

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO FRANCISCO PERDONCINI

CONVERSOR CC-CC PARA APLICAÇÃO FOTOVOLTAICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2015

JOÃO FRANCISCO PERDONCINI

CONVERSOR CC-CC PARA APLICAÇÃO FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein

PATO BRANCO

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de diplomação intitulado **Conversor CC-CC para aplicação fotovoltaica** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora **Nº 77** de 2015.

Fizeram parte da banca os professores:

Carlos Marcelo De Oliveira Stein

Cesar Rafael Claure Torrico

Everton Luiz de Aguiar

DEDICATÓRIA

Indiscutivelmente preciso agradecer a minha mãe Elda, ao meu pai Lauri, e aos meus irmãos Gustavo e Rafael pode ter chegado até aqui. As barreiras ultrapassadas foram apenas mais uma etapa percorrida, mas o apoio de vocês às tornou mais fáceis.

Muito obrigado a todos os familiares e amigos que fizeram parte dessa incrível e inesquecível jornada. Uma jornada que não para por aqui, mas apenas segue um rumo diferente.

Muito obrigado a Família Marlene, que foi quem me viu crescer de perto, até alcançar o mundo!

Muito obrigado time Tatuagem, isso ai ainda vai sair!

Muito obrigado Brasília Team, o melhor time do Brasil, só camisa 10!

Muito obrigado time Só Brodi, o time coração de mãe!

Muito obrigado time da Velha Guarda, onde se tem potencial para construir um poderio!

Muito obrigado time Orivaldo, a minha vez também chegou!

Muito obrigado time Carnaval I/II/III..., realmente as coisas acontecem!

Muito obrigado ao Time Primeira República, pelo acolhimento e conselhos iniciais.

Muito obrigado Time 2009/01 por todos os acontecimentos e ensinamentos memoráveis.

Muito obrigado Atlético Engenharia, foram vários anos de muita alegria!

Muito obrigado ao time Faxinal, sempre presente e operante!

Muito obrigado time Tomorrowland, ano que vem tem de novo!

Thank you Afslaan 36 Team, you guys are crazy dudes!

Thank you The South African Team, we have changed lives, we have made history!

Muito obrigado time África! Vocês são meus corações!

Muito obrigado ao corpo docente da UTFPR – Campus Pato Branco, que viu um menino ingressar em 2009, e agora vê um homem capaz de fazer a diferença no mundo!

Muito obrigado pelos sorrisos de cada dia, pelo sol que brilha, pela chuva que molha, pela vida que nasce e pelo dia que amanhece!

EPÍGRAFE

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade”

Albert Einstein

RESUMO

PERDONCINI, João Francisco. Conversor CC-CC para aplicação fotovoltaica. 2015. 84 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

Esta monografia apresenta um estudo sobre conversores CC-CC para aplicação fotovoltaica, a fim de obter o máximo rendimento de painéis fotovoltaicos. O estudo parte do funcionamento dos conversores, onde foi feito um equacionamento para ser utilizado no projeto dos conversores Ćuk e SEPIC. Na área de painéis fotovoltaicos, são estudadas as características básicas de funcionamento, assim como foi feita uma análise da curva I-V e da curva P-V. Para encontrar o ponto de transferência de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) foi utilizado um algoritmo que tem seu funcionamento demonstrado no trabalho. A monografia descreve também através de simulações o funcionamento dos conversores, os resultados obtidos, e quais softwares e ferramentas foram utilizados.

Palavras-chave: Conversor CC-CC, MPPT, painel fotovoltaico, Conversor Ćuk e Conversor SEPIC.

ABSTRACT

PERDONCINI, João Francisco. DC-DC converter to photoelectric application. 2015. 84 p. Final paper - Electrical Engineering Course, Federal University of Technology - Paraná. Pato Branco, 2015.

This work consists a study about DC-DC converters, used in photoelectric application to obtain the maximum efficiency from the photoelectric panels. Initially it presented the converter operation mode. It presented an equating which was used on Ćuk's and SEPIC's project. Following is established the study about the basic characteristics of photoelectric panels and an analysis about the I-V curve and P-V curve. To get the Maximum Power Point Tracking was used an algorithm, which has its operation shown in this document. This work described the converters operation by simulation, and it also showed which software and tool it used.

Keywords: CC-CC converter, MPPT, photovoltaic panel, Ćuk Converter and SEPIC Converter.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Busca do ponto de máxima potência)
P&O	<i>Perturbation and Observation</i> (Perturbação e Observação)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama da geração até a distribuição.....	16
Figura 2 - Conversor $\hat{C}uk$	19
Figura 3 - Segundo estágio de operação do conversor $\hat{C}uk$	20
Figura 4 - Primeiro estágio de operação do conversor $\hat{C}uk$	21
Figura 5 – Formas de Ondas do Conversor $\hat{C}uk$. Sendo A = Etapa 1; B = Etapa 2..	21
Figura 6 - Forma de onda da corrente e tensão em C_0	27
Figura 7 - Conversor SEPIC.....	30
Figura 8 - Primeiro estágio de operação do conversor SEPIC.....	31
Figura 9 - Segundo estágio de operação do conversor SEPIC.....	31
Figura 10 - Formas de Ondas do Conversor SEPIC. Sendo A = Etapa 1; B = Etapa 2.....	32
Figura 11 - Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.	38
Figura 12 - Diodo de bypass: (a) por célula; (b) por conjunto de células.	39
Figura 13 - (a) Curva I-V típica de um painel fotovoltaico. (b) Curva P-V típica de um painel fotovoltaico.....	40
Figura 14 - Rendimento na utilização dos métodos de MPPT.....	42
Figura 15 - Fluxograma P&O.....	44
Figura 16 – Resposta de i_{L1} da FT e em malha aberta.....	50
Figura 17 - Diagrama de blocos.	50
Figura 18 - Circuito conversor $\hat{C}uk$	52
Figura 19 – Estratégia de controle.	52
Figura 20 - Potência máxima/obtida a $800W/m^2$	53
Figura 21 – (a) Zoom Figura 20. (b) Valores médios de potência.	54
Figura 22 – (a) Corrente no indutor L_1 e L_2 . (b) Valores RMS. (c) Valor máximo de corrente.	55
Figura 23 - (a) Formas de ondas de correntes em C_1 e C_0 . (b) Corrente RMS. (c) Valor máximo em C_1	56
Figura 24 – (a) Formas de ondas de correntes na chave S e no diodo D. (b) Corrente máxima na chave S. (c) Corrente máximo no diodo D.	57
Figura 25 - Formas de ondas de tensão nos componentes C_1 e C_0 . (b) Tensão média nos componentes. (c) Tensão de pico em C_1	58
Figura 26 – Transitórios de tensão e corrente.....	59
Figura 27 - Resposta de i_{L1} da FT e e em malha aberta.	63
Figura 28 - Circuito conversor SEPIC.	64
Figura 29 – Estratégia de controle.	64
Figura 30 - Potência máxima obtida a $800W/m^2$	65
Figura 31 - (a) Zoom Figura 30. (b) Valores médios de potência.	66
Figura 32 - (a) Corrente no indutor L_1 e L_2 . (b) Valores RMS. (c) Valor máximo de corrente.	67
Figura 33 – (a) Formas de ondas de correntes em C_1 e C_0 . (b) Corrente RMS. (c) Valor máximo em C_1 e C_0	67

Figura 34 - (a) Formas de ondas de correntes na chave S e no diodo D. (b) Corrente máxima na chave S. (c) Corrente máximo no diodo D.	68
Figura 35 - Formas de ondas de tensão nos componentes C1 e C0. (b) Tensão média nos componentes.	69
Figura 36 - Tensão e corrente da célula fotovoltaica.....	70
Figura 37 - Potência máxima/obtida a 1000W/m ²	77
Figura 38 – (a) Zoom Figura 37. (b) Valores médios de potência.	77
Figura 39 – (a) Corrente no indutor L1 e L2. (b) Valores RMS. (c) Valor máximo de corrente.	78
Figura 40 – (a) Formas de ondas de correntes na chave S e no diodo D. (b) Corrente máxima na chave S. (c) Corrente máximo no diodo D.	80
Figura 41 - Formas de ondas de tensão nos componentes C1 e C0. (b) Tensão média nos componentes. (c) Tensão de pico em C1.	80
Figura 42 – Transitórios de tensão e corrente.....	80
Figura 43 - Potência máxima obtida a 1000W/m ²	81
Figura 44 - (a) Zoom Figura 43. (b) Valores médios de potência.	81
Figura 45 - (a) Corrente no indutor L1 e L2. (b) Valores RMS. (c) Valor máximo de corrente.	82
Figura 46 – (a) Formas de ondas de correntes em C1 e C0. (b) Corrente RMS. (c) Valor máximo em C1 e C0.	82
Figura 47 - (a) Formas de ondas de correntes na chave S e no diodo D. (b) Corrente máxima na chave S. (c) Corrente máximo no diodo D.	83
Figura 48 - Formas de ondas de tensão nos componentes C1 e C0. (b) Tensão média nos componentes.	83
Figura 49 - Tensão e corrente da célula fotovoltaica.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações de projeto.....	45
Tabela 2 - Dados do Painel Fotovoltaico Kyocera KD245GH-4FB2.....	51
Tabela 3 - Resultados de projeto para incidência solar de 800W/m ²	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	REVISÃO TEÓRICA.....	18
2.1	CONVERSORES CC-CC.....	18
2.2	CONVERTOR ĆUK.....	19
2.2.1	Princípio de funcionamento.....	20
2.2.2	Formas de Onda	21
2.2.3	Equacionamento básico	22
2.2.3.1	Ganho estático.....	22
2.2.3.2	Ondulação da corrente de entrada	23
2.2.3.3	Ondulação da corrente no indutor L2.....	24
2.2.3.4	Tensão média no capacitor V_{C1}	25
2.2.3.5	Ondulação de tensão no capacitor $C1$	26
2.2.3.6	Ondulação de tensão na carga	26
2.2.4	Modelo matemático do Conversor Ćuk	28
2.3	CONVERTOR SEPIC	30
2.3.1	Princípio de funcionamento.....	30
2.3.2	Formas de Ondas.....	31
2.3.3	Equacionamento básico	32
2.3.3.1	Ganho Estático	32
2.3.3.2	Ondulação da corrente de entrada	33
2.3.3.3	Ondulação da corrente na indutância magnetizante	34
2.3.3.4	Ondulação nos capacitores C1 e C0	34
2.3.4	Modelo matemático do conversor SEPIC.....	36

2.4	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	37
2.4.1	Curva Características de um Painel Fotovoltaico.....	39
2.5	TÉCNICA DE RASTREIAMENTO DO PONTO MÁXIMO DE POTÊNCIA ...	41
2.5.1	Método de Perturbação e Observação (P&O).....	43
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
3	PROJETO DO CONVERSOR ĆUK.....	46
3.1	RAZÃO CÍCLICA.....	46
3.2	PROJETO	46
3.2.1	Dimensionamento dos indutores L1 e L2	46
3.2.2	Dimensionamento dos capacitores C1 e C0	47
3.2.3	Dimensionamento dos Semicondutores.....	48
3.2.4	Estratégia de Controle.....	49
3.3	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	51
3.3.1	Incidência solar de 800W/m ²	52
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
4	PROJETO DO CONVERSOR SEPIC.....	60
4.1	RAZÃO CÍCLICA.....	60
4.2	PROJETO	60
4.2.1	Dimensionamento dos indutores L1 e L2.....	60
4.2.2	Dimensionamento dos capacitores C1 e C0	61
4.2.3	Dimensionamento dos semicondutores	62
4.2.4	Estratégia de Controle.....	63
4.3	RESULTADOS E SIMULAÇÕES	64
4.3.1	Incidência Solar de 800W/m ²	65
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5	CONCLUSÕES.....	71
	REFERÊNCIAS.....	74

APÊNDICE A.....	77
APÊNDICE B.....	81

1 INTRODUÇÃO

A busca por energias renováveis nunca esteve tanto no foco das pesquisas científicas. A utilização de energias renováveis é uma necessidade de todos os empreendedores, visto que as fontes de combustíveis fósseis estão se esgotando e o preço para aquisição está em constante ascensão em virtude do acelerado crescimento da demanda de energia elétrica. Portanto o aperfeiçoamento nas pesquisas em energias renováveis tornou-se particularmente importante, e há muitos campos para serem explorados.

Os painéis fotovoltaicos, que são uma opção para produção de energia elétrica através de uma fonte primária renovável, são encontrados no mercado em pequena e grande escala de potência, se ajustando a vários projetos. A maioria desses projetos são de pequeno porte para consumo próprio, mas há a possibilidade de construção de grandes centros de geração, visto que há como realizar a transmissão dessa energia por vários quilômetros para a conexão com as redes de distribuição.

Um incentivo para a utilização de energias renováveis é a Resolução Normativa 482 da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamenta o mercado de energias renováveis do Brasil. A maior vantagem se dá pelo fato de não ser necessária a utilização de baterias para armazenamento da energia, uma vez que a instalação pode ser conectada diretamente à rede de distribuição, e assim o consumo de energia nesse ponto seria compensado pela energia gerada, impactando na conta mensal (ANEEL, 2012).

A maioria das pesquisas envolvendo energia solar são voltadas para melhorar o rendimento dos painéis solares, que ainda se encontra muito baixo (SEGUEL, 2009). E além de melhorar o rendimento, há técnicas para encontrar o ponto máximo de potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT). Essa técnica rastreia a tensão e a corrente máximas para se obter a máxima potência extraída do sol por um painel fotovoltaico.

Mas para poder utilizar a energia gerada por painéis fotovoltaicos há necessidade de utilização de alguns conversores CC-CC que controlem a tensão CC gerada. A topologia do conversor CC-CC para aproveitamento fotovoltaico varia conforme a aplicação. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos da geração até a

conexão com o banco de baterias, e/ou até o passo precedente a conversão CC/CA para conexão com a rede.

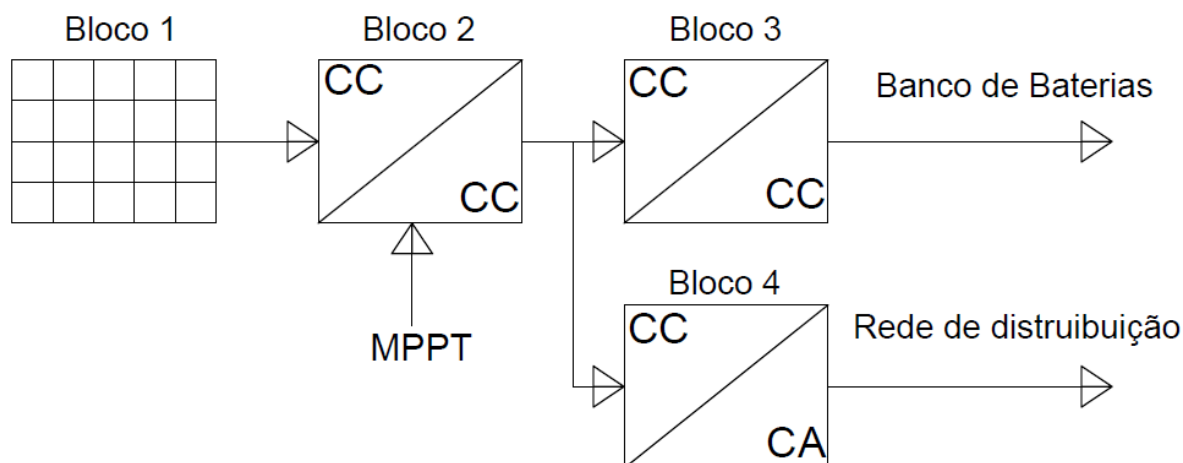


Figura 1 - Diagrama da geração até a distribuição.
Fonte: Autoria própria.

No primeiro bloco tem-se a simbologia de um painel fotovoltaico, que gera a tensão em corrente contínua de até 35 Volts (V) para painéis de até 250 Watts (W) de potência elétrica. Na sequência há um conversor CC-CC, que tem o objetivo de rastrear a potência máxima através do algoritmo de MPPT, sendo esse o conversor de estudo neste projeto.

Após extrair a potência máxima do painel com a utilização do primeiro conversor CC-CC, os próximos dois conversores trabalham com a estabilização da tensão. A tensão a ser estabilizada varia entre 150 e 250V. Dependendo da aplicação final, esta tensão pode ser rebaixada ou elevada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudo e projeto de conversor CC-CC aplicado à geração de energia fotovoltaica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar e analisar o funcionamento de painéis fotovoltaicos;
- Estudar um método MPPT que se encaixe no contexto de geração de energia solar;
- Estudar e projetar o conversor Cuk e o conversor SEPIC;
- Simular em malha fechada de ambos os conversores estudados, a fim de realizar uma comparação quantitativa ao término do projeto.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo, apresenta-se a introdução ao trabalho que foi realizado, e apresentam-se os objetivos gerais e específicos que se pretendem atingir. Adicionalmente, indica-se a estrutura deste documento.

No segundo capítulo consta a revisão teórica de todo o conteúdo abordado. Parte-se dos conversores CC-CC, e segue-se para painéis fotovoltaicos e MPPT na sequência.

No terceiro capítulo consta a caracterização do projeto e simulação do conversor Cuk, apresentando o desenvolvimento do conversor.

O quarto capítulo é a caracterização pelo projeto do conversor SEPIC, apresentando o desenvolvimento do conversor, assim como o resultado obtido em simulação.

E finalmente, no capítulo cinco, apresentam-se considerações finais, onde é feita uma avaliação de todo o projeto, assim como uma comparação entre os conversores e sugestões de possíveis projetos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

Através dos anos a utilização de energias renováveis tem aumentado, em virtude da escassez dos combustíveis fósseis, e também pelo incentivo governamental e fiscal para pesquisa e desenvolvimento de tal tecnologia.

A geração fotovoltaica de energia elétrica é um processo mais caro que a geração através de fontes hídricas. Porém tudo gira em torno da sua fonte, que é praticamente inesgotável, se tornando um processo viável. No entanto, como as células fotovoltaicas apresentam um baixo rendimento, é necessário técnicas para extrair o seu máximo de potência, buscando assim a tensão e a corrente máximas instantâneas para obter a maior potência. Essa técnica é conhecida como ponto máximo de potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT) (SEGUEL, 2009).

A tensão gerada nos painéis fotovoltaicos não é regulada. Para regular a tensão e obter o ponto de máxima potência é necessário um conversor CC-CC, que também possibilita o rastreamento da potência máxima através de um algoritmo MPPT. Entretanto, essas etapas são realizadas em conversores distintos, na maioria dos casos (POMILIO, 1995).

2.1 CONVERSORES CC-CC

Os conversores CC-CC são circuitos eletrônicos que fornecem uma tensão regulada na saída a partir de uma fonte de tensão não regulada, ou também podem trabalhar na obtenção do ponto máximo de potência. Há a possibilidade de funcionamento no modo contínuo, onde a corrente nos indutores nunca é nula. Outra possibilidade é operar no modo descontínuo, onde a corrente do diodo atinge o valor zero antes, ou no mesmo momento do término da comutação (YE; LUO, 2006).

A operação no modo descontínuo apresenta a desvantagem de ter um menor rendimento. Além disso, as correntes de pico são maiores, assim como as perdas no semicondutores (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2004).

A razão cíclica, também conhecida como *duty cycle*, é a razão entre o tempo em que a chave permanece fechada e o período, e é representada pela letra

D. Normalmente busca-se trabalhar em frequências de comutação mais elevadas, pois isso leva em conta os valores de indutância e capacitância, acarretando a utilização de componentes menores em questão de massa, volume e custo (HART, 2001).

Os conversores CC-CC que são estudados neste projeto, são as topologias Ćuk e SEPIC. Ambos os conversores são abaixadores-elevadores de tensão, e ambos contêm um indutor em série com a fonte de entrada; o que limita a variação brusca de corrente, facilitando a utilização do algoritmo MPPT.

O conversor Boost, também atenderia o requisito de elevador de tensão, com um indutor em série com a fonte de entrada. No entanto, os conversores Ćuk e SEPIC são conversores pouco explorados pela literatura, o que caracteriza uma motivação a mais ao projeto.

2.2 CONVERSOR ĆUK

O conversor CC-CC Ćuk, foi proposto em 1977 e é conhecido por esse nome devido ao seu inventor Dr. Slobodan Ćuk. A associação de um conversor Buck, juntamente com um conversor Boost é encarado como conversor Ćuk, que fornece uma tensão CC invertida na saída (BRITTO, 2009), (BARBI; MARTINS, 2006). A Figura 2 demonstra a estrutura do conversor Ćuk.

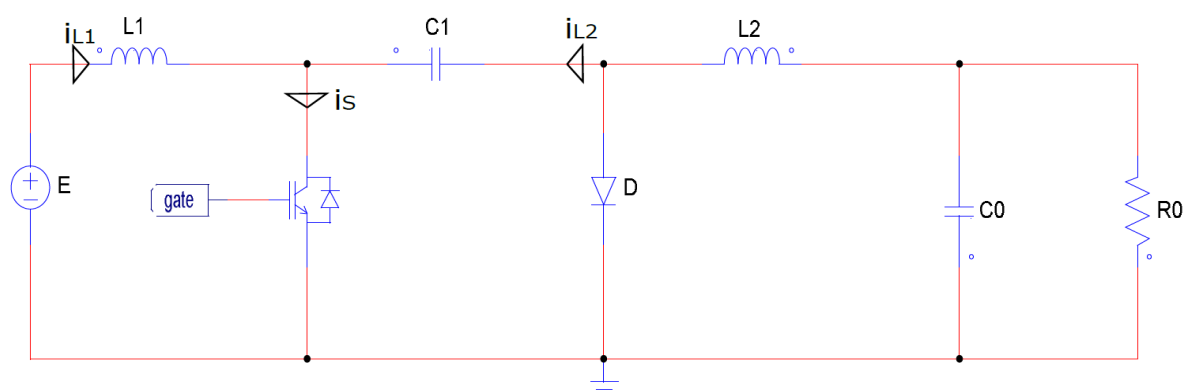


Figura 2 - Conversor Ćuk.
Fonte: Autoria Própria.

A entrada, tem característica de fonte de corrente, sendo caracterizado como um dipolo com capacidade de fornecer corrente independentemente da carga

em que estiver ligado. Essa entrada envia energia a um capacitor; com característica de fonte de tensão, que tem capacidade de fornecer tensão independentemente da ligação dos terminais (BRITTO, 2009), (BARBI; MARTINS, 2006).

A energia do capacitor é transferida para a carga, que apresenta característica de fonte de corrente. Devido a presença dos indutores, tem-se como grande vantagem: a não-pulsação de corrente, tanto na entrada, quanto na saída (BRITTO, 2009), (BARBI; MARTINS, 2006).

Ambos os indutores estão sujeitos a mesma tensão instantânea, assim é possível construí-los no mesmo núcleo. Esse eventual acoplamento magnético permite eliminar a ondulação de corrente em um dos enrolamentos (POMILIO, 1995).

2.2.1 Princípio de funcionamento

Em regime permanente o conversor opera em duas etapas. Na primeira etapa, a chave S é mantida fechada como mostrado na Figura 3, a energia da entrada é transferida para o indutor $L1$, que conseqüentemente tem a corrente aumentada. E como o diodo está polarizado inversamente, o mesmo permanece em estado de bloqueio. A energia acumulada pelo capacitor $C1$ é descarregada, e armazenada em $L2$. Conseqüentemente, as correntes nos indutores crescem linearmente (BARBI; MARTINS, 2006), (POMILIO, 1995).

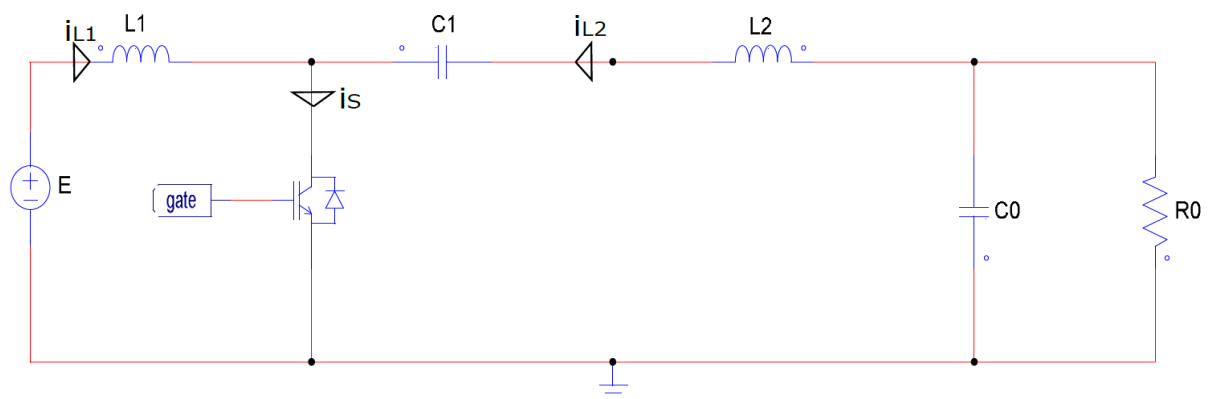


Figura 3 - Segundo estágio de operação do conversor Ćuk.
Fonte: Autoria Própria.

Na segunda etapa a chave S permanece aberta, como mostrado na Figura 4, assim i_{L1} e i_{L2} fluem pelo diodo, que agora está polarizado diretamente, enquanto $C1$ acumula carga provida da fonte de entrada e de $L1$, que tem sua corrente reduzida. Já a corrente em $L2$ é transferida para $C0$ e para a carga, conseqüentemente tendo a sua corrente reduzida.

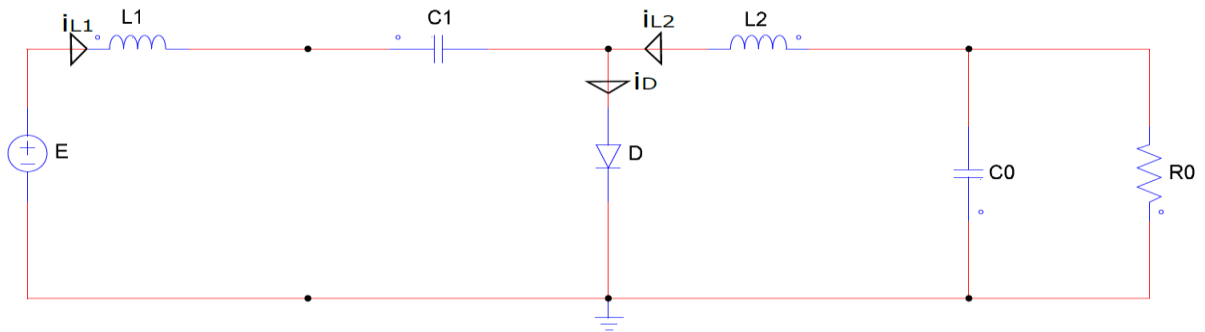


Figura 4 - Primeiro estágio de operação do conversor Ćuk.
Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Formas de Onda

Na figura 5 é possível observar algumas formas de ondas do conversor Ćuk operando em regime permanente no modo de condução contínua.

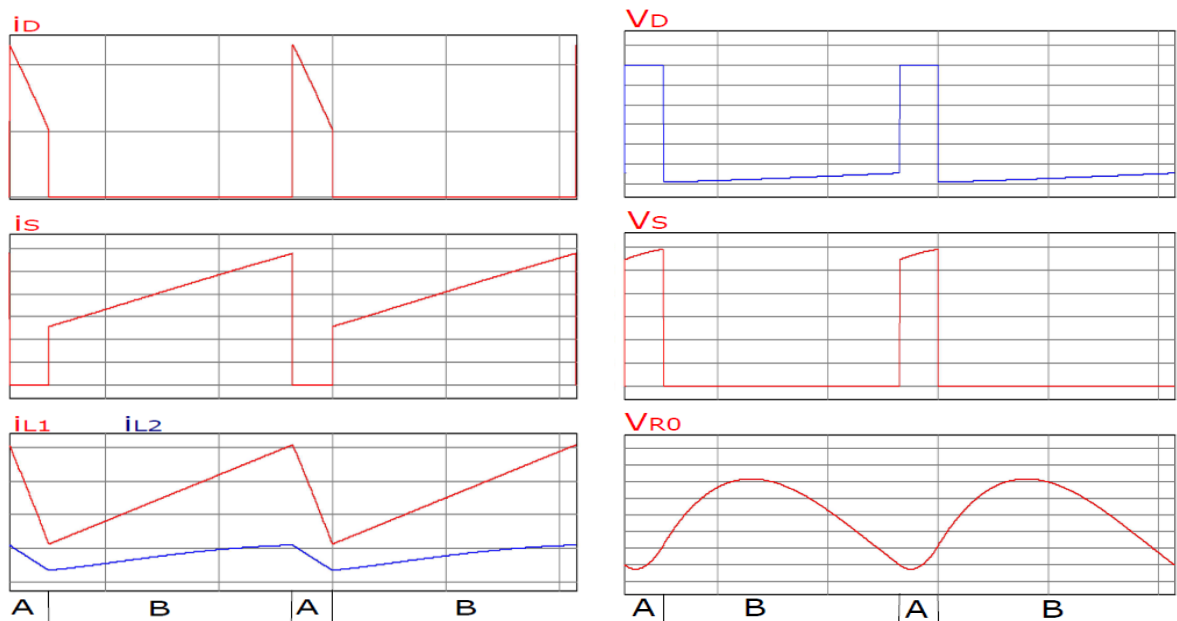


Figura 5 – Formas de Ondas do Conversor Ćuk. Sendo A = Etapa 1; B = Etapa 2.
Fonte: Autoria própria.

2.2.3 Equacionamento básico

Todo o equacionamento será realizado a partir da metodologia utilizada por Barbi e Martins (2006) e Britto (2009). O conversor Ćuk em modo de condução contínua e regime permanente é analisado por estágios, lembrando que D representa a razão cíclica. E a seguinte configuração é feita $t_0 = 0$; $t_1 = DT$ e $t_2 = (1 - D)T$.

2.2.3.1 Ganho estático

Em regime permanente toda a energia armazenada pelo capacitor $C1$ na etapa t_1 , é retornada pelo próprio capacitor $C1$ na etapa t_2 , portanto mantendo a energia constante. E o mesmo ocorre com o fluxo magnético presente nos indutores. Considerando que as correntes i_{L1} e i_{L2} são as correntes médias, assim tem-se a seguinte equação:

$$i_{L1}(1 - D)T = i_{L2}DT. \quad (2.01)$$

Assim, obtém-se que i_{L2} é dado por:

$$i_{L2} = \frac{i_{L1}(1 - D)}{D}. \quad (2.02)$$

De acordo com Barbi e Martins (2006), toda a componente alternada da corrente i_0 circula pelo capacitor $C0$, portanto, é possível afirmar que:

$$i_{L2} = i_0. \quad (2.03)$$

Logo, a partir de 2.02 e 2.03 tem-se:

$$i_{L1} = \frac{i_0 D}{(1 - D)}. \quad (2.04)$$

Agora, considerando que a tensão média nos indutores é nula, tem-se que a energia fornecida pela fonte de entrada E no tempo t_1 , é a variação de energia devolvida por $C1$ menos E , no tempo t_2 :

$$E \cdot DT = (V_{C1} - E)(1 - D)T. \quad (2.05)$$

Portanto, pode-se afirmar que a variação de tensão de $C1$ e V_0 no tempo t_2 , é a mesma que se tem $C0$ em t_2 ,

$$(V_{C1} - V_0)DT = V_{C0}(1 - D)T. \quad (2.06)$$

Assim, de 2.05 e 2.06 obtém V_{C1} e V_{C2} , respectivamente:

$$V_{C1} = \frac{E}{(1 - D)}, \quad (2.07)$$

$$V_{C2} = DV_{C1} = -V_0. \quad (2.08)$$

E portanto substituindo 2.07 em 2.08 chega-se no ganho estático do conversor Ćuk:

$$\frac{V_0}{E} = \frac{D}{(1 - D)}. \quad (2.09)$$

2.2.3.2 Ondulação da corrente de entrada

A ondulação de corrente na entrada é a própria ondulação presente em $L1$. No intervalo de tempo em que a chave S se mantém fechada, a corrente crescerá linearmente no indutor $L1$, assim tem-se:

$$E = L1 \cdot \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t}. \quad (2.10)$$

Sabendo que Δt é o tempo de condução da chave, assim:

$$\Delta t = DT, \quad (2.11)$$

$$T = \frac{1}{f}. \quad (2.12)$$

Sendo f a frequência de chaveamento, temos a representação da ondulação da corrente de entrada como:

$$\Delta i_{L1} = \frac{E \cdot D}{f \cdot L1}. \quad (2.13)$$

A partir de 2.13, que demonstra a ondulação de corrente em $L1$, é possível obter $L1$:

$$L1 = \frac{E \cdot D}{f \cdot \Delta i_{L1}}. \quad (2.14)$$

2.2.3.3 Ondulação da corrente no indutor $L2$

Enquanto o diodo estiver conduzindo, e conseqüentemente a chave permanecer aberta, a corrente em $L2$ decresce linearmente, visto que a energia de $L2$ é transferido para $C0$ e para a carga $R0$, desse modo:

$$V_0 = -L2 \cdot \frac{\Delta i_{L2}}{(1-D)T}. \quad (2.15)$$

Assim utilizando a equação em função da frequência, observa-se da seguinte maneira a ondulação em $L2$:

$$\Delta i_{L2} = \frac{-V_0 \cdot (1 - D)}{f \cdot L2}. \quad (2.16)$$

Nota-se que o sentido da corrente que circula pelo indutor $L2$ é invertida em relação a polaridade da tensão aplicada no terminal do indutor. Mas utilizando o módulo da equação, obtém-se o valor de $L2$.

$$L2 = \frac{V_0 \cdot (1 - D)}{f \cdot \Delta i_{L2}}. \quad (2.17)$$

2.2.3.4 Tensão média no capacitor V_{C1}

No momento em que a chave S permanecer fechada, a corrente em $L2$ crescerá linearmente. E como $C1$ teve energia acumulada em t_1 , no instante t_2 a energia é enviada através da chave S , assim obtém-se a relação da tensão média no capacitor $C1$:

$$V_{C1med} - V_0 = L2 \cdot \frac{\Delta i_{L2}}{DT}. \quad (2.18)$$

Igualando as equações 2.15 e 2.18, é obtido a relação da tensão média no capacitor V_{C1} no momento de D_{max} ,

$$V_{C1med} = \frac{V_0}{D_{max}}. \quad (2.19)$$

2.2.3.5 Ondulação de tensão no capacitor $C1$

No tempo em que a chave S estiver aberta, o capacitor $C1$ estará sendo carregado através da energia de $L1$, portanto a ondulação da tensão através da corrente média i_{L1med} é:

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C1} \int_0^{(1-D)} i_{L1med} dt, \quad (2.20)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{i_{L1med} \cdot (1 - D)}{f \cdot C1}. \quad (2.21)$$

E reorganizando a equação 2.21, tem-se a equação para obter $C1$:

$$C1 = \frac{i_{L1med} \cdot (1 - D)}{f \cdot \Delta V_{C1}}. \quad (2.22)$$

2.2.3.6 Ondulação de tensão na carga

A própria ondulação pico-a-pico do capacitor $C0$ é a ondulação correspondente na carga; que tem como a saída máxima quando razão cíclica = 0,5, e assim toda a variação de corrente que circula pelo capacitor $C0$, será a mesma variação que circula pela carga $R0$ (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2004).

Enquanto a forma de onda de corrente no capacitor $C0$ for positiva, o capacitor estará sendo carregado, e desta forma estará aumentando a tensão em seus terminais. Portanto, entre os dois pontos da forma de onda da corrente do capacitor onde há a passagem por zero, sua tensão atinge os valores máximos e mínimos (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2004).

A mudança na tensão do capacitor é relacionada a carga total que está contida em q , que é a parte hachurada da Figura 6; que representa a carga do capacitor contida na parte positiva da forma de onda. Na relação do capacitor tem-se:

$$Q = CV, \quad (2.23)$$

$$q = C(\Delta V_0). \quad (2.24)$$

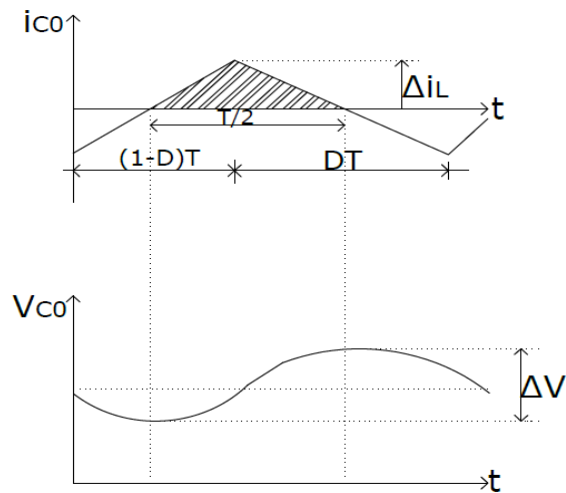


Figura 6 - Forma de onda da corrente e tensão em C_0 .
Fonte: (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2004).

E portanto sendo um triângulo, tem-se que:

$$q = \frac{1\Delta i_{L2}}{2} \cdot \frac{T}{2}, \quad (2.25)$$

e assim igualando as equações 2.24 e 2.25 tem-se a ondulação de tensão de pico-a-pico em C_0 :

$$\Delta V_0 = \Delta C_0 = \frac{\Delta i_{L2}}{8 \cdot f \cdot C_0}. \quad (2.26)$$

Ou igualando o ganho estático (2.09) com a equação 2.17 e com 2.26, tem-se a ondulação de tensão na carga R_0 :

$$\Delta V_0 = \frac{E \cdot D}{8 \cdot f^2 \cdot C_0 \cdot L_2}, \quad (2.27)$$

e através da equação 2.27, tem-se a formula para obter o capacitor C_0 :

$$C_0 = \frac{E \cdot D}{8 \cdot f^2 \cdot \Delta V_0 \cdot L_2}. \quad (2.28)$$

2.2.4 Modelo matemático do Conversor Ćuk

Ao observar a Figura 3, que demonstra o circuito dividido em duas malhas enquanto a chave permanece fechada. E a Figura 4, que demonstra as duas malhas no momento em que a chave estiver aberta, que juntamente podem escrever as equações que governam os estados de operação do conversor. Assim, segue-se:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{E}{L1} D - \frac{E - V_{C1}}{L1} (1 - D), \quad (2.29)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{C1} - V_{C2}}{L2} D - \frac{V_{C2}}{L2} (1 - D), \quad (2.30)$$

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{i_{L2}}{C1} D + \frac{i_{L1}}{C1} (1 - D), \quad (2.31)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{i_{L2} - i_0}{C2} D + \frac{i_{L2} - i_0}{C2} (1 - D), \quad (2.32)$$

$$i_0 = \frac{V_{C2}}{R}. \quad (2.33)$$

O método de Espaços de Estados Médios (*State Space Averaging*) fornece uma única representação para todo o período de chaveamento. Considerando a operação em modo de condução contínua em regime permanente, tem-se a modelagem (BRITTO, 2009) .

Assim, das equações 2.29 a 2.33 tem-se as matrizes de transição, sendo A_1 e B_1 quando a chave está fechada, e A_2 e B_2 quando a chave está aberta:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L2} & -\frac{1}{L2} \\ 0 & -\frac{1}{C1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C2} & 0 & -\frac{1}{R^*C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix}, \quad (2.34)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L2} \\ \frac{1}{C1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C2} & 0 & -\frac{1}{R^*C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

A partir das matrizes 2.34 à 2.37 é possível obter a função transferência do Converso Ćuk, que representa a relação entre a saída e a entrada. A função transferência é utilizada no projeto do controlador.

2.3 CONVERSOR SEPIC

O conversor SEPIC (*Single Ended Primary Indutance Converter*) foi proposto em 1977, podendo operar como elevador ou abaixador de tensão. Apresenta característica de entrada como fonte de corrente, o que implica em baixa ondulação de corrente. Já a transferência de energia da entrada para a saída se faz via capacitor. Enquanto, a saída tem característica de fonte de tensão (BRITTO, 2009) (BARBI; MARTINS, 2006).

Diferente do Ćuk a polaridade da tensão de saída é positiva. No entanto, a corrente de saída é pulsada (POMILIO, 1995). Um modelo do conversor SEPIC pode ser observado na Figura 7.

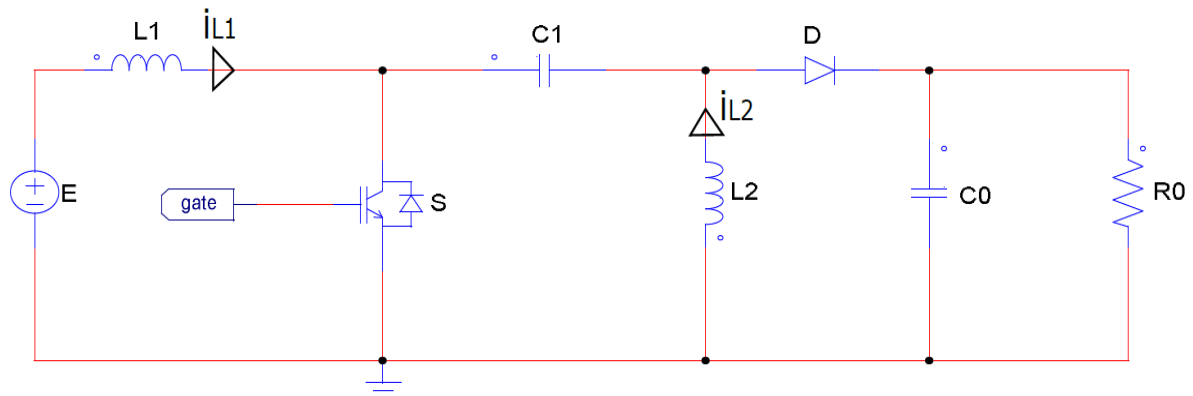


Figura 7 - Conversor SEPIC.
Fonte: (POMILIO, 1995).

2.3.1 Princípio de funcionamento

No modo de condução contínuo em regime permanente o conversor opera em duas etapas. Na primeira está com a chave fechada, como pode ser observado na Figura 8, e assim a chave conduz e o diodo bloqueia. O Indutor $L1$ armazena a energia da fonte de entrada E , fazendo com que a corrente i_{L1} cresça linearmente, assim como a corrente i_{L2} presente no indutor $L2$. Enquanto o capacitor $C1$ troca de energia com $L2$, o capacitor $C0$ alimenta a carga (BARBI; MARTINS, 2006).

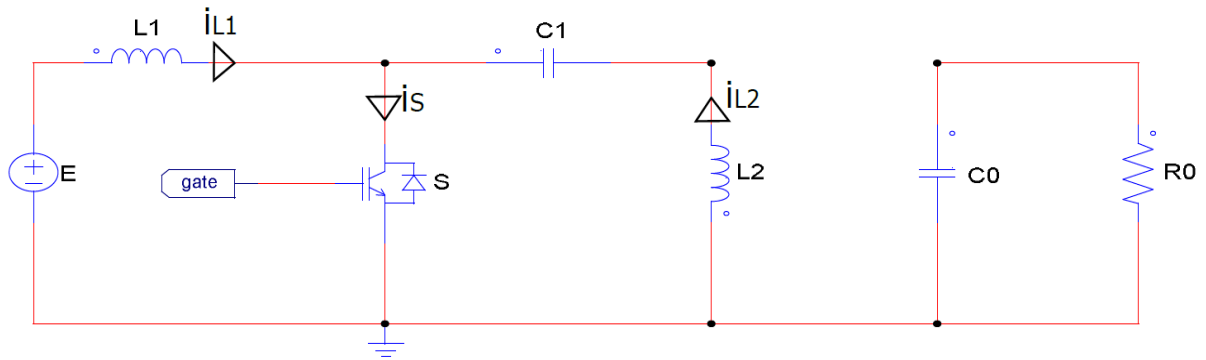


Figura 8 - Primeiro estágio de operação do conversor SEPIC.
Fonte: Autoria Própria.

Já na segunda etapa, pode ser observado na Figura 9, a chave abre e o diodo entra em condução. Assim os indutores $L1$ e $L2$ transferem a energia acumulada para a carga R_0 e para o capacitor C_0 e $C1$, que são carregados, portanto as correntes i_{L1} e i_{L2} decrescem linearmente (BARBI; MARTINS, 2006).

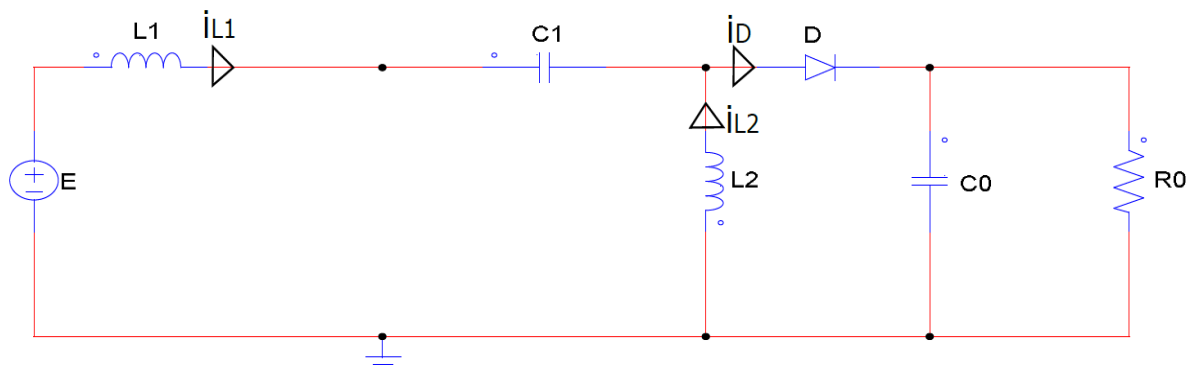


Figura 9 - Segundo estágio de operação do conversor SEPIC.
Fonte: Autoria Própria.

2.3.2 Formas de Ondas

Na figura 10 é possível observar as formas de ondas do conversor SEPIC operando em regime permanente no modo de condução contínua.

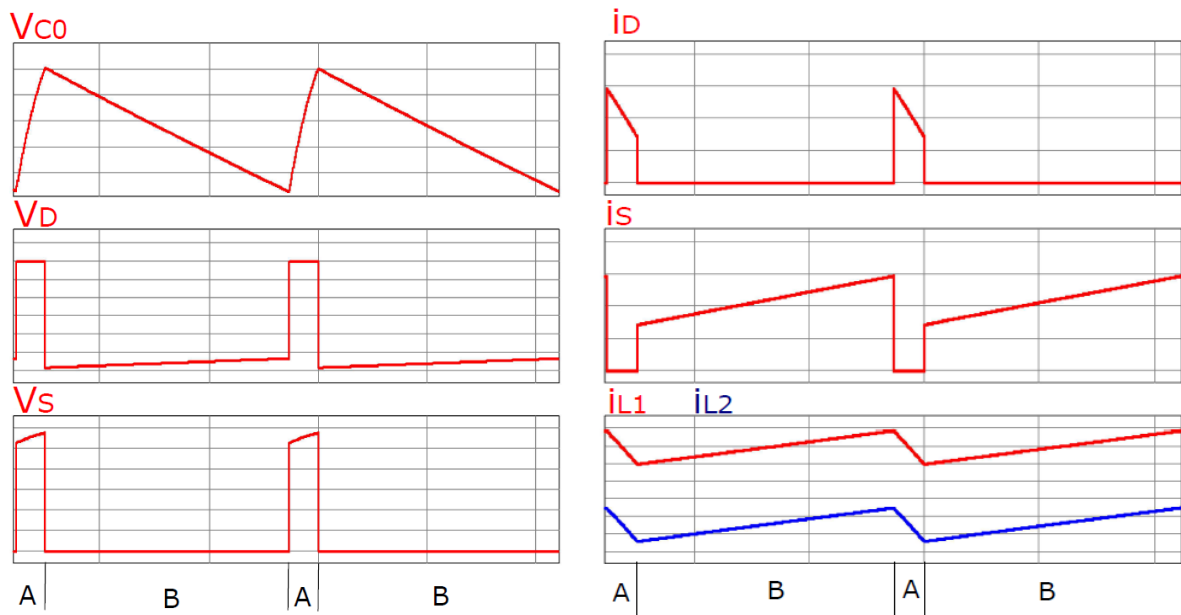


Figura 10 - Formas de Ondas do Conversor SEPIC. Sendo A = Etapa 1; B = Etapa 2.
Fonte: Autoria própria.

2.3.3 Equacionamento básico

Todo o equacionamento é realizado a partir da metodologia utilizada por Barbi e Martins (2006) e Britto (2009). O conversor SEPIC em modo de condução contínua e regime permanente é analisado por estágios, lembrando que D representa a razão cíclica.

2.3.3.1 Ganho Estático

Partindo do ponto em que não há perdas no conversor, e a energia que é armazenada nos indutores no tempo DT é transferida para a carga em $(1-D)T$, assim tem-se que:

$$E(i_{L1} + i_{L2})DT = V_0(i_{L1} + i_{L2})(1 - D)T. \quad (2.38)$$

Sendo que i_{L1} e i_{L2} são os valores médios da corrente de entrada no indutor $L1$ e da corrente magnetizante no indutor $L2$. Sendo assim, o ganho estático do conversor SEPIC, a partir de 2.38 é:

$$\frac{V_0}{E} = \frac{D}{(1-D)}. \quad (2.39)$$

2.3.3.2 Ondulação da corrente de entrada

Analisando a ondulação da corrente no indutor $L1$, sabe-se que:

$$\Delta i_{L1} = i_{L1max} - i_{L1(0)}, \quad (2.40)$$

onde que para se obter a corrente máxima em $L1$, tem-se:

$$i_{L1max} = i_{L1(0)} + \frac{E}{L1} \cdot DT. \quad (2.41)$$

E logo com as equações 2.40 e 2.41, obtém-se a ondulação da corrente de entrada:

$$\Delta i_{L1} = \frac{E}{L1} \cdot DT = \frac{V_0}{L1} \cdot (1-D)T, \quad (2.42)$$

e do mesmo modo, a partir de 2.42, tem-se a equação para obter $L1$.

$$L1 = \frac{E}{\Delta i_{L1}} \cdot DT = \frac{V_0}{\Delta i_{L1}} \cdot (1-D)T. \quad (2.43)$$

2.3.3.3 Ondulação da corrente na indutância magnetizante

Analogamente a ondulação da corrente de entrada, tem-se 2.44 e 2.45:

$$\Delta i_{L2} = i_{L2max} - i_{L2(0)}, \quad (2.44)$$

$$i_{L2max} = i_{L2(0)} + \frac{E}{L2} \cdot DT. \quad (2.45)$$

E a partir de ambas as equações, é obtido a ondulação da corrente no indutor $L2$:

$$\Delta i_{L2} = \frac{E}{L2} \cdot DT = \frac{V_0}{L2} \cdot (1 - D)T. \quad (2.46)$$

Modificando a equação da ondulação da corrente, tem-se a equação para obter $L2$:

$$L2 = \frac{E}{\Delta i_{L2}} \cdot DT = \frac{V_0}{\Delta i_{L2}} \cdot (1 - D)T. \quad (2.47)$$

2.3.3.4 Ondulação nos capacitores $C1$ e $C0$

De acordo com Barbi e Martins (2006) aplicando a expressão 2.48 na corrente de $C1$ e $C0$ no intervalo de tempo de DT obtêm-se as ondulações nos capacitores:

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt. \quad (2.48)$$

Enquanto a chave S permanecer conduzindo, o capacitor C_0 é quem fornece energia para a carga. A alimentação é em corrente constante igual a i_0 , portanto tem-se:

$$i_C = i_0 = C \frac{dV_{C0}}{dt}, \quad (2.49)$$

$$\Delta V_{C0} = \frac{i_0 \cdot t_1}{C} = \frac{i_0 \cdot DT}{C}. \quad (2.50)$$

E substituindo-se i_0 através da lei de Ohm, e em sequência isolando-se V_0 através do ganho estático (equação 2.39), tem-se que a ondulação nos capacitores são:

$$\Delta V_{C1} = \frac{E \cdot D^2 \cdot T}{R_0 \cdot C1 \cdot (1 - D)}, \quad (2.51)$$

$$\Delta V_{C0} = \frac{E \cdot D^2 \cdot T}{R_0 \cdot C0 \cdot (1 - D)}. \quad (2.52)$$

E readequando a equação através do ganho estático, utilizando em função da tensão de saída, tem-se:

$$\Delta V_{C1} = \frac{V_0 \cdot DT}{R_0 \cdot C1} = \frac{V_0 \cdot D}{R_0 \cdot C1 \cdot f}, \quad (2.53)$$

$$\Delta V_{C0} = \frac{V_0 \cdot DT}{R_0 \cdot C0} = \frac{V_0 \cdot D}{R_0 \cdot C0 \cdot f}. \quad (2.54)$$

Portanto, a máxima ondulação de tensão nos capacitores ocorre para a carga mínima. Assim é possível determinar os capacitores como:

$$C1 = \frac{D}{R_{0min} \cdot f \cdot (\Delta V_{C1}/V_0)}, \quad (2.55)$$

$$C0 = \frac{D}{R_{0min} \cdot f \cdot (\Delta V_{C0}/V_0)}. \quad (2.56)$$

2.3.4 Modelo matemático do conversor SEPIC

Ao observar a Figura 7, que demonstra o circuito dividido em duas malhas enquanto a chave permanece fechada. E a Figura 8, que demonstra as duas malhas no momento em que a chave estiver aberta, que juntamente podem escrever as equações que governam os estados de operação do conversor (BRITTO, 2009). Assim, segue-se:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{E}{L1}D - \frac{E - V_{C1} - V_{C2}}{L1}(1 - D), \quad (2.57)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{C1}}{L2}D - \frac{V_{C2}}{L2}(1 - D), \quad (2.58)$$

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{i_{L2}}{C1}D + \frac{i_{L1}}{C1}(1 - D), \quad (2.59)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{-i_0}{C2}D + \frac{i_{L1} + i_{L2} - i_0}{C2}(1 - D), \quad (2.60)$$

$$i_0 = \frac{V_{C2}}{R}. \quad (2.61)$$

Utilizando método de Espaços de Estados Médios e considerando a operação em modo de condução contínua em regime permanente, tem-se a modelagem (BRITTO, 2009) .

Assim, das equações 2.57 a 2.61 tem-se a as matrizes de transição, sendo A_1 e B_1 quando a chave está fechada, e A_2 e B_2 quando a chave está aberta:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R^*C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L1} & -\frac{1}{L1} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L2} \\ \frac{1}{C1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C2} & \frac{1}{C2} & 0 & -\frac{1}{R^*C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

A partir das equações 2.62 à 2.65 é possível obter a função transferência do Converso SEPIC, que representa a relação entre a saída e a entrada. A função transferência é utilizada no projeto do controlador.

2.4 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O sol dispõe de energia praticamente inesgotável em forma de radiação solar que pode ser absorvida por células fotovoltaicas, que em sua grande maioria são semicondutores de silício cristalino. As células fotovoltaicas fornecem uma

corrente elétrica proporcional à radiação solar incidente. A radiação solar pode ser da forma direta, atingindo diretamente a superfície terrestre, ou de forma difusa, que é caracterizada pelo desvio em diferentes direções pelos componentes da atmosfera. A radiação solar a pode ser refletiva, que é a refletida pelo solo ou outros objetos (PORTAL ENERGIA, 2004).

A célula solar de silício cristalino é composta por duas camadas de silício dopadas por diferentes elementos. Na camada onde a radiação solar é incidente a camada é dopada negativamente com fósforo, obtendo-se um elemento com elétrons livres, denominado silício tipo N, enquanto a camada inferior é dopada positivamente com boro, obtendo-se um elemento com falta de elétrons, denominado silício tipo P (NASCIMENTO, 2004), (PORTAL ENERGIA, 2004).

Na junção das duas camadas é produzido um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N, que ocupam as lacunas da estrutura de silício tipo P. E quando há incidência de luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com os outros elétrons da estrutura de silício, fornecendo-lhes energia, e transformando-os em condutores (NASCIMENTO, 2004), como é possível observar na Figura 11.



Figura 11 - Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.
Fonte: (TAVARES, 2009).

É possível encontrar células fotovoltaicas de diferentes níveis de eficiência. Esse rendimento chega a ser de 9 a 30% comercialmente, dependendo dos elementos e técnicas utilizadas (VALENTE, 2011). Entretanto, há pesquisas que já mostram que a eficiência ultrapassa os 40%, como apresentam os estudos os australianos Martin

Green e os pesquisadores da Universidade de Nova Gales do Sul. Outro exemplo é a equipe do Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos EUA, foi obtido uma eficiência de 45,7% usando uma célula solar quádrupla, com quatro junções semicondutoras (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2014).

Cada célula solar é capaz de produzir de 0,4 a 0,7 Volts, de acordo com as características construtivas, quando expostas à luz. Já corrente máxima é 3A, e tensão em torno de 0,7V são características de arranjos fotovoltaicos. Para obter outros níveis de tensão e corrente geradas, associações em série e em paralelo podem ser feitas (TAVARES, 2009).

Se por algum motivo, alguma célula estiver encoberta ou danificada, a potência de saída cairá. Caso o módulo esteja ligado em série, isso influenciará em todo o funcionamento das demais células do módulo. A fim de evitar essa situação utiliza-se um diodo de proteção chamado de *bypass*, que é conectado com polaridade inversa a das células. Na Figura 12 é possível observar dois exemplos de conexão de diodo *bypass*.

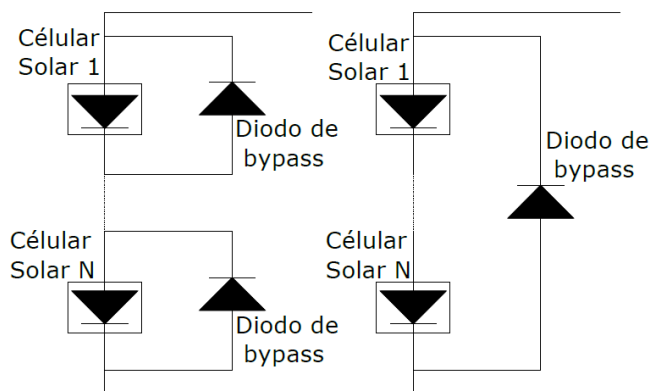


Figura 12 - Diodo de bypass: (a) por célula; (b) por conjunto de células.
Fonte: (TAVARES, 2009).

2.4.1 Curva Características de um Painel Fotovoltaico

O entendimento da curva que relaciona a tensão com a corrente de um módulo fotovoltaico é de extrema importância para poder realizar a análise do ponto de máxima potência.

Os fabricantes de painéis fotovoltaicos fornecem especificações dos principais parâmetros considerando condições padrões de teste, sendo elas:

Corrente de curto-circuito (I_{sc}) = corrente máxima de carga, igual a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico.

Corrente de máxima potência (I_{max}) = corrente corresponde ao ponto máximo de potência.

Tensão de circuito aberto (V_{oc}) = tensão máxima nos terminais do módulo fotovoltaicos sem nenhuma conexão com carga.

Tensão de máxima potência (V_{max}) = tensão correspondente ao ponto máximo de potência.

Ponto de Máxima Potência (MPP) = em cada módulo fotovoltaico, devido as suas características, só há um ponto de máxima potência para uma dada condição climática.

Como o módulo trabalha exposto ao Sol, a temperatura de operação também é fornecida, geralmente girando na faixa de 25°C. Uma potência luminosa incidente total de 800 W/m² e 1000 W/m², e vento aproximado de 1m/s, completam os dados fornecidos pelo fabricante (SEGUEL, 2009).

Na Figura 13 são expostos exemplos das curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico nas condições padrões.

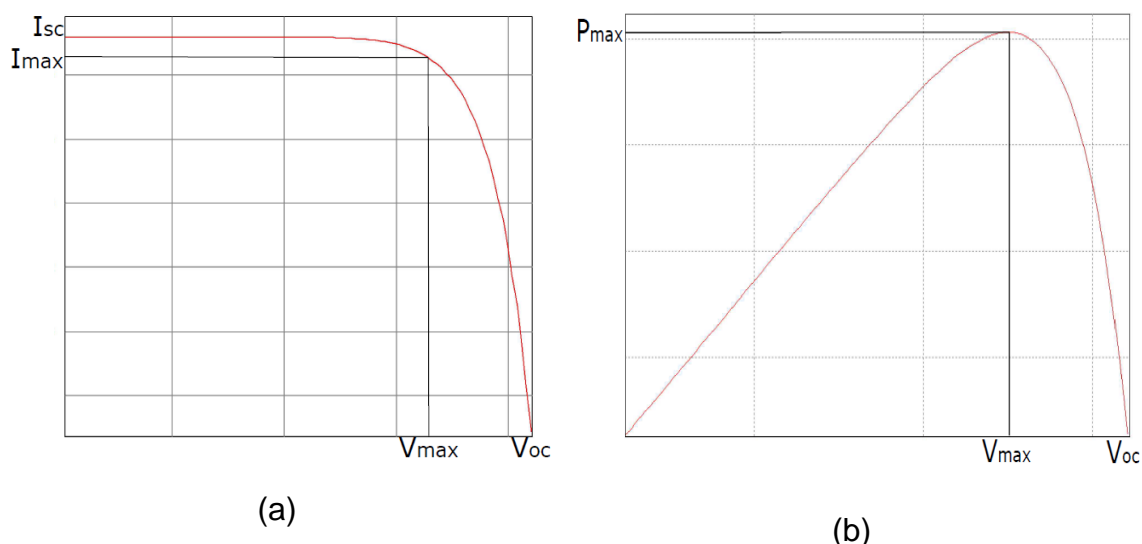


Figura 13 - (a) Curva I-V típica de um painel fotovoltaico. (b) Curva P-V típica de um painel fotovoltaico.

Fonte: A autoria própria.

Pode se observar que a corrente de curto circuito é a máxima corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico. No entanto, neste ponto a tensão é igual a zero.

Já no ponto de máxima tensão, há a característica de circuito aberto, com corrente igual a zero (SEGUEL, 2009).

Primeiramente observando a curva P-V, nota-se um crescimento linear da potência, para o crescimento da tensão, enquanto o módulo tem um comportamento partindo de fonte de corrente em curto-circuito. A corrente sofre uma leve variação, permanecendo com valor próximo ao de corrente de curto-circuito em momentos precedentes ao ponto de máxima potência. Esse valor de corrente começa a decrescer com uma maior intensidade com a aproximação do ponto máximo, onde tem-se corrente e tensão máxima (SEGUEL, 2009).

Após passar o ponto máximo, o valor continua a decrescer, até atingir zero. O decréscimo acentuado, conseqüentemente faz com que a potência diminua rapidamente, e assim fazendo com que o módulo passe a ter um comportamento de fonte de tensão em circuito aberto (SEGUEL, 2009).

A influência da radiação solar e da temperatura das células são os fatores que afetam o desempenho do painel solar. A tensão nos terminais praticamente se mantém constante com a variação da intensidade da radiação solar, exceto quando a radiação solar é muito baixa. Por outro lado a corrente elétrica varia proporcionalmente à variação da intensidade da radiação solar. Assim, com a redução da radiação solar incidente ocorre um deslocamento para baixo do ponto máximo de potência (HANSEN, *et al.*, 2000), (SEGUEL, 2009).

Já o inverso ocorre com o aumento de temperatura, que provoca uma redução de tensão nos terminais do painel fotovoltaico, enquanto a corrente se mantém praticamente constante com as variações da temperatura. No entanto, como no primeiro caso, a variação afeta o ponto máximo de potência, deslocando-o para baixo (HANSEN, *et al.*, 2000), (SEGUEL, 2009).

2.5 TÉCNICA DE RASTREIAMENTO DO PONTO MÁXIMO DE POTÊNCIA

A característica de saída de um sistema fotovoltaico é em função da irradiação solar e da temperatura. O melhor aproveitamento da energia à qual o módulo solar está exposto, é obtido quando este módulo opera no ponto máximo específico da curva I-V. Logo, é desejável que o sistema opere por maior tempo nesse

ponto. Assim será obtida uma maior eficiência do arranjo fotovoltaico. As técnicas que trabalham para obter esse ponto máximo de potência são conhecidas como *Maximum Power Point Tracking* (BRITO, 2013), (NETO, 2012), (SEGUEL, 2009).

Na literatura atualmente há variedade de métodos que são utilizados. As principais diferenças estão nas suas complexidades, velocidade de convergência, custo e eficiência.

Em estudos já realizados comparando as principais técnicas de rastreamento, pode-se citar que entre as mais utilizadas estão a da Tensão Constante (*CV – Constat Voltage*), Perturbação e Observação (*P&O – Perturbantion and Observation*) e Condutância Incremental (*IncCond – Incremental Conductance*) (BRITO, 2013), (NETO, 2012), (SEGUEL, 2009).

No entanto, é possível encontrar maiores informações e detalhes sobre outros métodos de MPPT em Brito (2013), onde é realizada uma comparação entre vários métodos, como mostrado na Figura 14.

Para o desenvolvimento deste projeto, entre as opções disponíveis, foi escolhido o algoritmo de Perturbação e Observação (P&O). Este MPPT apresenta um rendimento aceitável, além de ser de fácil projeto e implementação.

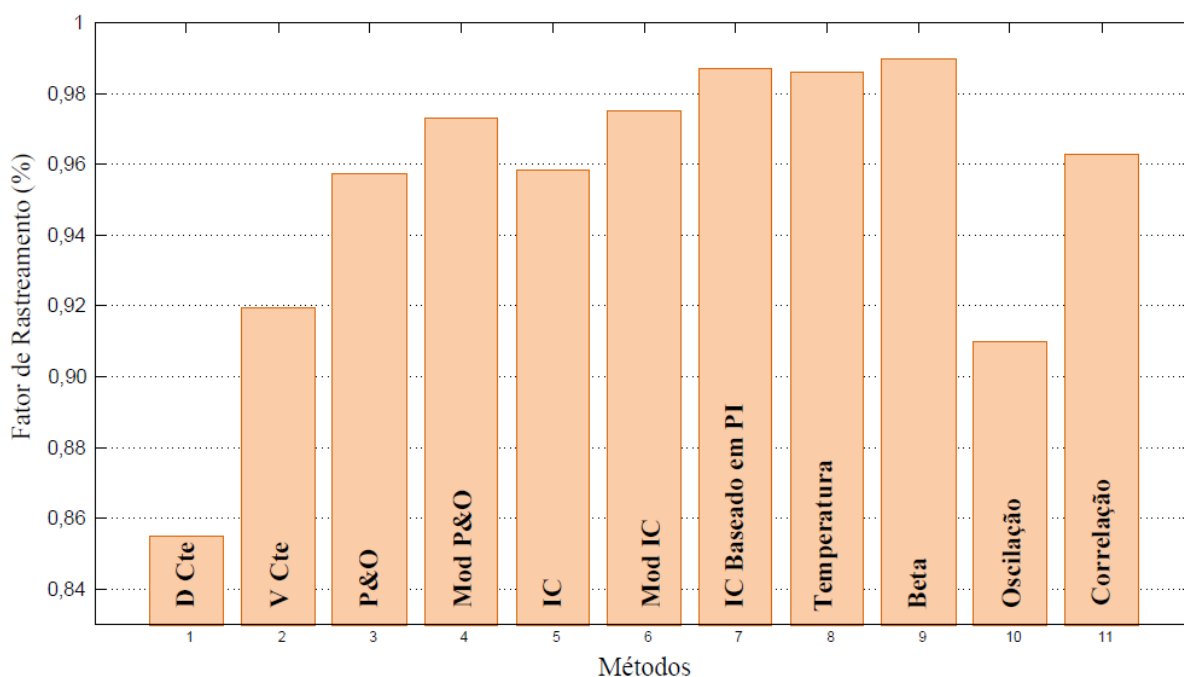


Figura 14 - Rendimento na utilização dos métodos de MPPT.
Autor: (BRITO, 2013)

2.5.1 Método de Perturbação e Observação (P&O)

O método de Perturbação e Observação atua na perturbação periódica, incrementando ou decrementando a tensão do arranjo solar em uma determinada direção, para assim observar o comportamento da potência de saída. Ao obter o valor da potência nova de saída, é feita uma comparação com a antiga potência para saber se a potência nominal aumentou. Caso a potência tenha aumentado o sistema continuará incrementando ou decrementando na mesma direção, e caso contrário, a situação se inverte (FARANDA; LEVA, 2008), (SEGUEL, 2009).

Através deste método, é notável que nunca será atingido o ponto máximo, pois sempre haverá uma nova perturbação, e assim é desperdiçada energia dos painéis. No entanto, esse efeito pode ser administrado através do tempo e da amplitude de cada perturbação (FARANDA; LEVA, 2008), (SEGUEL, 2009).

Entretanto, o método de P&O pode apresentar grandes problemas com a mudança rápida da condição atmosférica, que pode ser observado caso a amplitude da variação seja pequena o suficiente para tornar o rastreamento lento, como também não pode ser exagerada, para não afastar muito do ponto máximo. E ainda há a necessidade de haver um tempo suficiente para a estabilização do conversor, para assim evitar instabilidade da técnica do MPPT devido a dinâmica do conversor CC-CC, que depende da frequência de chaveamento e da dinâmica do circuito RLC. Assim como a presença do erro em regime permanente (FARANDA; LEVA, 2008), (SEGUEL, 2009).

A utilização de P&O pode ser feita através da fixação da amplitude do ponto de operação, como a utilização da média de algumas amostras para um ajuste na amplitude da perturbação (FARANDA; LEVA, 2008), (SEGUEL, 2009). Segue na Figura 16 um fluxograma do funcionamento, sendo P_k = Potência atual lida, e P_{k-1} = Potência anterior lida.

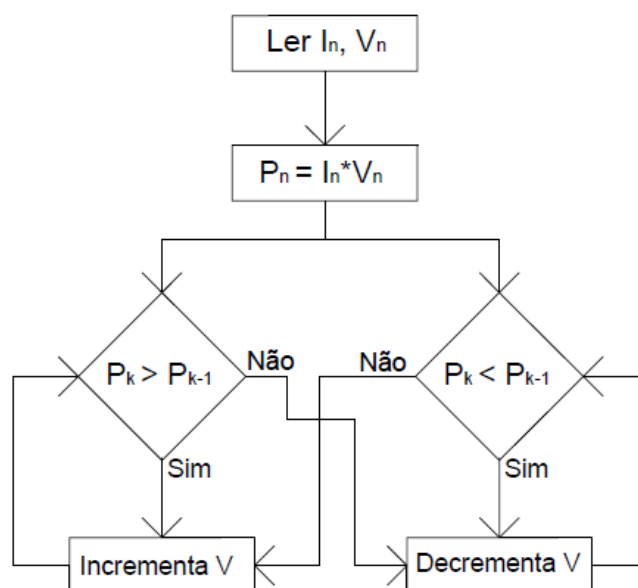


Figura 15 - Fluxograma P&O.
Fonte: Autoria própria.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho aborda dois conversores CC-CC, Ćuk e SEPIC, utilizando a topologia de elevador de tensão. Na entrada do conversor há um painel fotovoltaico de 250 Watts, que gera uma tensão CC de 20 a 40 Volts, que é elevada até 250 Volts.

O conversor CC-CC terá como maior objetivo, obter a maior potência elétrica do painel fotovoltaico. Assim, é utilizado o algoritmo de MPPT que rastreia o ponto de maior potência. O método de P&O consiste em seguidas perturbações na tensão elétrica fornecida pelo painel, a fim de verificar se a potência atual é maior que a anterior.

Algumas considerações foram tomadas para a realização do projeto. De acordo com Texas Instruments (2001), a ondulação de corrente pode ser de até 40% da máxima corrente de entrada, para a mínima tensão de entrada. E de acordo com Dwivedi, Dwivedi e Sharma (2014) a ondulação de tensão nos capacitores pode ser de até 10%. Portanto, a partir dessas considerações é escolhido a ondulação de corrente de 40%, e a ondulação de tensão de 10%.

O Comitê Internacional Especial de Perturbação de Radiofrequência (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques - CISPR 11*)

estabelece que para equipamentos industriais, científicos e médicos, o padrão de frequência de chaveamento precisa ser entre 9kHz e 150kHz devido a geração de harmônicas (BURKART; KOLAR, 2012). A partir dessa norma, é escolhido a frequência de chaveamento em 40kHz, permanecendo dentro do padrão estabelecido.

A Tabela 1 demonstra as especificações para ambos os projetos no modo de condução contínua em regime permanente.

Tabela 1 – Especificações de projeto

Parâmetros	Símbolo	Valor
Tensão máxima na entrada	E_{max}	40 V
Tensão mínima na entrada	E_{min}	20 V
Tensão máxima de saída	V_o	250 V
Potência de saída	P_o	250 W
Corrente de saída	I_o	1,2 A
Ondulação da corrente no indutor L1	Δi_{L1}	$0,4 \cdot i_{L1}$
Ondulação da corrente no indutor L2	Δi_{L2}	$0,4 \cdot i_{L2}$
Ondulação da tensão no capacitor C1	ΔV_{C1}	$0,1 \cdot V_{C1}$
Ondulação da tensão no capacitor C0	ΔV_{C0}	$0,1 \cdot V_{C2}$
Frequência de chaveamento	f	40 kHz

Fonte: Autoria Própria.

Há várias outras topologias que poderiam ser empregadas neste projeto, mas a escolha desses dois conversores se deve ao fato da literatura ser pouco explorada, e apresentarem um indutor em série com a fonte de entrada, o que é uma vantagem na utilização do MPPT.

3 PROJETO DO CONVERSOR CUK

O desenvolvimento do projeto segue a metodologia utilizada por (BRITTO, 2009) e (TEXAS INSTRUMENTS, 2001), utilizando componentes ideais.

3.1 RAZÃO CÍCLICA

Da equação 2.09 temos:

$$\frac{V_0}{E} = \frac{D}{(1-D)} \quad (3.01)$$

Assim, utilizando os dados da Tabela 1, obtém-se o intervalo em que a razão cíclica trabalha:

$$D_{max} = 0,9259 \quad (3.02)$$

$$D_{min} = 0,8621 \quad (3.03)$$

3.2 PROJETO

3.2.1 Dimensionamento dos indutores L1 e L2

A ondulação de corrente é de mesmo valor em ambos os indutores (TEXAS INSTRUMENTS, 2001), então tem-se que a variação de corrente no indutor pode ser:

$$\Delta i_{L1} = i_E \cdot 40\% = i_0 \cdot \frac{V_0}{E_{min}} \cdot 40\%, \quad (3.04)$$

De acordo com a equação 2.14, 3.03, 3.04 e a Tabela 1, o indutor $L1$ pode ser obtido como:

$$L1 = \frac{E \cdot D}{f \cdot \Delta i_{L1}} \cong 150\mu H. \quad (3.05)$$

E para obter o indutor $L2$, de 2.17, 3.03, 3.06 e da Tabela 1 tem-se que:

$$\Delta i_{L2} = i_{L2} \cdot 40\% = i_0 \cdot 40\%, \quad (3.06)$$

$$L2 = \frac{V_0}{\Delta i_{L2} \cdot f} (1 - D_{min}) \cong 1,8mH. \quad (3.07)$$

A frequência de chaveamento está representada por f , enquanto D_{min} representa a razão cíclica em E_{max} .

3.2.2 Dimensionamento dos capacitores C1 e C0

Considerando a tensão mínima de entrada, é possível encontrar a tensão média no capacitor $C1$, de acordo com 2.19:

$$V_{C1md1} = \frac{V_0}{D_{max}} \cong 260 V. \quad (3.08)$$

E assim, o capacitor $C1$ é obtido a partir de 2.22, mas utilizando em função de i_0 :

$$C1 = \frac{i_{L2} \cdot D_{max}}{0,1 \cdot V_{C1md1} \cdot f} \cong 1,1\mu F. \quad (3.09)$$

E considerando a tensão máxima de entrada, é obtido a tensão máxima no capacitor $C1$:

$$V_{C1md2} = \frac{V_0}{D_{min}} \cong 290 \text{ V}, \quad (3.10)$$

$$V_{C1max} = V_{C1md2} + \left(\frac{\Delta V_{C1}}{2} \right) = 303 \text{ V}. \quad (3.11)$$

Como demonstrado na Tabela 1, o capacitor $C0$, por conveniência do projeto é aceitável uma ondulação de tensão de 10%, assim tem-se como tensão máxima de saída:

$$V_{C0max} = V_0 + \frac{\Delta V_{C0}}{2} = 262,5 \text{ V}. \quad (3.12)$$

Assim, o capacitor $C0$, a partir de 2.28 pode ser obtido por:

$$C0 = \frac{E_{max} \cdot D_{min}}{8 \cdot f^2 \cdot \Delta V_0 \cdot L2} = 60nF. \quad (3.13)$$

E de acordo com Texas Instruments (2001), os capacitores $C1$ e $C0$ precisam ser capazes de suportar a corrente RMS, que é dada por:

$$i_{C1RMS} = \frac{\Delta i_{L1}}{\sqrt{3}}, \quad (3.14)$$

$$i_{C0RMS} = \frac{\Delta i_{L2}}{\sqrt{3}}. \quad (3.15)$$

3.2.3 Dimensionamento dos Semicondutores

A corrente máxima na chave S , MOSFET, de acordo com (TEXAS INSTRUMENTS, 2001) é determinada por:

$$i_{Smax} = i_{L1} + i_{L2} + \Delta i_{L1} + \Delta i_{L2} \cong 22,68 A. \quad (3.16)$$

E a tensão máxima é dada por:

$$V_{Smax} = \frac{V_0}{D_{min}} \cong 290 V. \quad (3.17)$$

A corrente e a tensão determinada para a chave S , são as mesmas para o diodo D , portanto:

$$i_{Smax} = i_{Dmax} \cong 22,68 A, \quad (3.18)$$

$$V_{Smax} = V_{Dmax} \cong 290 V. \quad (3.19)$$

3.2.4 Estratégia de Controle

A energia utilizada no processo é provida por um sistema fotovoltaico, assim necessita de uma estratégia de controle para adequar o fluxo de energia para a utilização do algoritmo de MPPT.

A estratégia utilizada é baseada na malha de controle da tensão na saída do painel fotovoltaico, portanto do indutor $L1$, com a utilização de um controlador integral. Tem-se o objetivo de reduzir o erro de estado estacionário (SILVA, 2000).

A partir das matrizes de transição em 2.34 a 2.37, para uma razão cíclica de $D = 0,8928$, obtém-se a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{6667 s^3 + 5.556e08 s^2 + 6.441e13 s + 2.237e17}{s^4 + 8.333e04 s^3 + 9.731e09 s^2 + 3.935e13 s + 6.449e17}. \quad (3.20)$$

A função de transferência pode ser comprovada na Figura 16. Para um degrau de tensão de 30 Volts tem-se a corrente no indutor $L1$ na comparação da função transferência com a resposta do conversor em malha aberta.

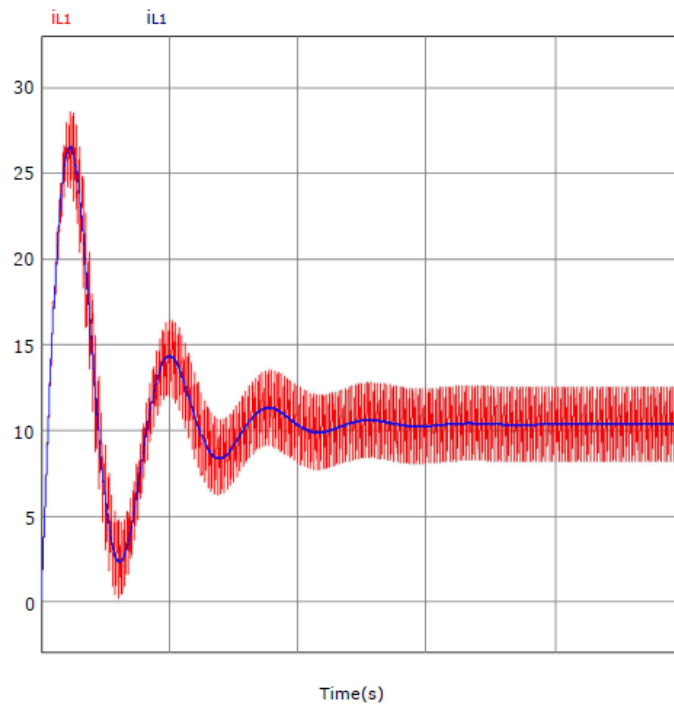


Figura 16 – Resposta de i_{L1} da FT e em malha aberta.
Fonte: Autoria própria.

Com a utilização do método do Lugar das Raízes, que é a escolha da localização dos polos e zeros do sistema em malha fechada (OGATA, 2003), e usando a ferramenta *SISO Design* do software *Matlab*, foi dimensionado o controlador. A equação 3.21 demonstra a função transferência obtida,

$$C_C(s) = \frac{10}{s}. \quad (3.21)$$

A Figura 16 demonstra o diagrama de blocos utilizado do sistema em malha fechada.

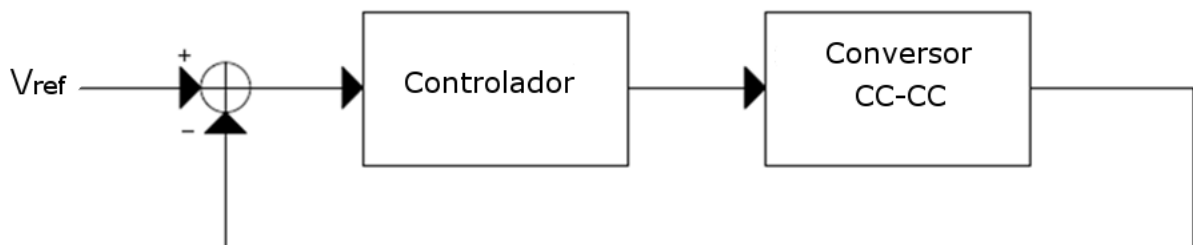


Figura 17 - Diagrama de blocos.
Fonte: Autoria Própria.

E com a utilização do algoritmo de MPPT, que foi demonstrado no Capítulo 2, é obtido a potência máxima na saída do painel fotovoltaico. Portanto o controlador atuará para manter a tensão específica, para qual se obtém a potência máxima, no indutor $L1$.

3.3 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Nesta seção é analisado o desempenho do conversor Ćuk alimentado por um painel fotovoltaico, operando em malha fechada. A Tabela 2 apresenta os dados do painel fotovoltaico do modelo KD245GH-4FB2 da Kyocera, a uma temperatura de 25°C e com incidências solares de 800W/m² e 1000W/m².

Os resultados obtidos para a incidência solar de 800W/m² são apresentados em sequência, enquanto no Apêndice A são apresentados os resultados para incidência solar de 1000W/m².

Tabela 2 – Dados do Painel Fotovoltaico Kyocera KD245GH-4FB2

	Incidência solar	
	1000W/m ²	800W/m ²
Potência máxima	245W	176W
Tensão de máxima potência	29,8V	26,8V
Corrente de máxima potência	8,23A	6,58A
Tensão de circuito aberto	36,9V	33,7V
Corrente de curto-circuito	8,91A	7,21A

Fonte: (KYOCERA).

Os valores obtidos no projeto foram aproximados para os valores comerciais. Assim obtém-se o circuito da Figura 17, que representa todo o sistema.

Primeiramente na Figura 17 tem-se o painel fotovoltaico na esquerda. Enquanto na sequência há o Conversor Ćuk, que teve a estrutura demonstrada acima.

Na Figura 18, que é complementar a Figura 17, tem-se a estratégia de controle utilizada. A parte superior calcula a potência instantânea, que tem o valor atrasado em uma frequência de 10 kHz. Em sequência passa por um diferenciador para verificar a variação da potência.

Sendo a variação de potência maior que zero, há decréscimo de 0,1 Volts que é lido por um integrador, que será comparado com a tensão de referência. Caso a variação de potência seja menor que zero, há um acréscimo de 0,1 Volts.

O sinal proveniente da comparação é condicionado pelo controlador integrador, levando o erro de estado estacionário para zero.

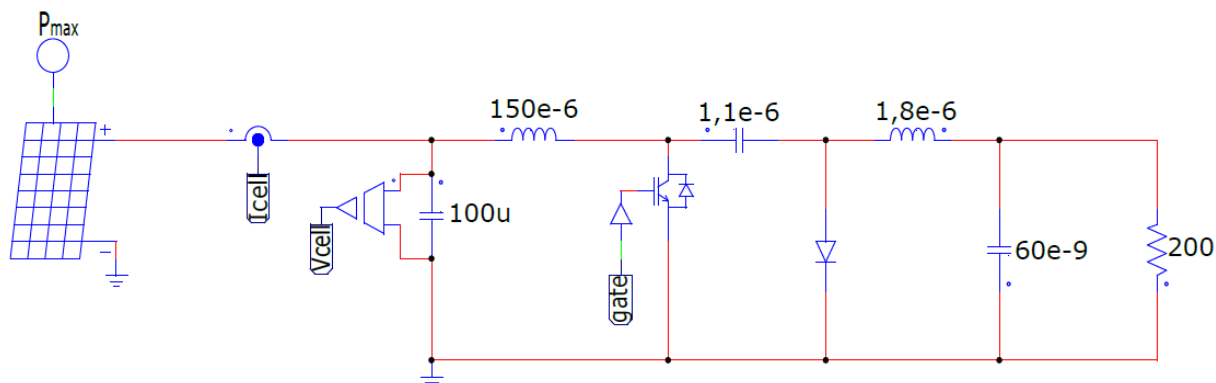


Figura 18 - Circuito conversor Ćuk.
Fonte: Autoria própria.

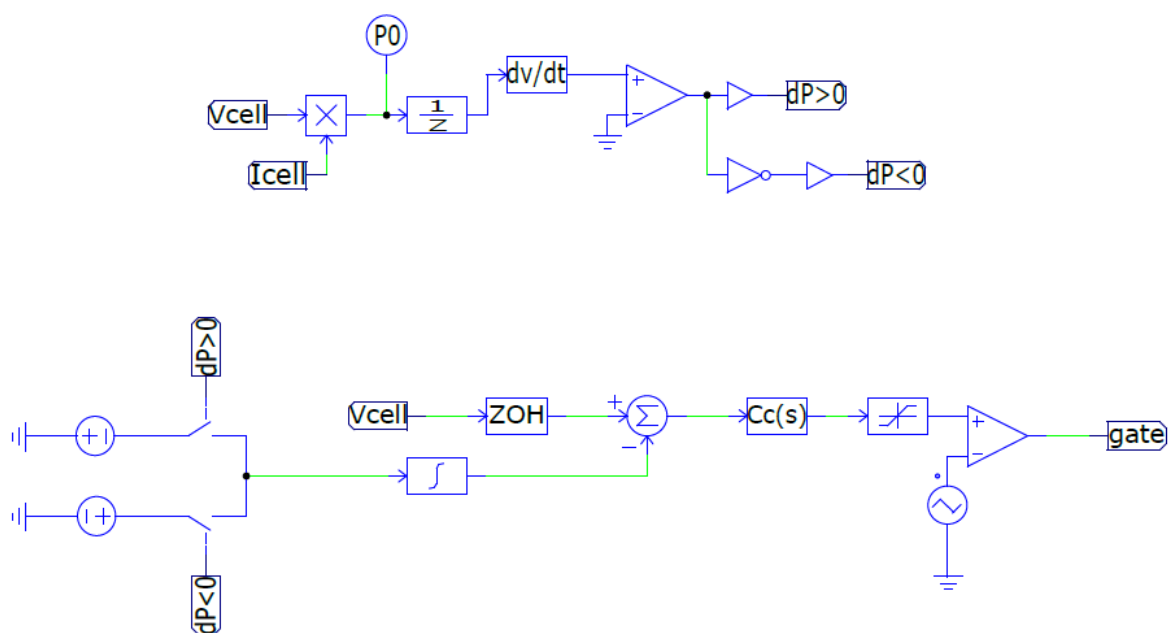


Figura 19 – Estratégia de controle.
Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Incidência solar de 800W/m²

Para uma incidência solar de 800W/m², nas Figura 20 e 21, mostradas a seguir, há a resposta da potência máxima gerada pelo painel fotovoltaico, e a potência média

que é obtida na saída.

Através de dados do fabricante, o painel fotovoltaico tem uma potência máxima de 176,34W. E para chegar em um valor que se aproxima nas quatro primeiras casas, que é considerado um resultado aceitável, o sistema partindo do estado de repouso leva um tempo de aproximadamente 10 milissegundos.

Após os transitórios, que são de aproximadamente 3 milissegundos, pode-se ler a potência média na saída do painel como 176,32W. Como o algoritmo MPPT funciona no modo Perturbação & Observação, nota-se na Figura 21 como a P_0 está em constante variação

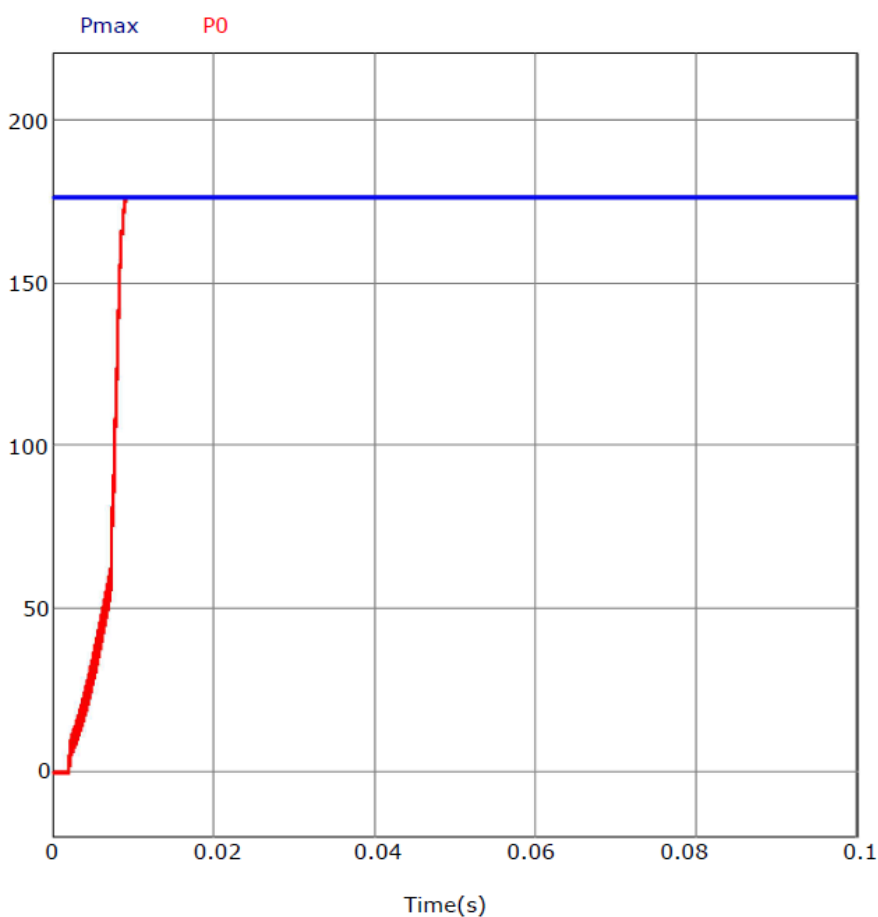


Figura 20 - Potência máxima/obtida a 800W/m².
Fonte: Autoria própria.

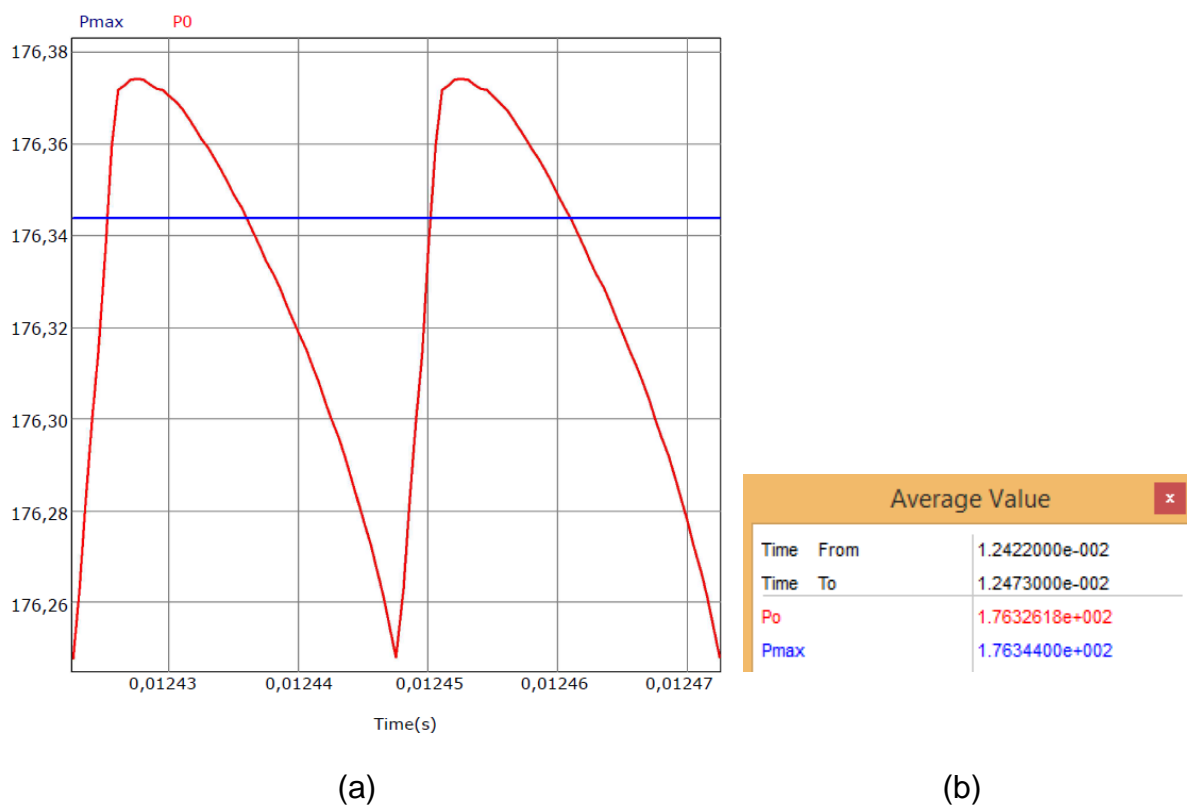


Figura 21 – (a) Zoom Figura 20. (b) Valores médios de potência.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 (a) mostra as formas de onda de correntes nos indutores L1 e L2. Enquanto, a Figura 22 (b) demonstra os valores eficazes de corrente, e a Figura 22 (c) mostra os valores máximos.

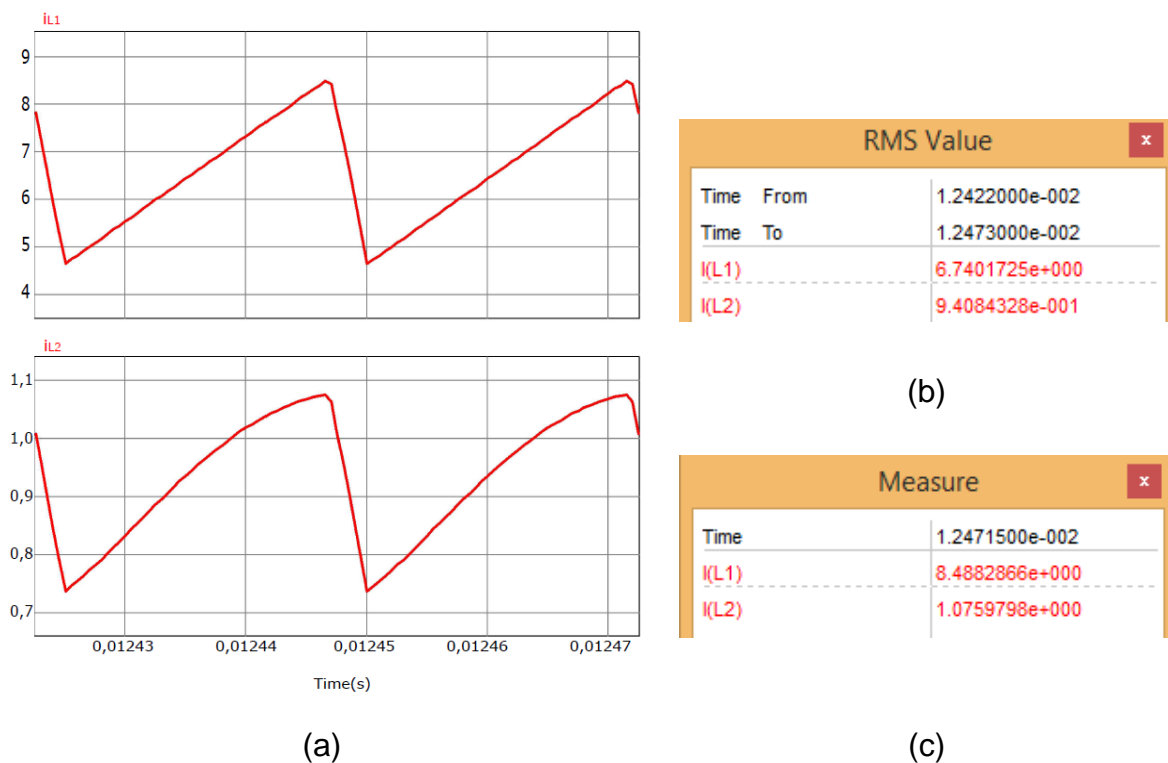


Figura 22 – (a) Corrente no indutor L1 e L2. (b) Valores RMS. (c) Valor máximo de corrente.
Fonte: Autoria própria.

Da Figura 22(b) há as correntes eficazes de L1 com valor de 6,74 A e L2 com 0,94 A. Se comparado a corrente em L1 com o valor de corrente do painel, que é de 6,58 A, tem-se uma variação de 160 mA entre os valores. Este valor está dentro de uma faixa aceitável, e sabendo que o valor de pico não ultrapassa os 40% permitidos por projeto e de possível comparação na Figura 22 (c), comprova-se a funcionalidade do projeto, dentro dos parâmetros aceitáveis.

Na Figura 23 (a) tem-se as formas de ondas de corrente dos capacitores C1 e C0. Já na Figura 23 (b) e (c) os valores RMS e de pico em C1 respectivamente.

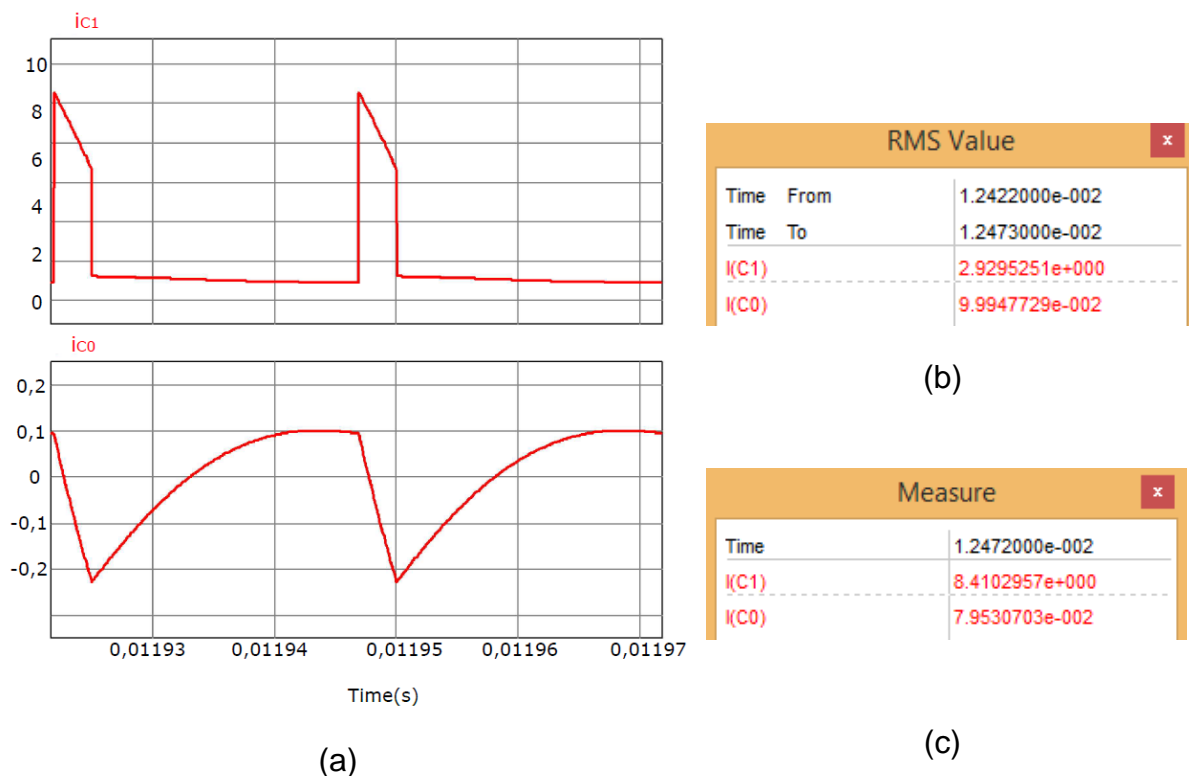
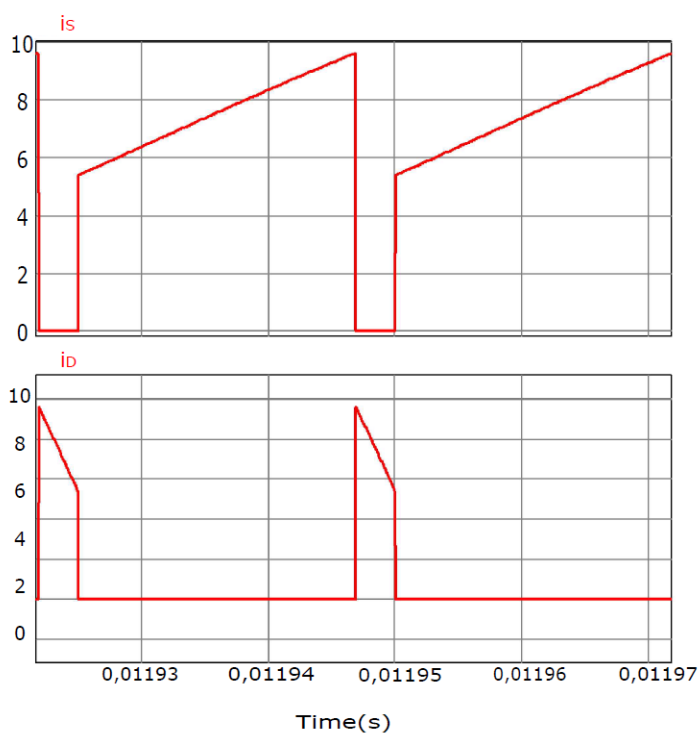


Figura 23 - (a) Formas de ondas de correntes em C1 e C0. (b) Corrente RMS. (c) Valor máximo em C1.

Fonte: Autoria própria.

Com os valores observados na Figura 23 (b) da corrente RMS para o capacitor C1 que é de 2,929 A e do capacitor C0 que é de 0,099 A, e através das equações 3.14 e 3.15, nota-se que os valores de corrente RMS são satisfatórios.

Já na Figura 24 (a) tem-se as formas de ondas de corrente da chave S e do diodo D. E visto que a os valores máximos ocorrem em momentos distintos, na Figura 24 (b) há a corrente máxima na chave, e em (c), a corrente máxima no diodo.



(a)

Measure	
Time	1.2471500e-002
I(S)	9.5642867e+000
I(D)	-2.0350100e-005

(b)

Measure	
Time	1.2472000e-002
I(S)	0.0000000e+000
I(D)	9.4742288e+000

(c)

Figura 24 – (a) Formas de ondas de correntes na chave S e no diodo D. (b) Corrente máxima na chave S. (c) Corrente máximo no diodo D.
Fonte: Autoria própria.

A partir da equação 3.18, nota-se que os valores de correntes dos semicondutores estão dentro do esperado, sendo a corrente de pico para a chave S de 9,564 A, e para o diodo D de 9,474 A.

Na Figura 25 (a) encontra-se a forma de onda da tensão de saída do conversor, e a tensão no capacitor C1. Já em (b) tem-se a tensão média nos componentes, enquanto em (c) há a tensão de pico em C1.

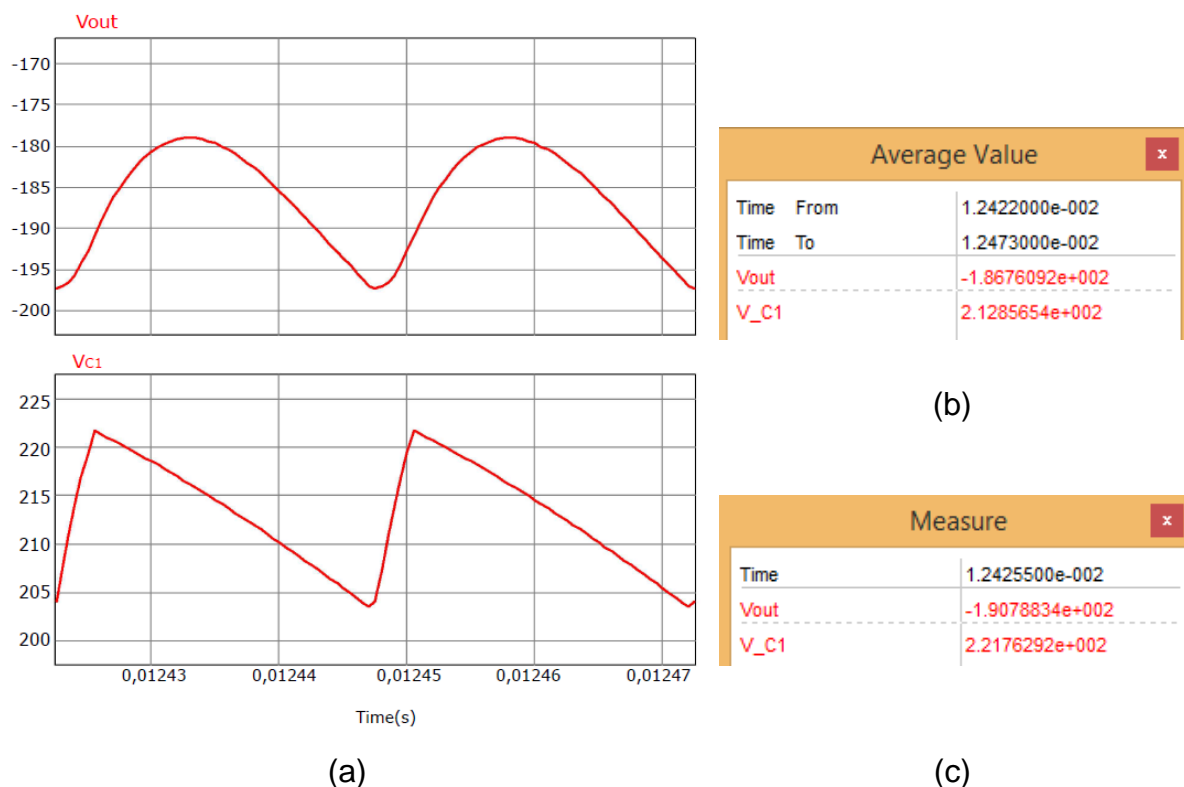


Figura 25 - Formas de ondas de tensão nos componentes C1 e C0. (b) Tensão média nos componentes. (c) Tensão de pico em C1.
Fonte: Autoria própria.

Sabendo que o módulo da tensão média de saída é 186,76 Volts, e observando a Figura 25 (a), nota-se como a ondulação de tensão não ultrapassa os 10% estabelecidos por projeto.

De acordo com a equação 3.11, a tensão de pico no capacitor C1 que é de 221,17 V está dentro dos valores aceitáveis para a aplicação.

A partir da tensão do painel fotovoltaico de 26,8 Volts, para a tensão obtida na saída de 186,76 Volts, tem-se um ganho de aproximadamente 6,96. E na obtenção desses valores, o conversor trabalha com uma razão cíclica de 0,8745, estando dentro dos parâmetros estabelecidos em 3.02 e 3.03.

A Figura 26 mostra o comportamento do transitório das correntes dos indutores $L1$ e $L2$ e da tensão e da corrente na célula fotovoltaica partindo do estado de repouso com tensão de circuito aberto até atingir o ponto de máxima potência, onde permanece em regime. E sabendo que ocorrerá transitório sempre que houver variação da tensão, isso satisfaz as características do projeto.

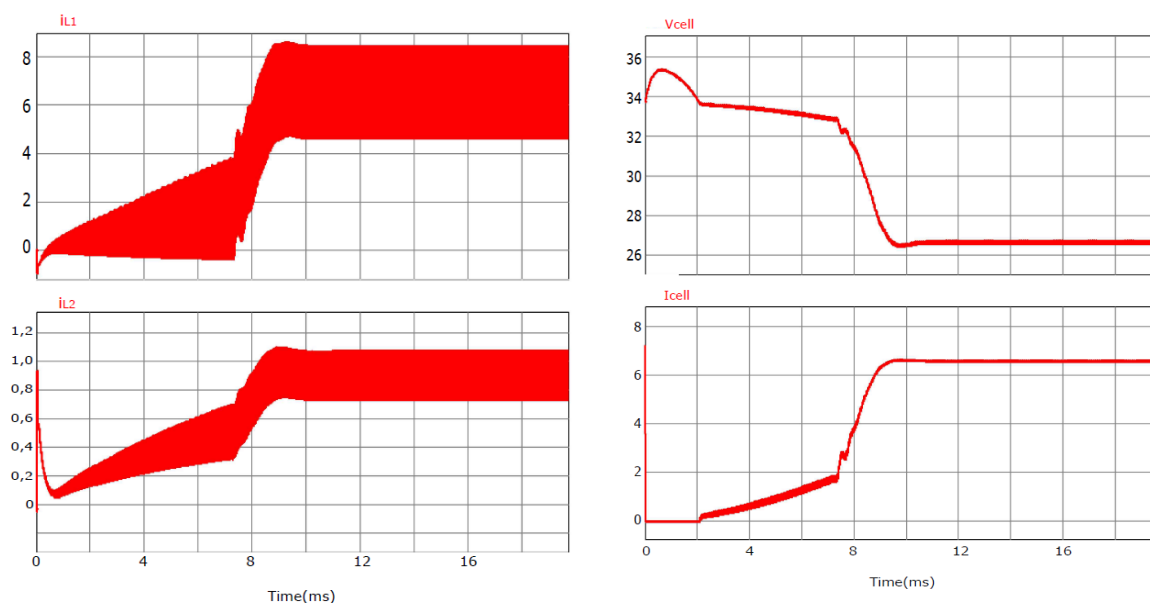


Figura 26 – Transitórios de tensão e corrente.
Fonte: Autoria própria.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado uma análise do conversor $\hat{C}uk$ operando no modo contínuo de condução, para uma aplicação fotovoltaica. Foram apresentados resultados de simulações do conversor $\hat{C}uk$ para duas situações diferentes de incidência solar, de 800 W/m^2 , e de 1000 W/m^2 ; que se encontra no Apêndice A.

Para a primeira situação tem-se a corrente RMS nos indutores $L1$ e $L2$ de $6,74 \text{ A}$ e $0,97 \text{ A}$ respectivamente, enquanto na segunda situação tem-se $8,38 \text{ A}$ e $1,09 \text{ A}$ respectivamente, permanecendo dentro da faixa dos valores esperado de projeto. Assim como o pico de corrente tem-se para $L1$ um valor de $8,48 \text{ A}$, e para $L2$ um valor de $1,07 \text{ A}$ para o primeiro caso. E já para o segundo caso tem-se $10,43 \text{ A}$ e $1,24 \text{ A}$.

Os capacitores necessitam suportar a corrente eficaz que é de $2,81 \text{ A}$ em $C1$, e $1,038 \text{ A}$ em $C0$, para incidência de 800 W/m^2 . Já para a incidência solar de 1000 W/m^2 é necessário que os capacitores suportem as correntes eficazes de $3,04 \text{ A}$ para $C1$ e $1,14 \text{ A}$ para $C0$.

Os semicondutores precisam suportar um pico de esforço de $9,5 \text{ A}$ para o uma incidência solar de 800 W/m^2 , e de $11,5 \text{ A}$ para uma incidência de 1000 W/m^2 .

4 PROJETO DO CONVERSOR SEPIC

O desenvolvimento do projeto segue a metodologia utilizada por (BRITTO, 2009) e (TEXAS INSTRUMENTS, 2006), utilizando componentes ideais.

4.1 RAZÃO CÍCLICA

Da equação 2.39 tem-se o ganho estático:

$$\frac{V_0}{E} = \frac{D}{(1-D)} \quad (4.01)$$

Assim, utilizando os dados da Tabela 1, obtém-se o intervalo em que a razão cíclica trabalha:

$$D_{max} = 0,9259, \quad (4.02)$$

$$D_{min} = 0,8620. \quad (4.03)$$

4.2 PROJETO

4.2.1 Dimensionamento dos indutores L1 e L2

Como no conversor Ćuk é utilizando comumente uma ondulação de corrente de até 40% da máxima corrente de entrada, na mínima tensão de entrada. A ondulação de corrente que flui é de mesmo valor em ambos os indutores (TEXAS INSTRUMENTS, 2006). Então tem-se que a variação de corrente no indutor pode ser:

$$\Delta i_L = i_E \cdot 40\% = i_0 \cdot \frac{V_0}{E_{max}} \cdot 40\%. \quad (4.04)$$

Sabendo que a variação de corrente é a mesma em ambos os indutores, portanto a partir da Tabela 1 e das equações 2.43 e 2.47, os indutores $L1$ e $L2$ podem ser obtidos por:

$$L1 = L2 = \frac{E_{max} \cdot D_{min}}{\Delta i_{L1} \cdot f} \cong 150\mu H. \quad (4.05)$$

A frequência de chaveamento está representada por f , enquanto D_{min} representa a razão cíclica em E_{max} .

4.2.2 Dimensionamento dos capacitores C1 e C0

O capacitor $C1$ depende da corrente RMS (TEXAS INSTRUMENTS, 2006), que é dada por:

$$i_{C1RMS} = i_0 \cdot \sqrt{\frac{V_0}{E_{min}}} = 4,24 A \quad (4.06)$$

O capacitor $C1$ precisa ser projetado pensando na corrente RMS. A característica faz com que o conversor SEPIC se adapte muito melhor a aplicações de baixa potência, onde há um menor fluxo de corrente. Entretanto a tensão suportada pelo capacitor $C1$ precisa ser maior do que a tensão máxima de entrada (TEXAS INSTRUMENTS, 2006).

Considera-se que a ondulação de tensão não seja maior que 10%, conforme a Tabela 1. De acordo Texas Instruments (2006) a tensão em $C1$ precisa ser maior que a tensão máxima de entrada, 40V. E finalmente com a equação 2.55, tem-se:

$$C1 = \frac{D_{min}}{R_{0min} \cdot f \cdot (\Delta V_{C1}/V_0)} \cong 6,80 \mu F. \quad (4.07)$$

Quando a chave S é ligada, o indutor é carregado, e assim a corrente de saída é alimentada pelo capacitor C0. Como resultado, há ondulação de tensão no capacitor C0, e assim como no capacitor C1, é necessário ser capaz de suportar a corrente RMS (TEXAS INSTRUMENTS, 2006), que é dada por:

$$i_{C0RMS} = i_0 \cdot \sqrt{\frac{V_0}{E_{min}}} = 4,24 \text{ A.} \quad (4.08)$$

E permitindo 10% na tensão de saída, tem-se que a partir de 2.56:

$$C0 = \frac{D_{min}}{R_{0min} \cdot f \cdot (\Delta V_{C0}/V_0)} \cong 1,1 \text{ uF.} \quad (4.09)$$

4.2.3 Dimensionamento dos semicondutores

O pico de tensão da chave S é dado pela soma da tensão de entrada e da tensão de saída, enquanto o pico de corrente é dado por:

$$i_{Smax} = i_{L1} + i_{L2} + \Delta i_{L1} + \Delta i_{L2} \cong 22,68 \text{ A.} \quad (4.10)$$

O diodo selecionado precisa suportar a corrente de pico e a tensão reversa. A corrente de pico, é a mesma que a encontrada na chave S, e a tensão reversa é dada por:

$$V_D = E_{max} + V_{0max} = 290 \text{ V.} \quad (4.11)$$

4.2.4 Estratégia de Controle

A estratégia de controle utilizada no conversor SEPIC segue os mesmos procedimentos adotados para o conversor Ćuk, já estabelecidos anteriormente.

A partir das matrizes de transição em 2.62 a 2.65, para uma razão cíclica de $D = 0,8928$, obtém a seguinte função transferência:

$$G(s) = \frac{6667 s^3 + 2.899e07 s^2 + 2.806e12 s + 1.027e16}{s^4 + 4348 s^3 + 4.926e08 s^2 + 1.562e12 s + 2.961e16} \quad (4.12)$$

A função transferência pode ser comprovada na Figura 27. Para um degrau de tensão de 30 Volts tem-se a corrente no indutor $L1$ na comparação da função transferência com a resposta do conversor em malha aberta.

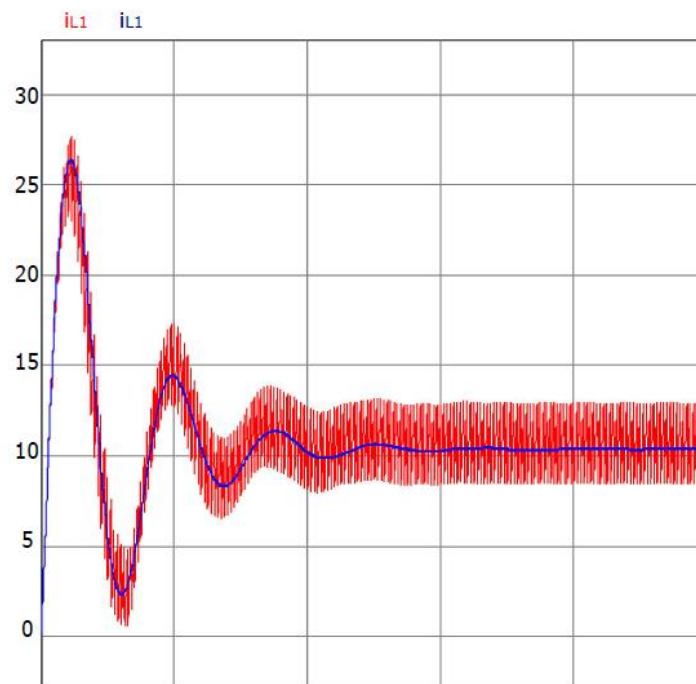


Figura 27 – Resposta de i_{L1} da FT e e em malha aberta.
Fonte: Autoria Própria.

Como no conversor Ćuk o controlador foi obtido através da alocação de polos pelo método do Lugar das Raízes, sendo:

$$C_S(s) = \frac{15}{s}. \quad (4.13)$$

4.3 RESULTADOS E SIMULAÇÕES

O procedimento e parâmetros para realização das simulações foram os mesmo que os utilizados para o conversor $\hat{C}uk$. Assim pode-se observar a Figura 28 com o circuito obtido.

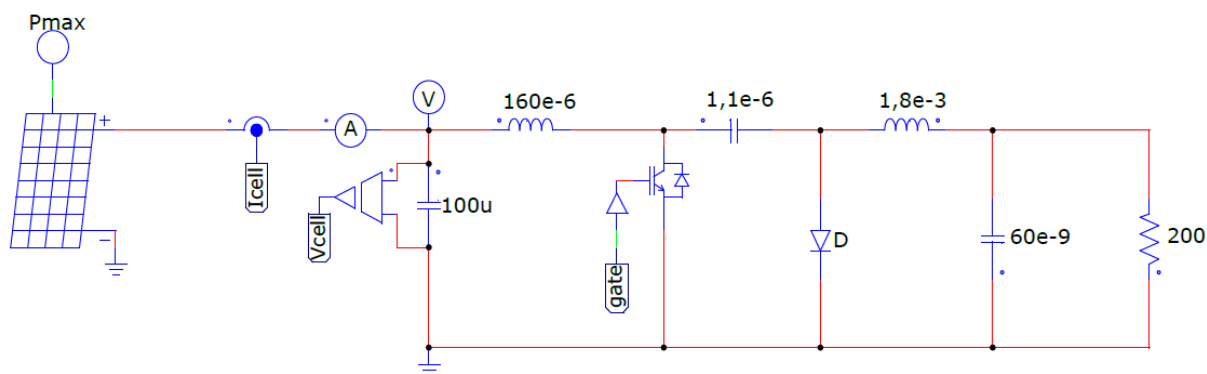


Figura 28 - Circuito conversor SEPIC.
Fonte: Autoria própria.

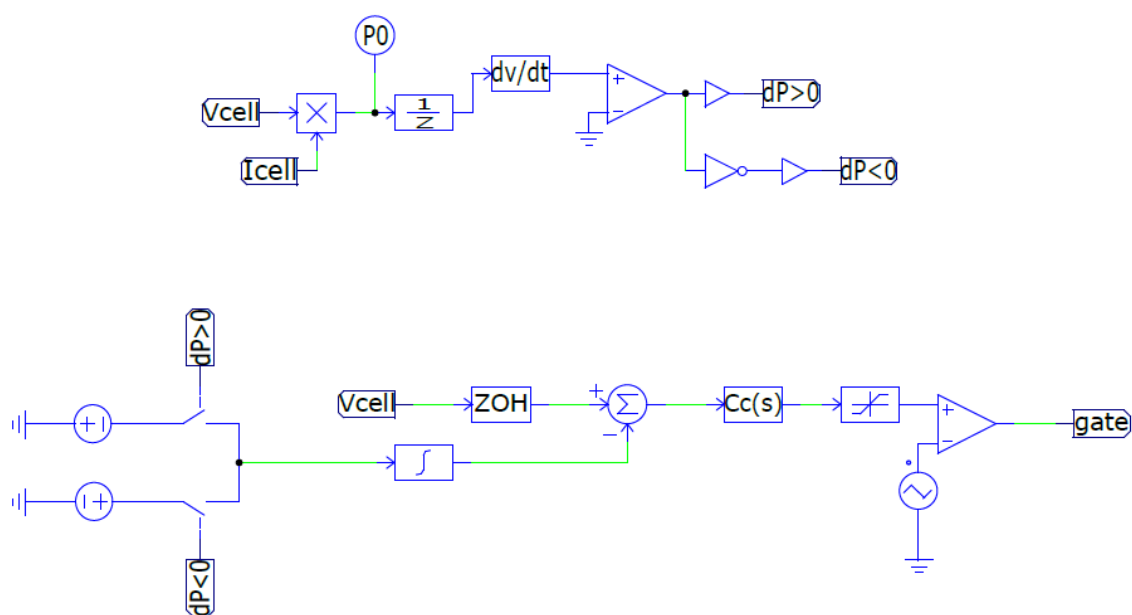


Figura 29 – Estratégia de controle.
Fonte: Autoria própria.

4.3.1 Incidência Solar de 800W/m²

Para uma incidência solar de 800W/m², nas Figura 30 e 31, mostradas a seguir, há a resposta da potência máxima gerada pelo painel fotovoltaico, e a potência média que é obtida na saída do mesmo.

Através dos dados iniciais, o painel fotovoltaico tem uma potência máxima de 176,34W. E para chegar em um valor que se aproxima nas quatro primeiras casas, que é considerado um resultado aceitável, o sistema partindo do estado de repouso leva um tempo de aproximadamente 12 milissegundos.

Após os transitórios, que são de aproximadamente 3 milissegundos, pode-se ler a potência média na saída do painel como 176,32W. Como o algoritmo MPPT funciona no modo Perturbação & Observação, nota-se na Figura 31 como a P₀ está em constante variação

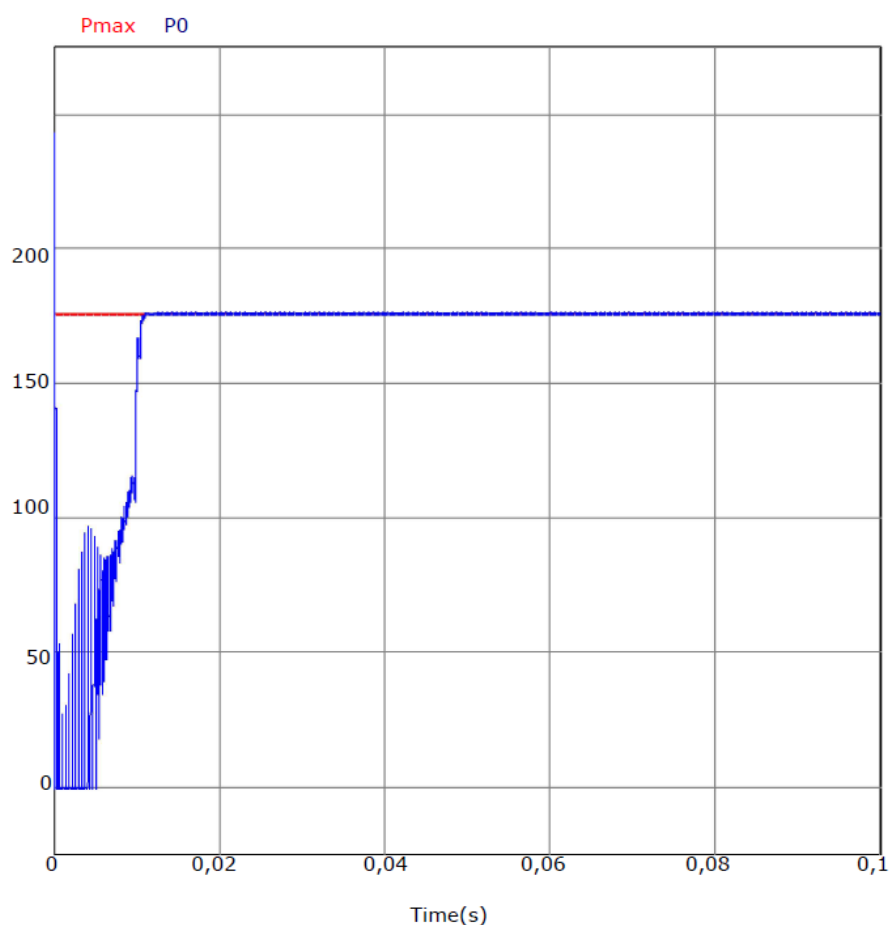
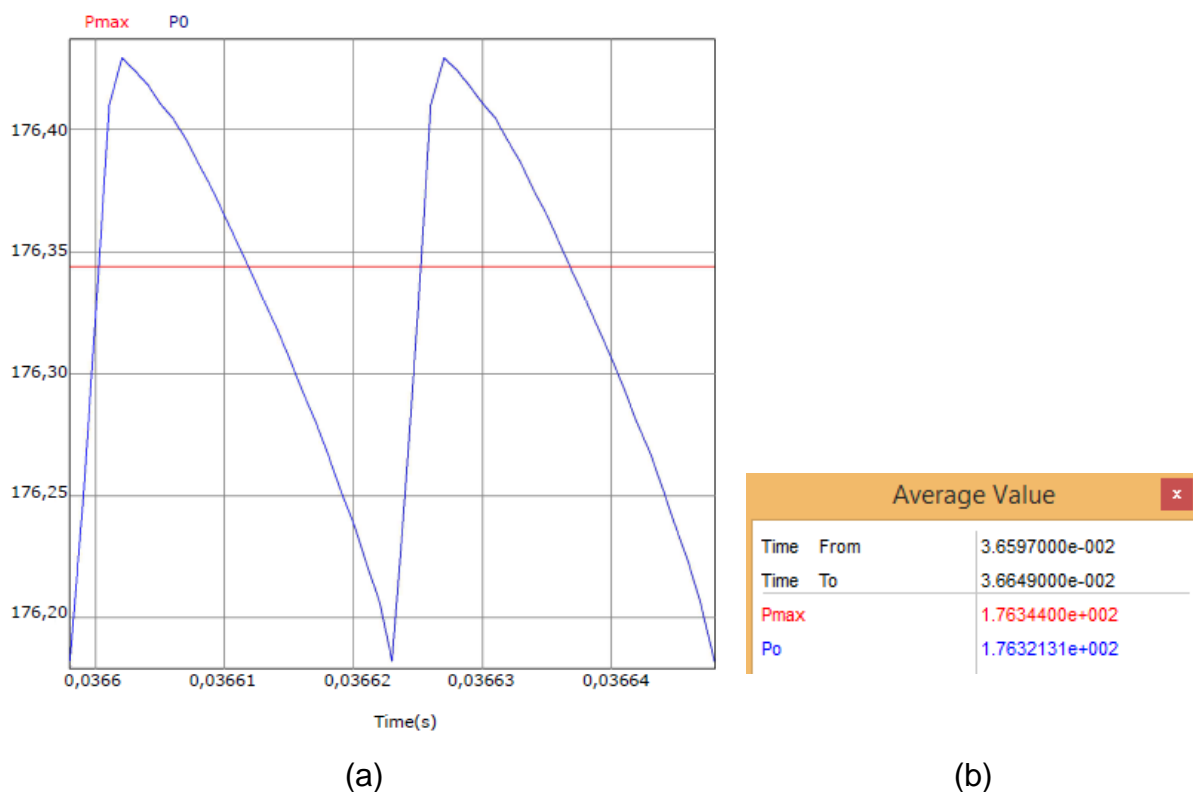


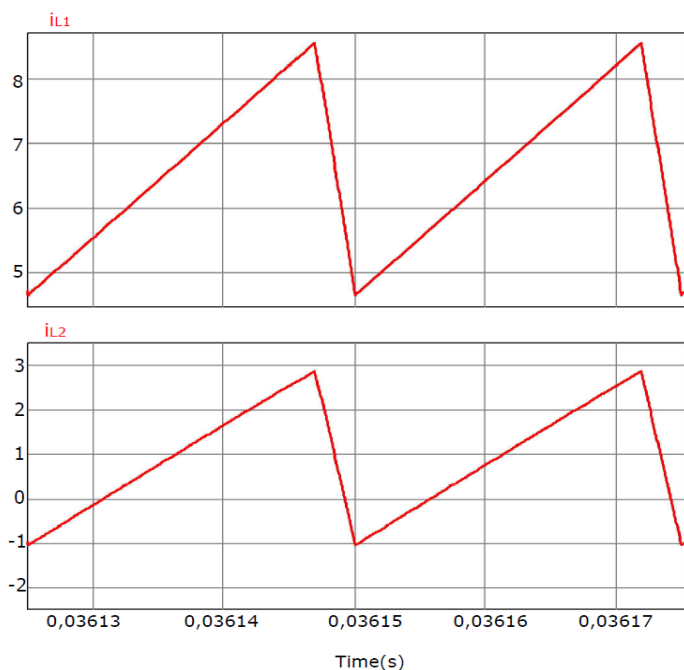
Figura 30 - Potência máxima obtida a 800W/m².
Fonte: Autoria própria.



**Figura 31 - (a) Zoom Figura 30. (b) Valores médios de potência.
Fonte: Autoria própria.**

A Figura 32 (a) mostra as formas de onda de correntes nos indutores $L1$ e $L2$. Enquanto na Figura 32 (b) demonstra os valores eficazes de corrente, e a Figura 32 (c) mostra os valores máximos.

Da Figura 31 (b) há as correntes eficazes de $L1$ com valor de 6,68 A e $L2$ com 1,46 A. Se comparado a corrente em $L1$ com o valor de corrente do painel, que é de 6.58 A, tem-se uma variação de 100 mA entre os valores. Este valor está dentro de uma faixa aceitável, e sabendo que o valor de pico não ultrapassa os 40% permitidos por projeto e de possível comparação na Figura 32 (c), comprova-se a funcionalidade do projeto, dentro dos parâmetros aceitáveis.



(a)

RMS Value	
Time From	3.6124900e-002
Time To	3.6175300e-002
$I(L1)$	6.6843448e+000
$I(L2)$	1.4665383e+000

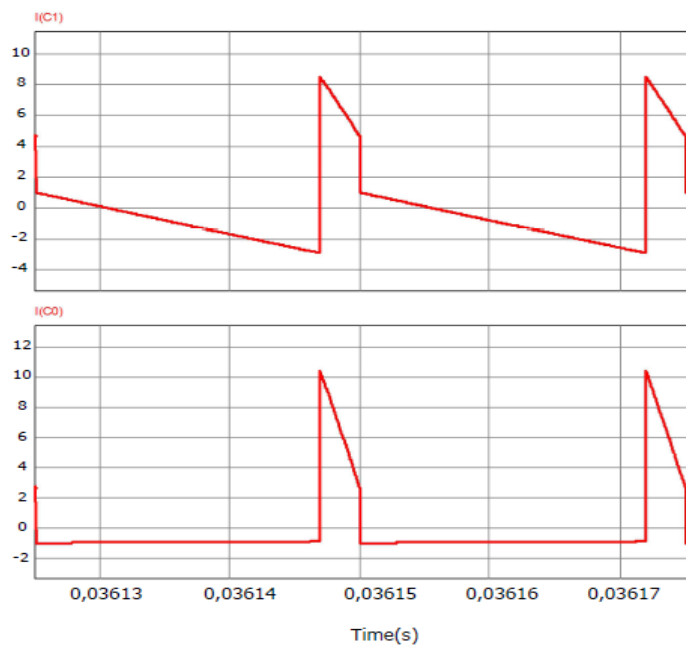
(b)

Measure	
Time	3.6146900e-002
$I(L1)$	8.5496241e+000
$I(L2)$	2.8726938e+000

(c)

Figura 32 - (a) Corrente no indutor L1 e L2. (b) Valores RMS. (c) Valor máximo de corrente.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 33 (a) tem-se as formas de ondas de corrente dos capacitores $C1$ e $C0$. Já na Figura 33 (b) e (c) os valores RMS e de pico em $C1$ e $C0$ respectivamente.



(a)

RMS Value	
Time From	3.6124900e-002
Time To	3.6175300e-002
$I(C1)$	2.7327724e+000
$I(C0)$	2.5982509e+000

(b)

Measure	
Time	3.6146950e-002
$I(C1)$	8.4964428e+000
$I(C0)$	1.0418448e+001

(c)

Figura 33 - (a) Formas de ondas de correntes em C1 e C0. (b) Corrente RMS. (c) Valor máximo em C1 e C0.
Fonte: Autoria própria.

Observando que os valores de corrente RMS de $C1$ e $C0$ são 2,73 A e 2,59A respectivamente. E de acordo com as equações 4.06 e 4.08, nota-se que os valores são satisfatórios.

Já na Figura 34 (a) tem-se as formas de ondas de corrente da chave S e do diodo D . E visto que a os valores máximos ocorrem em momentos distintos, na Figura 34 (b) há a corrente máxima na chave, e em (c), a corrente máxima no diodo.

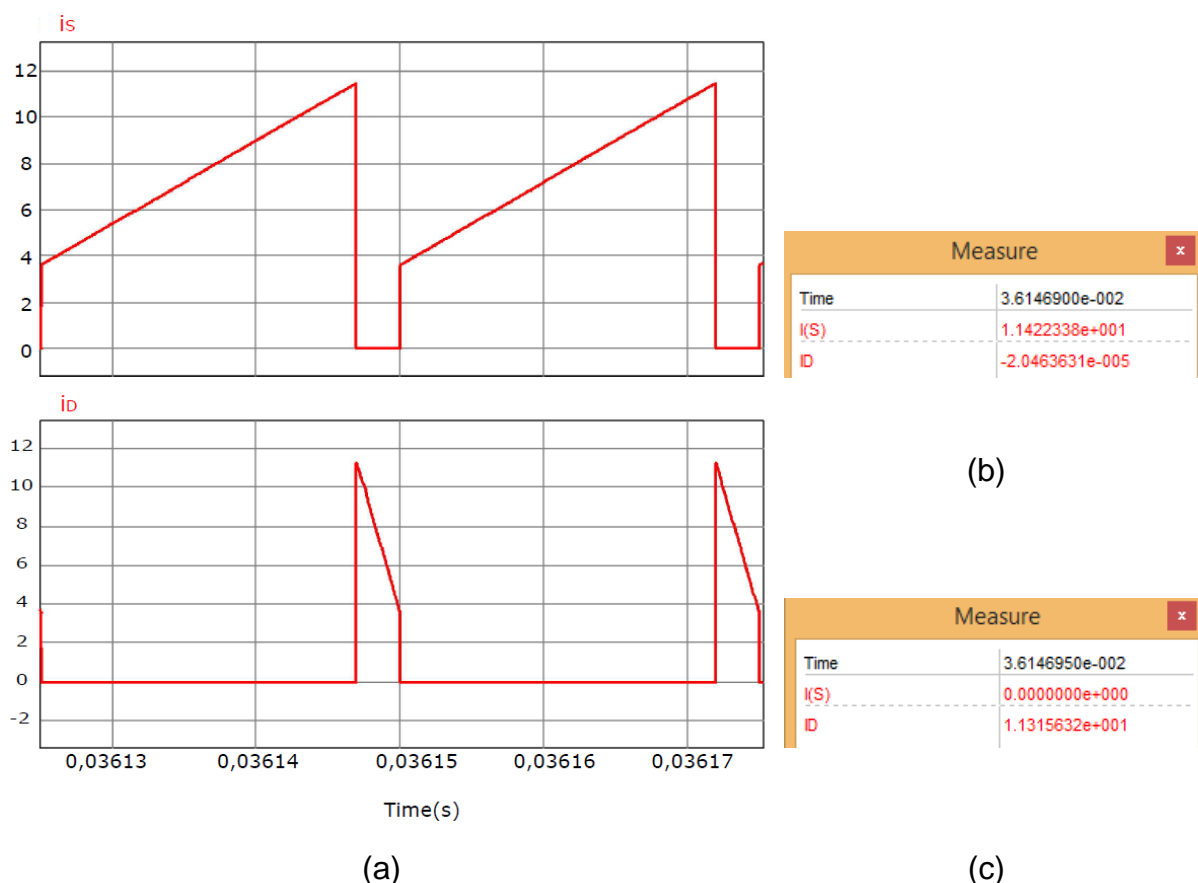


Figura 34 - (a) Formas de ondas de correntes na chave S e no diodo D . (b) Corrente máxima na chave S . (c) Corrente máximo no diodo D .
Fonte: Autoria própria.

A partir da equação 4.10, nota-se que os valores de correntes dos semicondutores estão dentro do esperado, sendo a corrente de pico para a chave S de 11,42 A, e para o diodo D de 11,31 A.

Na Figura 35 (a) encontra-se a forma de onda da tensão de saída do conversor, e a tensão no capacitor $C1$. Já em (b) tem-se a tensão média nos componentes, enquanto em (c) há a tensão de pico em $C1$

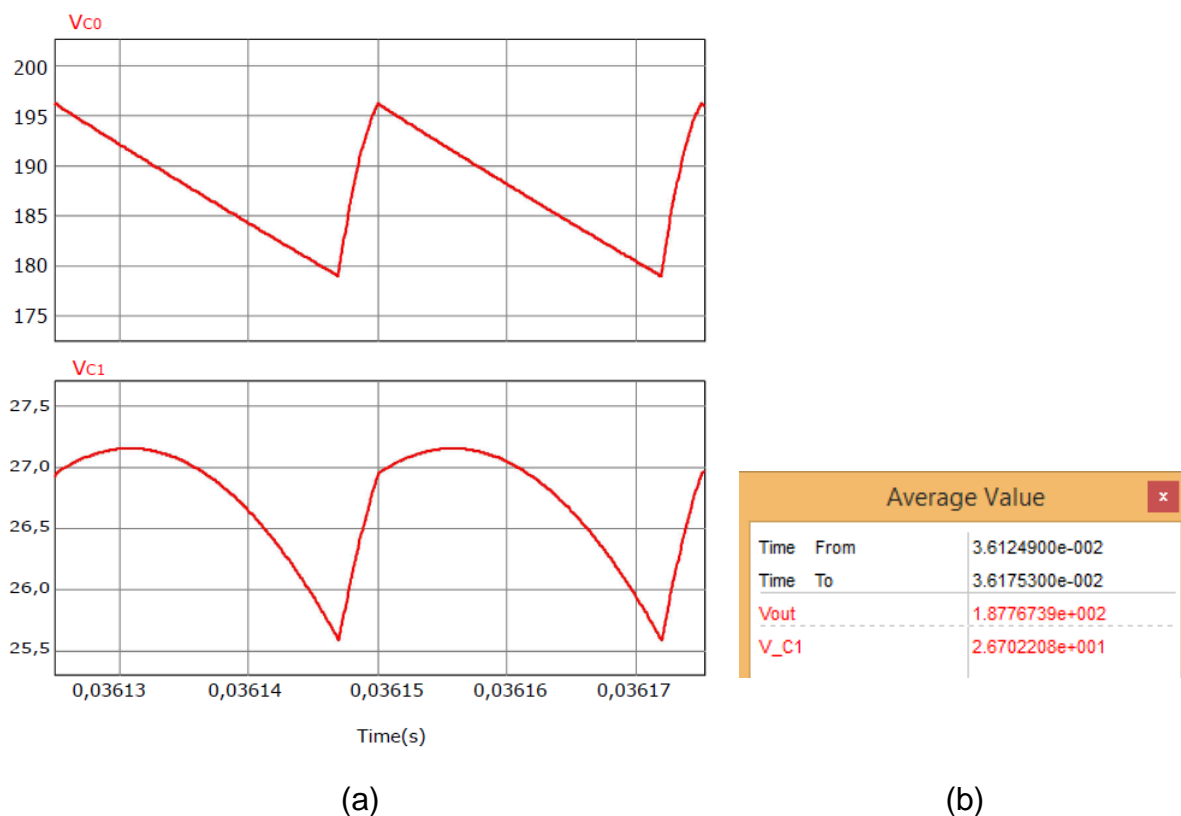


Figura 35 - Formas de ondas de tensão nos componentes C1 e C0. (b) Tensão média nos componentes.

Fonte: Autoria própria.

Sabendo que o módulo da tensão média de saída é 187,76 Volts, e observando a Figura 35 (a), nota-se como a ondulação de tensão não ultrapassa os 10% estabelecidos por projeto.

A partir da tensão do painel fotovoltaico de 26,8 Volts, para a tensão obtida na saída de 187,76 Volts, tem-se um ganho de aproximadamente 7,0. E na obtenção desses valores, o conversor trabalha com uma razão cíclica de 0,8757, estando dentro dos parâmetros estabelecidos em 4.02 e 4.03.

A Figura 36 mostra o comportamento do transitório das correntes dos indutores $L1$ e $L2$ e da tensão e da corrente na célula fotovoltaica partindo do estado de repouso com tensão de circuito aberto até atingir o ponto de máxima potência, onde permanece em regime. E sabendo que ocorrerá transitório sempre que houve variação da tensão, isso satisfaz as características do projeto.

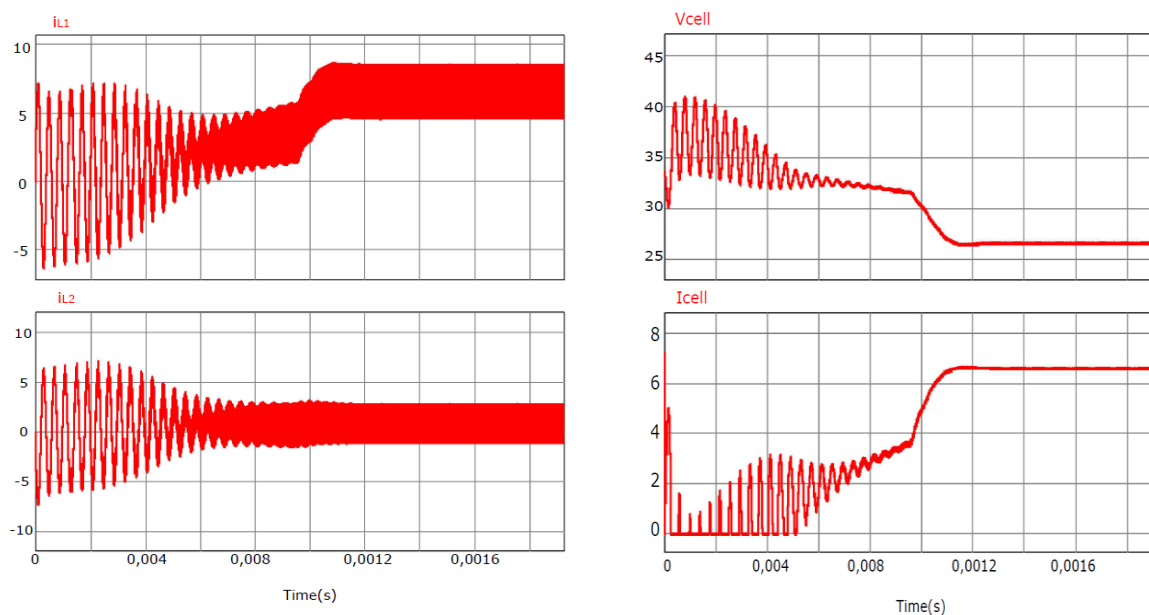


Figura 36 - Tensão e corrente da célula fotovoltaica.
Fonte: Autoria própria.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado uma análise do conversor SEPIC operando no modo contínuo de condução, para uma aplicação fotovoltaica. Foi apresentado resultados de simulações do conversor para duas situações diferentes de incidência solar, de 800 W/m^2 , e de 1000 W/m^2 ; que se encontra no Apêndice B.

Para a primeira situação tem-se a corrente RMS nos indutores $L1$ e $L2$ de $6,68 \text{ A}$ e $1,46 \text{ A}$ respectivamente, enquanto na segunda situação tem-se $8,29 \text{ A}$ e $1,69 \text{ A}$ respectivamente, permanecendo dentro da faixa dos valores esperado de projeto. Assim como o pico de corrente tem-se para $L1$ um valor de $8,54 \text{ A}$, e para $L2$ um valor de $2,87 \text{ A}$ para o primeiro caso. E já para o segundo caso tem-se $10,38 \text{ A}$ e $3,28 \text{ A}$. Em ambos os casos os valores não ultrapassam o limite de 40%.

Enquanto os capacitores precisam ser capazes de suportar a corrente eficaz que é de $2,73 \text{ A}$ para $C1$, e $2,59 \text{ A}$ para $C0$, numa incidência de 800 W/m^2 . Já para a incidência de 1000 W/m^2 $3,29 \text{ A}$ e $3,16 \text{ A}$ respectivamente para $C1$ e $C0$.

Os semicondutores precisam suportar um pico de esforço de $11,4 \text{ A}$ para o primeiro uma incidência solar de 800 W/m^2 , e de $13,6 \text{ A}$ para uma incidência de 1000 W/m^2 .

5 CONCLUSÕES

Ao longo desta monografia foi abordado o desenvolvimento dos conversores Ćuk e SEPIC para aplicação fotovoltaica. A ideia parte da utilização de energia renovável na geração de energia elétrica, visto que a utilização de combustíveis fósseis contradiz o futuro da geração de energia elétrica. E também em um cenário nacional, há necessidade de um melhor aproveitamento de outras formas de energia, já que a capacidade hídrica aproxima-se do limite.

A energia fotovoltaica é uma forma atrativa de energia por possuir uma fonte “inesgotável”. No entanto, o rendimento da conversão da energia solar para energia elétrica é baixo, se comparado a outras fontes de energia. Entretanto, a utilização está em ascensão no cenário nacional após a publicação de Resolução Normativa 482, da ANEEL, que permite pequenos geradores conectem-se com a rede de distribuição, utilizando a mesma como banco de bateria.

Juntamente com o painel fotovoltaico é necessária a utilização de um conversor CC-CC, que é um circuito eletrônico que fornece uma tensão regulada na saída a partir de uma fonte de tensão não regulada, ou também podem trabalhar na obtenção do ponto máximo de potência. Os conversor CC-CC que foram estudados neste projeto, são os conversores Ćuk e SEPIC. Ambos os conversores são abaixadores-elevadores de tensão, e ambos contêm um indutor em série com a fonte de entrada, o que limita a variação brusca de corrente, facilitando a utilização do algoritmo MPPT. O conversor Boost também atenderia o requisito de elevador de tensão, com um indutor em série com a fonte de entrada, no entanto, os conversores Ćuk e SEPIC são conversores pouco explorados na literatura, o que caracterizou uma motivação a mais ao projeto.

O trabalho foi desenvolvido na obtenção do ponto máximo de potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT), sendo isso o melhor aproveitamento da energia à qual o módulo solar está exposto. O ponto de máxima potência é obtido quando o conversor opera no ponto máximo específico da curva I-V.

O algoritmo de MPPT de Perturbação e Observação (P&O) foi o utilizado por ser de fácil projeto e implementação. Ele funciona na perturbação periódica, incrementando ou decrementando a tensão do arranjo solar em uma determinada direção, para assim observar o comportamento da potência de saída. Ao obter o valor

da potência nova de saída, é feita uma comparação com a antiga potência para saber se a potência nominal aumentou, e se positivo, o sistema continuará incrementando ou decrementando na mesma direção, e caso contrário, a situação se inverte.

Foram apresentadas análises dos dois conversores operando no modo de condução contínua, utilizando componentes ideais. A fim de fomentar uma análise comparativa, a Tabela 3 fornece uma visão geral de alguns módulos de valores obtidos através das simulações para a incidência solar de 800W/m² para ambos os projetos.

Tabela 3 – Resultados de projeto para incidência solar de 800 W/m²

Parâmetros	ĆUK	SEPIC
Indutância L1	150uH	150uH
Indutância L2	1,8mH	150uH
Capacitância C1	1,1uF	6,8uF
Capacitância C0	60nF	1,1uF
Potência P _o	176,32W	176,32W
Corrente máxima em L1	8,48A	8,54A
Corrente máxima em L2	1,07A	2,87A
Corrente RMS em L1	6,74A	6,68A
Corrente RMS em L2	0,94A	1,46A
Corrente RMS em C1	2,92A	2,73A
Corrente RMS em C0	0,09A	2,59A
Corrente máxima em D	9,47A	11,42A
Corrente máxima em S	9,56A	11,31A
Tensão máxima em C1	221,7V	27,3V
Tensão média em C0	186,7V	187,7V

Fonte: Autoria Própria.

Observando a Tabela 3, que são os resultados obtidos nos Capítulos 3 e 4, percebe-se que ambos os conversores possuem o indutor *L1* de indutância de 150 uH. Enquanto o indutor *L2* do conversor Ćuk tem uma maior indutância em relação ao do conversor SEPIC. Já para os capacitores a situação se inverte, onde ambos os capacitores do conversor Ćuk tem uma menor capacitância, resultado em menor massa, custo e volume.

Em sequência, nota-se como os esforços de corrente sobre os componentes do conversor SEPIC são iguais ou superiores ao do conversor Ćuk. No entanto, ambos os conversores realizam o projeto com eficiência, tendo todas as ondulações de corrente e tensão dentro das faixas aceitáveis, e prevista em projeto.

Mas observando as Figuras 26 e 36, nota-se como o conversor SEPIC possui transitórios de maior amplitude. E assim, devido a este motivo, e os citados acima, caracteriza-se o conversor Ćuk uma melhor opção para o projeto.

Uma primeira opção de trabalho futuro seria a implementação prática do projeto.

Uma outra proposta seria a comparação do conversor Boost, com o conversor Ćuk, para obtenção do MPPT, visto que o conversor Boost é de maior facilidade para projeto e controle.

E uma última proposta interessante, seria o estudo dos outros algoritmos de MPPT para apenas um projeto de conversor, para assim analisar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2015.
- ANICETO, José M. A. **Conversor DC-DC com busca de ponto de potência máxima (MPPT) para painéis solares**. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, p. 110. 2010.
- BARBI, Ivo; MARTINS, Deniz C. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básico não isolados**. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2006.
- BRITO, Moacyr A. G. D. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica**. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, p. 221. 2013.
- BRITTO, Jonas R. D. **Análise, Projeto e Implementação de Conversores CC-CC com Ampla Faixa de Conversão Aplicados em Iluminação de Estado Sólido**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 216. 2009.
- BURKART, Ralph; KOLAR, Johann W. **Overview and Comparison of Grid Harmonics and Conducted EMI Standards for LV Converters Connected to the MV Distribution System**. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Zurich, p. 9. 2012.
- DWIVEDI, Rheesabh; DWIVEDI, Vinay K.; SHARMA, Rahul. **Parametric variation analysis of Cuk converter for constant voltage application**. Uttar Pradesh Technical University. Lucknow, p. 10. 2014.
- ECO CASA. Energia Fotovoltaica. **Site da Eco Casa**, 2014. Disponível em: <<http://www.ecocasa.com.br/energia-fotovoltaica.asp>>. Acesso em: 22 set. 2014.
- ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragomir. **Fundamentals of Power Electronics**. 2ª. ed. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- FARANDA, Roberto; LEVA, Sonia. **Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems**. Politecnico di Milano. Milão, p. 10. 2008.
- HANSEN, Anca et al. **Models for a Stand-Alone PV System**. Risø National laboratory. Roskilde, p. 78. 2000.
- HART, Daniel H. **Eletrônica de Potência**. Madrid: Pearson Educación, S.A., 2001.
- INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Dois recordes mundiais em células solares. **Inovação Tecnológica**, 2014. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=dois-novos->

recordes-mundiais-celulas-solares&id=010115141230#.VPSaZ_nF9h4>. Acesso em: 02 mar. 2015.

KYOCERA. **High Efficiency Multi-Cristalline Photovoltaic Module KD245GH-4FB2**. [S.l.].

NASCIMENTO, Cássio A. D. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG, p. 21. 2004.

NETO, João T. D. C. **Controle Robusto Aplicado a Conversor Buck-Boost em Sistemas Fotovoltaicos**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 129. 2012.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª. ed. New Jersey: Prentice-Hall do Brasil, 2003.

POMILIO, José A. **Fontes Chaveadas**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/fontchav.html>>. Acesso em: 01 dez. 2014.

POMILIO, José A. **Pré-reguladores de Fator de Potência - PFP**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pfp.html>>. Acesso em: 04 dez. 2014.

PORTAL ENERGIA. Energia Fotovoltaica. **Portal Energia**, 2004. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2015.

SEGUEL, Julio I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de supriemento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 222. 2009.

SILVA, João M. G. D. O Controlador Proporcional-Integral (PI). **ECE UFRGS**, 2000. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node28.html>>. Acesso em: 31 jul. 2015.

TAVARES, Carlos A. P. **Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 131. 2009.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM2611 1.4MHz Cuk Converter**. Texas Instruments. Texas, p. 24. 2001.

TEXAS INSTRUMENTS. **AN - 1484 Designing A Sepsic Converter**. Texas Instruments. Dallas, p. 11. 2006.

VALENTE, Miguel Â. S. **Caracterização Automática de um Painel**. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, p. 82. 2011.

YE, Hong; LUO, Fang L. **Essential DC/DC Converter**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2006.

APÊNDICE A

O objetivo do presente apêndice é mostrar os resultados obtidos para a incidência solar de 1000W/m^2 para o conversor ĆUK.

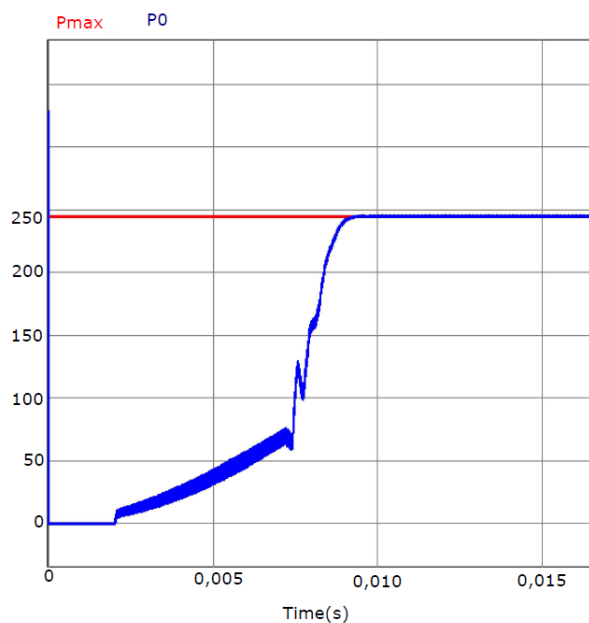
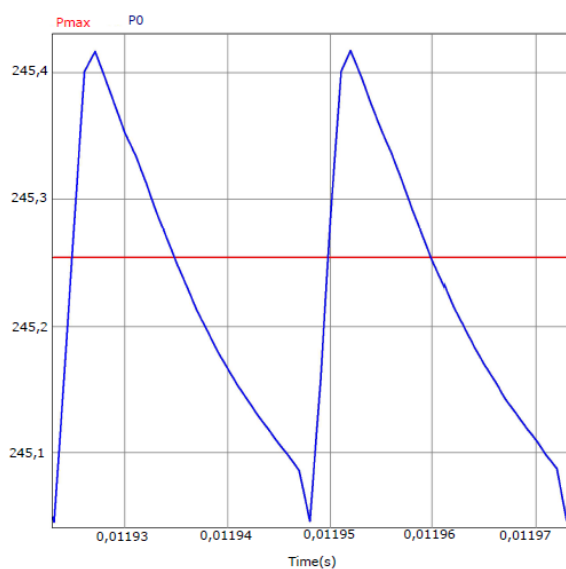


Figura 37 - Potência máxima/obtida a 1000W/m^2 .
Fonte: Autoria própria.

A Figura 37 mostra que o sistema demora cerca de 10 milissegundos para atingir o ponto máximo. Sendo esse ponto de 245,2 Watts, como mostrado na Figura 38.



(a)

Average Value		
Time	From	1.1922000e-002
Time	To	1.1974000e-002
Pmax		2.4525400e+002
Po		2.4522149e+002

(b)

Figura 38 – (a) Zoom Figura 37. (b) Valores médios de potência.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 39 (b) tem o valor RMS das correntes nos indutores $L1$ e $L2$ sendo 8,38 A e 1,09 A respectivamente. E como pode ser comparada ao valor máximo em 39 (c), nota-se como está dentro dos 40% aceitáveis por projeto

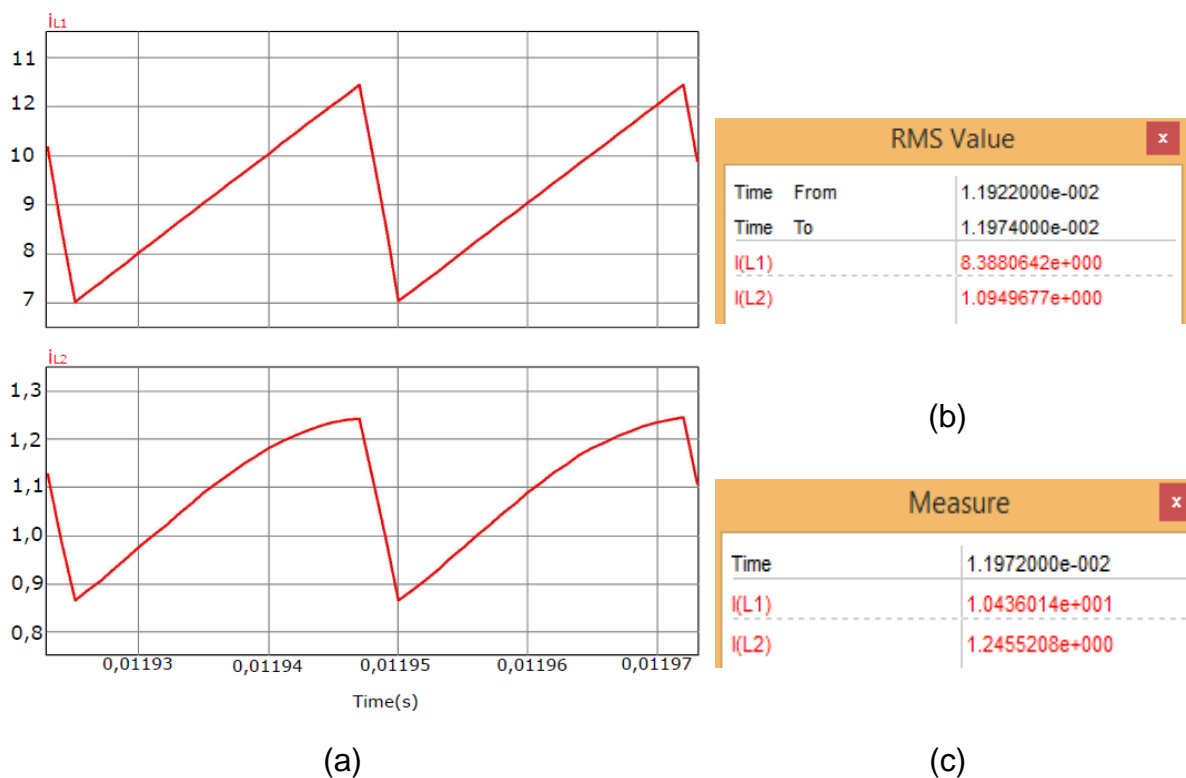
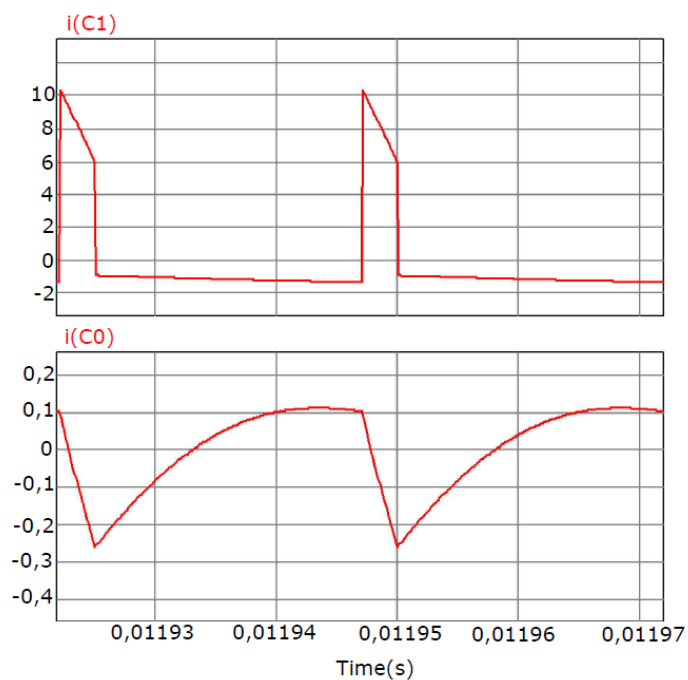


Figura 39 – (a) Corrente no indutor $L1$ e $L2$. (b) Valores RMS. (c) Valor máximo de corrente.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 (b) tem os valores da corrente RMS dados capacitor $C1$ e $C0$, sendo 3,04 A e 1,14 A respectivamente.



(a)

RMS Value		
Time From		1.1921700e-002
Time To		1.1972000e-002
$i(C1)$		3.0442967e+000
$i(C0)$		1.1449772e-001

(b)

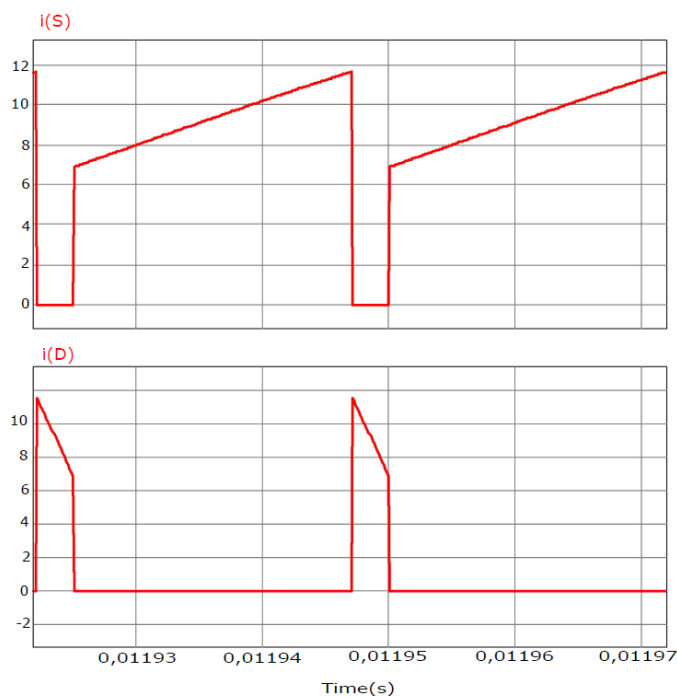
Measure	
Time	1.1947100e-002
$i(C1)$	1.0293578e+001
$i(C0)$	9.4188551e-002

(c)

Figura 40 – (a) Formas de ondas de correntes em C1 e C0. (b) Corrente RMS. (c) Valor máximo em C1.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 mostra o pico de corrente para a chave S sendo de 11,46 A, enquanto para o diodo de D de 11,55 A.



(a)

Measure	
Time	1.1946000e-002
$i(S)$	1.0980744e+001
D	4.8132642e-003

(b)

Measure	
Time	1.1947100e-002
$i(S)$	0.0000000e+000
D	1.1552955e+001

(c)

Figura 41 – (a) Formas de ondas de correntes na chave S e no diodo D. (b) Corrente máxima na chave S. (c) Corrente máximo no diodo D.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 (b) mostra o módulo do valor médio da tensão de saída, 221,44V, e observando em (a), nota-se como está dentro dos 10% esperado.

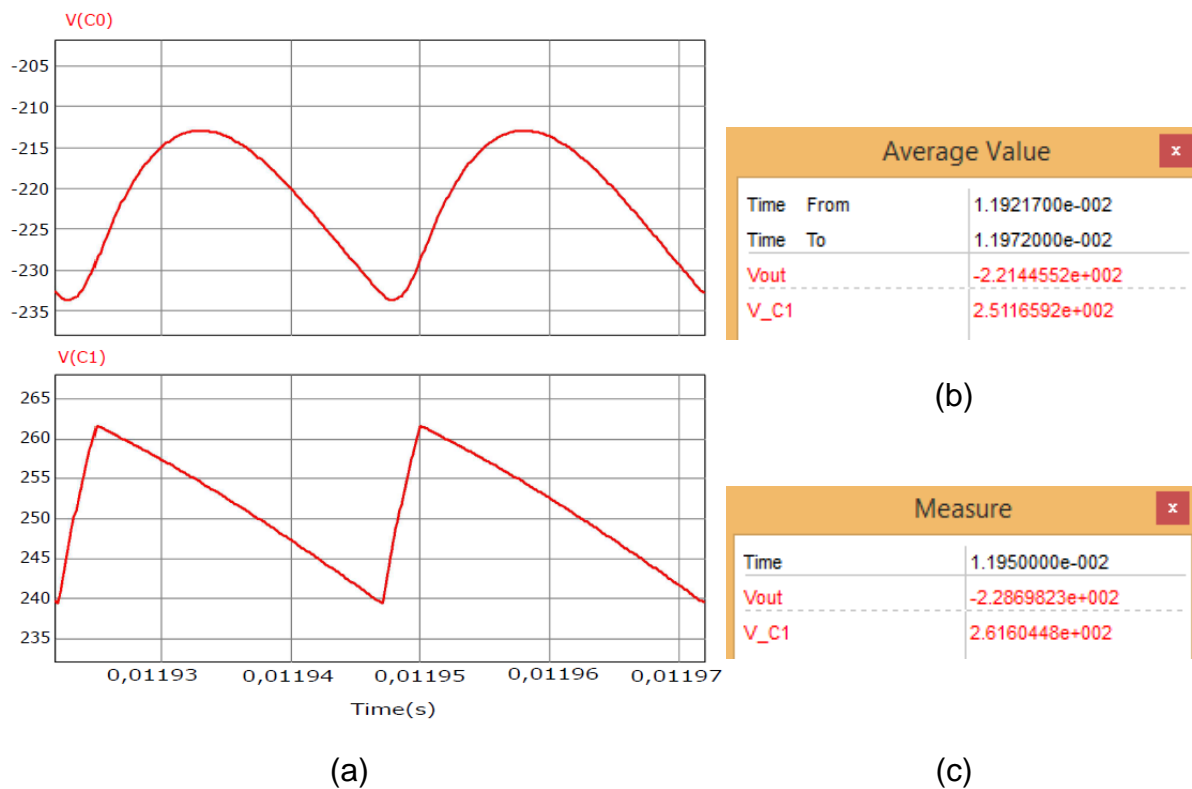


Figura 42 - Formas de ondas de tensão nos componentes C1 e C0. (b) Tensão média nos componentes. (c) Tensão de pico em C1.
Fonte: Autoria própria.

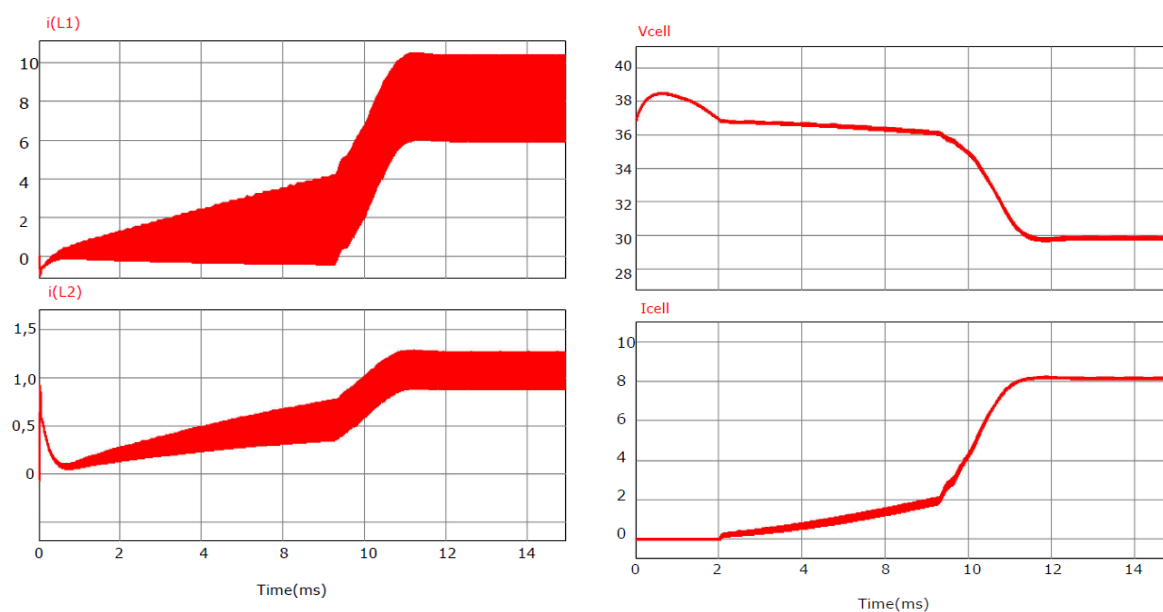


Figura 43 – Transitórios de tensão e corrente.
Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B

O objetivo do presente apêndice é mostrar os resultados obtidos para a incidência solar de $1000\text{W}/\text{m}^2$ para o conversor SEPIC.

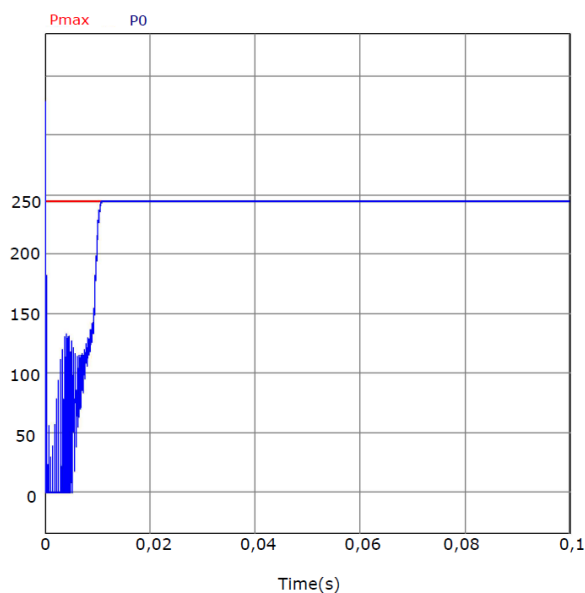


Figura 44 - Potência máxima obtida a $1000\text{W}/\text{m}^2$.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 44 mostra que o sistema demora cerca de 10 milissegundos para atingir o ponto máximo. Sendo esse ponto de 245,2 Watts, como mostrado na Figura 45.

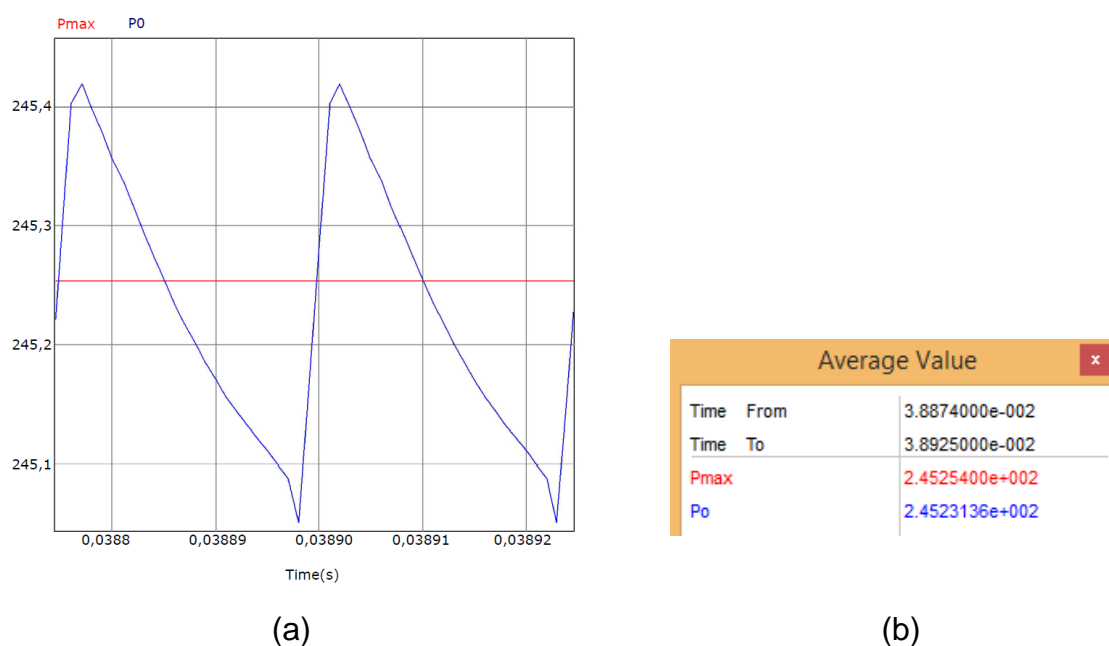
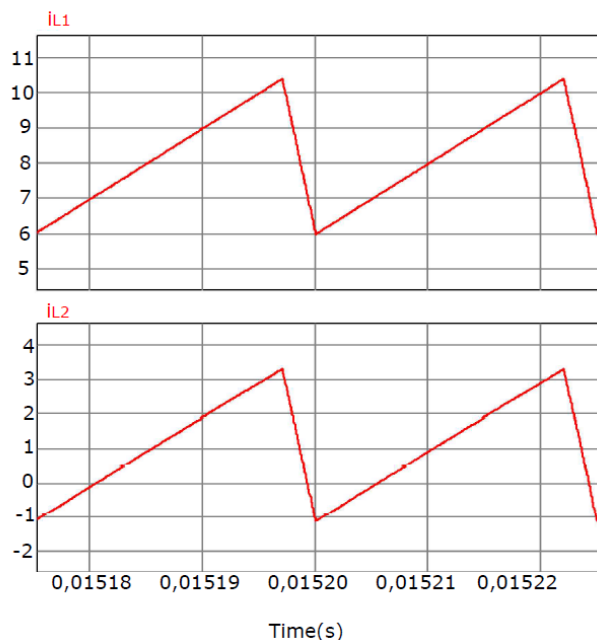


Figura 45 - (a) Zoom Figura 43. (b) Valores médios de potência.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 46 (b) tem o valor RMS das correntes nos indutores $L1$ e $L2$ sendo 8,29 A e 1,69 A respectivamente. E como pode ser comparada ao valor máximo em 46 (c), nota-se como está dentro dos 40% aceitáveis por projeto



(a)

RMS Value		
Time From	1.5175200e-002	
Time To	1.5225200e-002	
$I(L1)$	8.2977300e+000	
$I(L2)$	1.6934541e+000	

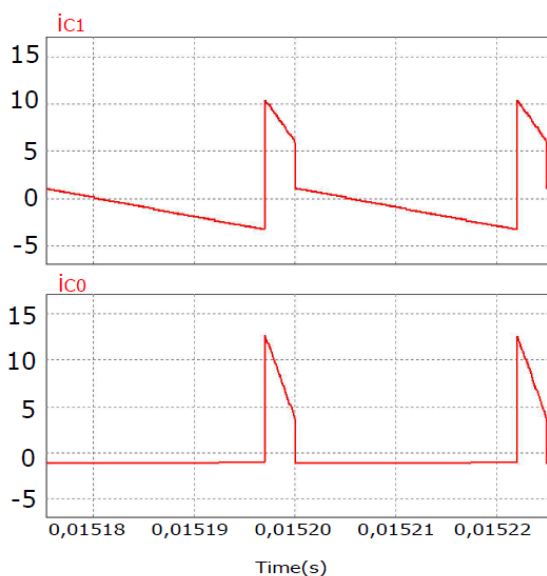
(b)

Measure	
Time	1.5197000e-002
$I(L1)$	1.0387339e+001
$I(L2)$	3.2882348e+000

(c)

Figura 46 - (a) Corrente no indutor $L1$ e $L2$. (b) Valores RMS. (c) Valor máximo de corrente.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 47 (b) tem os valores da corrente RMS dados capacitor $C1$ e $C0$, sendo 3,29 A e 3,16 A respectivamente.



(a)

RMS Value		
Time From	1.5175200e-002	
Time To	1.5225200e-002	
$I(C1)$	3.2908710e+000	
$I(C0)$	3.1642154e+000	

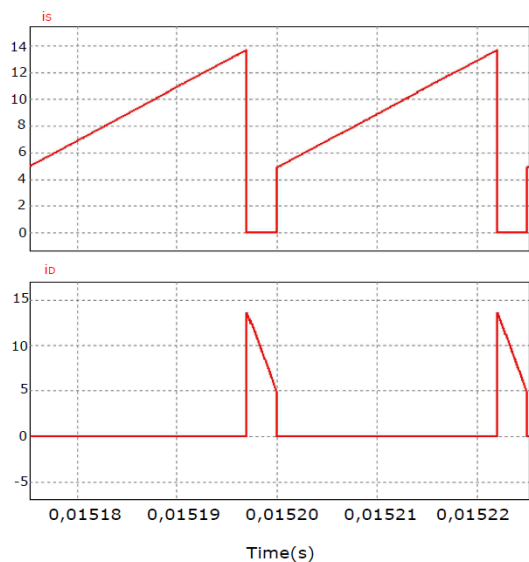
(b)

Measure	
Time	1.5197050e-002
$I(C1)$	1.0382814e+001
$I(C0)$	1.2609830e+001

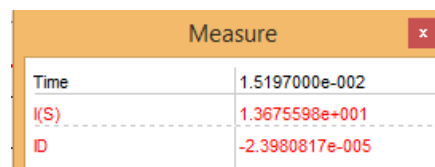
(c)

Figura 47 - (a) Formas de ondas de correntes em $C1$ e $C0$. (b) Corrente RMS. (c) Valor máximo de corrente em $C1$ e $C0$.
Fonte: Autoria própria.

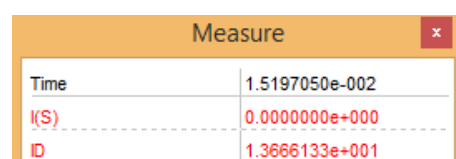
A Figura 48 mostra o pico de corrente para a chave S sendo de 13,67 A, enquanto para o diodo de D , de 13,66 A.



(a)



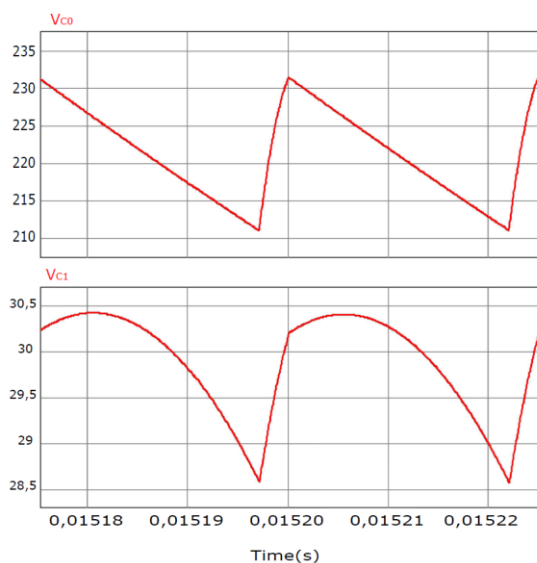
(b)



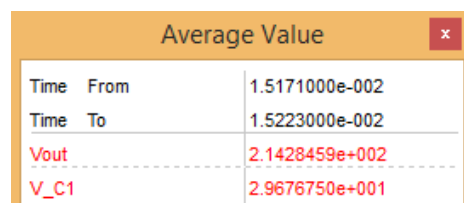
(c)

Figura 48 - (a) Formas de ondas de correntes na chave S e no diodo D . (b) Corrente máxima na chave S . (c) Corrente máximo no diodo D .
Fonte: Autoria própria.

A Figura 49 (b) mostra o módulo do valor médio da tensão de saída, 214,28 Volts, e observando em (a), nota-se como está dentro dos 10% esperado.



(a)



(b)

Figura 49 - Formas de ondas de tensão nos componentes $C1$ e $C0$. (b) Tensão média nos componentes.
Fonte: Autoria própria.

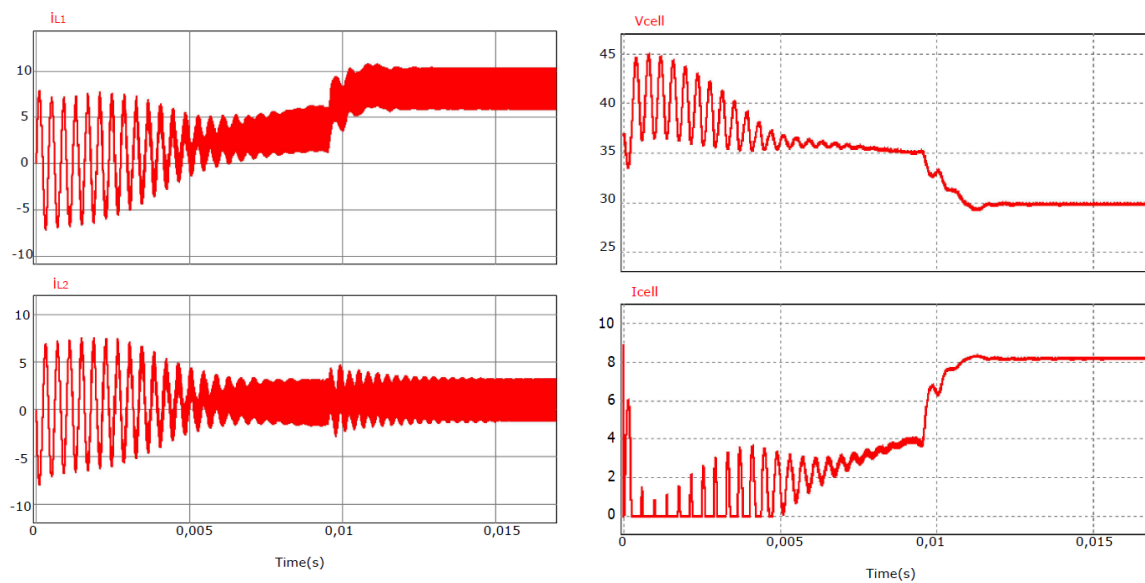


Figura 50 - Tensão e corrente da célula fotovoltaica.
Fonte: Autoria própria.