações de radiação mais bruscas, mantendo uma faixa reduzida de erro em regime permanente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma análise comparativa entre três conversores CC-CC básicos, utilizando dados reais de radiação solar fotovoltaicas da região central do estado do Rio Grande do Sul.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que os três conversores analisados tiveram um rendimento bastante satisfatório, dentro das suas limitações. Com base nesse ponto, julga-se por escolha de um ou outro a análise prévia da carga à qual o conversor será submetido e a tensão de saída desejada. A partir dessas análises, pode-se fazer a escolha mais adequada entre os três para a aplicação desejada.

O método de perturbação e observação (P&O) se mostrou extremamente eficiente para as faixas de radiação solar utilizadas neste trabalho, mantendo um erro em regime permanente bastante reduzido e mesmo assim, não perdendo desempenho no rastreamento do ponto de máxima potência.

Por fim, o autor espera ter contribuído de alguma forma para futuros trabalhos e projetos na área de energia fotovoltaica, demonstrando que mesmo com conversores de baixo custo e métodos de rastreamento simples, podem-se obter ótimos desempenhos tanto na região do Rio Grande do Sul como, provavelmente, no restante do território brasileiro.

6.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, identificam-se algumas possibilidades:

- Abrangência de mais conversores CC-CC para análise de eficiência e desempenho a partir da utilização de dados reais de radiação;
- Análise dos conversores CC-CC para dados de radiação solar diferentes dos utilizados neste trabalho;
- Construção de protótipos dos três conversores analisados, a fim de se comprovar na prática ou resultados obtidos em simulação;
- Modelagem de um conversor CC-CA, a fim de se conectar o sistema fotovoltaico a rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] **Consumo nacional de eletricidade vai crescer 4,5% ao ano na próxima década.** Empresa de Pesquisa Energética, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120104_3.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2014.
- [2] **Financiamento e Tributação Ainda são Entraves para a Energia Solar no Brasil.** Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2014. Disponível em: <<http://energiainteligenteufjf.com/2014/07/04/financiamento-e-tributacao-ainda-sao-entraves-para-a-energia-solar-no-brasil/>>. Acesso em: 20 nov. 2014.
- [3] **Mais de 200 GW de energia solar fotovoltaica até final de 2014.** Portal Energia, 2014. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/mais-de-200-gw-de-energia-solar-fotovoltaica-ate-final-de-2014/>>. Acesso em: 20 nov. 2014.
- [4] PINTO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** CRESESB. 530 f. Rio de Janeiro, 2014.
- [5] BLUE SOL. **O Efeito Fotovoltaico.** 2014. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico/>>. Acesso em: 20 nov. 2014.
- [6] **Processo de Obtenção de Energia a Partir do Efeito Fotovoltaico.** CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/images/tutorial_solar/Image89.gif>. Acesso em: 20 nov. 2014.
- [7] BÔAS, Matheus Gouveia Villas; MOTA, Alexandre de Assis. **Avaliação da Influência do Ângulo de Incidência Solar na Geração Fotovoltaica.** PUC Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: <<https://www.puccampinas.edu.br/websist/portal/ceatec/hidro/subprojetos/arquivos/Avaliacao-influencia-angulo-incidencia.pdf>>. Acesso em: 02 Dez. 2014.
- [8] ANEEL. **Energia Solar.** 2014. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 02 dez. 2014.
- [9] ELECTRÓNICA. **Radiação Global.** Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/mapas-radiacao-solar>>. Acesso em: 02 dez. 2014.
- [10] TEIXEIRA, Thiago Barçante. **Influência da Temperatura em Aglomerados Auto-Reconfiguráveis de Células Solares Fotovoltaicas.** 2008. 72 f. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [11] **Projeto SONDA.** INPE, São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

- [12] COELHO, Roberto Francisco. **Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos**. 176f. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [13] **Ligação em Paralelo de Painéis Solares**. MPPT SOLAR. Disponível em: <<http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>>. Acesso em: 20 dez. 2014.
- [14] BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**: 2° Ed, 377 f. Florianópolis, 2006.
- [15] COELHO, Roberto Francisco; MARTINS, Denizar Cruz; SANTOS, Walbermack. **Influence Of Power Converters On Pv Maximum Power Tracking Efficiency**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [16] IMHOFF, Johninon. **Desenvolvimento de Conversores estáticos Para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. 145 f. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- [17] CURRAL, Nuno Cruz de Lima. **Microinversor para módulos fotovoltaicos**. 2012. 124 f. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [18] CHAPMAN, Patrick L.; ESRAM, Trishan. **COMPARISON OF PHOTOVOLTAIC ARRAY MAXIMUM POWER POINT TRACKING TECHNIQUES**. IEEE Transactions On Power Electronics, v. 22, n. 02, p.439-449, 01 jun. 2007.