

Raul Henrique Santana

**Estudo de Microinversores Baseados no  
Conversor Ćuk Para Painéis Fotovoltaicos  
Conectados à Rede Elétrica**

Belo Horizonte

2019



Raul Henrique Santana

# **Estudo de Microinversores Baseados no Conversor Ćuk Para Painéis Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Pedro Francisco Donoso-Garcia

Belo Horizonte

2019



# Lista de ilustrações

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica (de Oliveira et al., 2016)                                       | 12 |
| Figura 2 – Curvas IxV de painel fotovoltaico para diferentes (a) irradiâncias e (b) temperaturas . . . . .                  | 13 |
| Figura 3 – Conversor Ćuk convencional (Czarkowski, 2001) . . . . .  | 13 |
| Figura 4 – Sinais de entrada, saída e tensões no transistor e no diodo do conversor cuk convencional . . . . .              | 14 |
| Figura 5 – Tensão de ripple de saída do conversor cuk convencional . . . . .  | 14 |
| Figura 6 – Conversor Ćuk entrelaçado de duas fases (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015) . . . . .                           | 16 |
| Figura 7 – Sinais de entrada, saída e tensões no transistor e no diodo do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . . | 16 |
| Figura 8 – Tensão de ripple de saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases .   | 17 |
| Figura 9 – Inversor VSI monofásico em ponte completa (Espinoza, 2001) . . . . .   | 18 |
| Figura 10 – Formas de onda do inversor VSI com PWM bipolar . . . . .  | 19 |
| Figura 11 – Formas de onda do inversor VSI com PWM unipolar . . . . .   | 20 |
| Figura 12 – Inversor Ćuk Integrado (Luigi et al., 2010) . . . . .   | 21 |
| Figura 13 – Sinais de entrada e saída do inversor cuk integrado . . . . .   | 21 |
| Figura 14 – Sinais de entrada e saída do inversor cuk integrado em regime permanente  | 21 |
| Figura 15 – Fluxograma do Método P&O, baseado no diagrama de Beriber e Talha (2013) . . . . .                               | 23 |
| Figura 16 – Fluxograma do método de indutância incremental (Beriber; Talha, 2013)   | 24 |
| Figura 17 – Topologia do filtro LCL monofásico(Mahamat et al., 2017) . . . . .  | 25 |
| Figura 18 – Curvas IxV do painel selecionado (Canadian Solar, 2018) . . . . .   | 27 |
| Figura 19 – Parâmetros do módulo fotovoltaico no PSIM . . . . .   | 28 |
| Figura 20 – Características do módulo fotovoltaico no PSIM . . . . .  | 28 |
| Figura 21 – Circuito do módulo fotovoltaico no PSIM . . . . .   | 29 |
| Figura 22 – Circuito do conversor cuk convencional . . . . .  | 31 |
| Figura 23 – Corrente de ripple no indutor $L1$ do conversor cuk convencional . . . .  | 31 |
| Figura 24 – Corrente de ripple no indutor $L2$ do conversor cuk convencional . . . .  | 32 |
| Figura 25 – Tensão de ripple no capacitor $C1$ do conversor cuk convencional . . . .  | 32 |
| Figura 26 – Comportamento da tensão de saída do conversor cuk convencional . . .  | 32 |
| Figura 27 – Tensão de ripple de saída do conversor cuk convencional . . . . .   | 33 |
| Figura 28 – Potência na entrada e saída do conversor cuk convencional . . . . .   | 33 |
| Figura 29 – Oscilação da potência na saída do conversor cuk convencional . . . . .  | 33 |
| Figura 30 – Circuito do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .   | 35 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 31 – Corrente de ripple no indutores $L_{11}$ e $L_{21}$ do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .                             | 36 |
| Figura 32 – Corrente de ripple na entrada do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .   | 36 |
| Figura 33 – Corrente de ripple nos indutores $L_{12}$ e $L_{22}$ do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .                            | 36 |
| Figura 34 – Tensão de ripple nos capacitores $C_{11}$ e $C_{21}$ do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .                            | 37 |
| Figura 35 – Comportamento da tensão de saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .  | 37 |
| Figura 36 – Tensão de ripple de saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .   | 37 |
| Figura 37 – Potência na entrada e saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .   | 38 |
| Figura 38 – Oscilação da potência saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .   | 38 |
| Figura 39 – Inversor VSI Bipolar . . . . .   | 39 |
| Figura 40 – Sinal de saída do inversor VSI bipolar . . . . .   | 39 |
| Figura 41 – Inversor VSI Unipolar . . . . .  | 40 |
| Figura 42 – Sinal de saída do inversor VSI unipolar . . . . .  | 40 |
| Figura 43 – Circuito do inversor cuk integrado . . . . .   | 41 |
| Figura 44 – Sinal de saída do inversor cuk integrado . . . . .   | 41 |
| Figura 45 – Corrente no indutor $L1$ do inversor cuk integrado . . . . .   | 42 |
| Figura 46 – Detalhe da oscilação na corrente no indutor $L1$ do inversor cuk integrado . . . . .   | 42 |
| Figura 47 – Tensão no capacitor $C1$ do inversor cuk integrado . . . . .   | 42 |
| Figura 48 – Detalhe da oscilação na tensão no capacitor $C1$ do inversor cuk integrado . . . . .   | 43 |
| Figura 49 – Circuito de MPPT implementado . . . . .  | 43 |
| Figura 50 – Circuito do conversor cuk convencional alimentado pelo painel fotovoltaico com MPPT . . . . .  | 44 |
| Figura 51 – Comportamento do ciclo de trabalho e da potência de saída para alterações de irradiância para o conversor cuk convencional . . . . . | 44 |
| Figura 52 – Circuito do conversor cuk entrelaçado alimentado pelo painel fotovoltaico com MPPT . . . . .   | 44 |
| Figura 53 – Comportamento do ciclo de trabalho e da potência de saída para alterações de irradiância para o conversor cuk entrelaçado . . . . .  | 45 |
| Figura 54 – Filtro LCL implementado . . . . .  | 46 |
| Figura 55 – Circuito implementado para o inversor cuk convencional bipolar . . . . .   | 47 |
| Figura 56 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk convencional bipolar . . . . .   | 48 |
| Figura 57 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk convencional bipolar . . . . .  | 48 |
| Figura 58 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk convencional bipolar com variação de irradiância . . . . .                             | 48 |
| Figura 59 – Circuito implementado para o inversor cuk convencional unipolar . . . . .  | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 60 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk convencional unipolar . . .                                   | 49 |
| Figura 61 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk convencional unipolar . . . . .                | 50 |
| Figura 62 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk convencional unipolar com variação de irradiância . . . . . | 50 |
| Figura 63 – Circuito implementado para o conversor cuk entrelaçado de duas fases com inversor bipolar . . . . .       | 51 |
| Figura 64 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk entrelaçado bipolar . . . . .                                 | 51 |
| Figura 65 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk entrelaçado bipolar . . . . .                  | 51 |
| Figura 66 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk entrelaçado bipolar com variação de irradiância . . . . .   | 52 |
| Figura 67 – Circuito implementado para o conversor cuk entrelaçado de duas fases com inversor unipolar . . . . .      | 52 |
| Figura 68 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk entrelaçado unipolar . . . . .                                | 53 |
| Figura 69 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk entrelaçado unipolar . . . . .                 | 53 |
| Figura 70 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk entrelaçado unipolar com variação de irradiância . . . . .  | 53 |
| Figura 71 – Circuito implementado para o inversor cuk integrado bipolar . . . . .                                     | 54 |
| Figura 72 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk integrado bipolar . . . . .                                   | 54 |
| Figura 73 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk integrado bipolar . . . . .                    | 55 |
| Figura 74 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk integrado bipolar com variação de irradiância . . . . .     | 55 |
| Figura 75 – Circuito implementado para o inversor cuk integrado unipolar . . . . .                                    | 56 |
| Figura 76 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk integrado unipolar . . . . .                                  | 56 |
| Figura 77 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk integrado unipolar . . . . .                   | 56 |
| Figura 78 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk integrado unipolar com variação de irradiância . . . . .    | 57 |
| Figura 79 – Circuito do inversor cuk convencional bipolar implementado . . . . .                                      | 68 |
| Figura 80 – Circuito do inversor cuk entrelaçado bipolar implementado . . . . .                                       | 69 |
| Figura 81 – Circuito do inversor cuk integrado bipolar implementado . . . . .   | 70 |
| Figura 82 – Circuito do inversor cuk convencional unipolar implementado . . . . .                                     | 71 |
| Figura 83 – Circuito do inversor cuk entrelaçado unipolar implementado . . . . .                                      | 72 |
| Figura 84 – Circuito do inversor cuk integrado unipolar implementado . . . . .  | 73 |

# Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Possíveis estados de operação de um VSI em Ponte Completa . . . . .                                  | 18 |
| Tabela 2 – Características elétricas em STC <sup>1</sup> do painel selecionado (Canadian Solar, 2018) . . . . . | 26 |
| Tabela 3 – Características de temperatura do painel selecionado (Canadian Solar, 2018) . . . . .                | 27 |
| Tabela 4 – Valores medidos para o conversor cuk convencional . . . . .  | 31 |
| Tabela 5 – Valores medidos para o conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .                             | 35 |
| Tabela 6 – Valores obtidos para o inversor cuk convencional bipolar . . . . .                                   | 48 |
| Tabela 7 – Valores obtidos para o inversor cuk convencional unipolar . . . . .                                  | 49 |
| Tabela 8 – Valores obtidos para o inversor cuk entrelaçado bipolar . . . . .                                    | 51 |
| Tabela 9 – Valores obtidos para o inversor cuk entrelaçado unipolar . . . . .                                   | 52 |
| Tabela 10 – Valores obtidos para o inversor cuk integrado bipolar . . . . .                                     | 54 |
| Tabela 11 – Valores obtidos para o inversor cuk integrado unipolar . . . . .                                    | 56 |
| Tabela 12 – Resultados de rendimento e qualidade do sinal obtidos para os conjuntos finais . . . . .            | 59 |



# Sumário

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>  | <b>9</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>Motivação</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivo</b>  | <b>11</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Estrutura Geral do Trabalho</b>                               | <b>11</b> |
| <b>2</b>   | <b>ESTADO DA ARTE</b>  | <b>12</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Modelo do PV</b>  | <b>12</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Conversores Estáticos CC/CC</b>                               | <b>13</b> |
| 2.2.1      | Conversor Ćuk Convencional                                       | 13        |
| 2.2.2      | Conversor Ćuk Entrelaçado  | 15        |
| <b>2.3</b> | <b>Conversores CC/CA - Inversores tipo fonte de tensão (VSI)</b> | <b>17</b> |
| 2.3.1      | Inversor com Modulação por Largura de Pulso Bipolar              | 18        |
| 2.3.2      | Inversor com Modulação por Largura de Pulso Unipolar             | 19        |
| <b>2.4</b> | <b>Inversor Integrado (CC/CA)</b>                                | <b>20</b> |
| 2.4.1      | Inversor Ćuk Integrado   | 20        |
| <b>2.5</b> | <b>Rastreador de ponto de máxima potência (MPPT)</b>             | <b>22</b> |
| 2.5.1      | Método Perturba e Observa (P&O)                                  | 22        |
| 2.5.2      | Método de Condutância Incremental (IC)                           | 22        |
| <b>2.6</b> | <b>Filtro</b>  | <b>24</b> |
| <b>3</b>   | <b>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO</b>                                | <b>26</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Painel Fotovoltaico</b>                                       | <b>26</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Projeto dos Conversores CC/CC</b>                             | <b>29</b> |
| 3.2.1      | Dimensionamento do Conversor Ćuk Convencional                    | 29        |
| 3.2.1.1    | Ciclo de Trabalho  | 30        |
| 3.2.1.2    | Indutores  | 30        |
| 3.2.1.3    | Capacitores  | 30        |
| 3.2.1.4    | Circuito resultante e resultados de simulação                    | 30        |
| 3.2.2      | Dimensionamento do Conversor Ćuk Entrelaçado                     | 33        |
| 3.2.2.1    | Ciclo de Trabalho  | 34        |
| 3.2.2.2    | Indutores  | 34        |
| 3.2.2.3    | Capacitores  | 34        |
| 3.2.2.4    | Circuito resultante e resultados de simulação                    | 34        |
| <b>3.3</b> | <b>Projeto dos Conversores CC/CA</b>                             | <b>38</b> |
| 3.3.1      | Inversor tipo fonte de tensão (VSI) Bipolar                      | 38        |
| 3.3.2      | Inversor tipo fonte de tensão (VSI) Unipolar                     | 39        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 3.3.3      | Inversor Ćuk Integrado . . . . .  | 40        |
| 3.3.3.1    | Circuito Resultante e resultados de simulação . . . . .                   | 41        |
| <b>3.4</b> | <b>Rastreador de ponto de máxima potência (MPPT) . . . . .</b>            | <b>43</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Filtro . . . . .</b>   | <b>45</b> |
| <b>4</b>   | <b>CONJUNTOS FINAIS . . . . .</b>   | <b>47</b> |
| 4.0.1      | Conjuntos baseados no conversor cuk convencional . . . . .                | 47        |
| 4.0.1.1    | Inversor cuk convencional bipolar . . . . .                               | 47        |
| 4.0.1.2    | Inversor cuk convencional unipolar . . . . .                              | 49        |
| 4.0.2      | Conjuntos baseados no conversor cuk entrelaçado de duas fases . . . . .   | 50        |
| 4.0.2.1    | Inversor cuk entrelaçado bipolar . . . . .                                | 50        |
| 4.0.2.2    | Inversor cuk entrelaçado unipolar . . . . .                               | 52        |
| 4.0.3      | Conjuntos baseados no inversor cuk integrado . . . . .                    | 54        |
| 4.0.3.1    | Inversor cuk integrado bipolar . . . . .                                  | 54        |
| 4.0.3.2    | Inversor cuk integrado unipolar . . . . .                                 | 55        |
| <b>5</b>   | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS . . . . .</b>                           | <b>58</b> |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSÃO . . . . .</b>  | <b>61</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>  | <b>62</b> |
|            | <b>ANEXOS . . . . .</b>   | <b>65</b> |
|            | <b>ANEXO A – CÓDIGO DA IMPLEMENTAÇÃO DE MPPT UTILIZADO . . . . .</b>      | <b>66</b> |
|            | <b>ANEXO B – CIRCUITOS DOS INVERSORES IMPLEMENTADOS NO PSIM . . . . .</b> | <b>67</b> |

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

A geração de energia elétrica no Brasil é fortemente caracterizada por um modelo geração centralizada e faz uso do conceito de economias de escala ([Machado; de Sousa; Hewings, 2016](#)). Nesse modelo, plantas de grande porte geram toda a energia, que é transmitida e distribuída aos consumidores, ou seja, a energia é gerada de forma centralizada e posteriormente entregue ao destino final. Contudo, além dos riscos e danos ambientais ocasionados por tais centrais geradoras, com foco no cenário brasileiro para a área alagada pelas usinas hidrelétricas, principal fonte de energia do país, está associada à esta estrutura a necessidade de altos investimentos relacionados à distribuição da energia gerada, tanto no condicionamento com a construção e manutenção de subestações quanto na transmissão.

Nesse cenário, a geração distribuída de energia elétrica vem se mostrando cada vez mais uma alternativa viável. Uma rede de geração distribuída pode ser definida como um conjunto de fontes de energia conectadas diretamente à rede de distribuição ou ao cliente ([Ackermann; Söder, 2001](#)).

Segundo a **ANEEL** (Agência Nacional de Energia Elétrica), desde 2012, com a vigência da solução normativa [Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012](#), é permitido ao consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica, se esta for proveniente de fontes renováveis ou cogeração qualificada. Uma maior adesão da população à GD tem como impactos esperados, além da diversificação da matriz energética nacional, a redução do carregamento e das perdas nas redes, o adiamento de investimentos em expansão e distribuição e a redução do impacto ambiental ([ANEEL, 2018](#)).

A principal vantagem na adesão ao sistema distribuído para o consumidor final é a capacidade de fornecer seu excedente de produção à rede local, de modo a obter uma redução ainda maior do valor pago à concessionária de energia no fim de cada mês.

No conjunto de fontes renováveis, destaca-se a energia fotovoltaica, que converte a energia de raios solares em eletricidade através de painéis fotovoltaicos (PV). Além de utilizar recurso abundante e não poluir durante a geração, sistemas geradores fotovoltaicos necessitam de pouca manutenção e utilizam pouco espaço, podendo ser instalados nos tetos dos imóveis. Apesar disso, o custo de instalação destes geradores ainda é elevado e, portanto, é necessário maximizar a eficiência do sistema.

Um painel fotovoltaico apresenta uma resposta não linear à incidência solar sobre sua área e, para que seja extraído deste a máxima potência possível devem ser utiliza-

dos algoritmos de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT). Aliados a estes algoritmos também se fazem necessários inversores de alto rendimento, responsáveis por condicionar a tensão contínua fornecida pelos painéis em tensão alternada que pode ser injetada diretamente na rede elétrica.

Por serem o elo de ligação entre o painel fotovoltaico e o sistema elétrico residencial e da concessionária, em sistemas *on-grid* além de representarem uma parcela considerável do custo total da implantação do gerador os inversores apresentam grande impacto na eficiência final do sistema de geração e, portanto, faz-se pertinente uma análise comparativa de custo e eficiência destes.

A tensão disponibilizada por painéis fotovoltaicos é geralmente de baixa amplitude, sendo necessário o aumento da tensão através da associação de painéis série-paralelo. Além disso, pode ser utilizado um conversor CC-CC elevador de tensão anterior à conversão do sinal contínuo em alternado. A utilização de um conversor subidor de tensão pode ser evitado em casos nos quais vários painéis são conectados em série de modo que a tensão de saída do conjunto seja maior que a tensão de pico da rede. Esta configuração é, entretanto, pouco usual em sistemas de baixa potência devido à necessidade de se garantir uma tensão mínima fornecida pelos painéis. Sendo assim, as topologias mais comuns de inversores para sistemas fotovoltaicos utilizam um estágio elevador de tensão e um estágio inversor conectados em série (Junior et al., 2011).

Com o intuito de reduzir o custo e o espaço ocupado por inversores responsáveis por lidar com a energia gerada por uma série de painéis fotovoltaicos, vem sendo estudada a utilização de microinversores (Bouzguenda et al., 2011), inversores de menor potência, montados atrás de cada painel, pelo qual são responsáveis pela otimização da geração e pelo condicionamento da energia gerada. A principal vantagem na utilização de microinversores está no fato de estes isolarem os efeitos de sombreamento entre painéis (Nezamuddin; Crespo; dos Santos, 2016).

Os microinversores também são compostos, em geral, por dois estágios. O primeiro responsável por elevar a tensão fornecida pelo painel, além de sua operação no ponto de máxima potência e o segundo responsável por gerar a corrente alternada de modo a assegurar a correta conexão com a rede elétrica (Nezamuddin; Crespo; dos Santos, 2016). Podem ser utilizadas, também, topologias integradas que buscam a simplificação e redução de componentes do circuito através da conexão direta entre os estágios (Luigi et al., 2010) (Junior et al., 2011).

É proposto nesse trabalho uma análise de diferentes implementações de microinversores para sistemas fotovoltaicos baseadas na estrutura CC-CC  $\dot{C}$ uk. Serão estudados inversores com conversores  $\dot{C}$ uk,  $\dot{C}$ uk entrelaçado e o inversor  $\dot{C}$ uk integrado-, esse último proposto por (Luigi et al., 2010).

A utilização de conversores Ćuk se faz interessante devido ao fato de estes apresentarem comportamento de fonte de corrente (Junior et al., 2011), o que torna mais simples sua conexão de sua saída à rede elétrica, que apresenta o comportamento de uma fonte de tensão, já que devem ser mantidos os níveis de tensão independente da corrente drenada. Isso elimina a necessidade de impedâncias em série entre o inversor e a rede elétrica, utilizadas para limitar a corrente de saída do inversor, as quais são necessárias quando este apresenta características de fonte de tensão. Além disso, o conversor Ćuk apresenta baixo ripple de corrente, o que resulta em baixas perdas e melhor eficiência na conversão (Shawky; Ahmed; Orabi, 2016).

A fonte de energia utilizada será um painel fotovoltaico com potência de aproximadamente 300W, será escolhido e implementado um algoritmo de MPPT e feita, também, uma análise da distorção harmônica injetada por cada implementação.

## 1.2 Objetivo

O objetivo principal deste TCC é o estudo, projeto, simulação e análise de um sistema de geração de energia elétrica composto por painel fotovoltaico e conversores CC-CC e CC-CA.

As implementações que serão analisadas estão listadas a seguir e serão combinadas com inversores em ponte completa bipolar e unipolar.

- Conversor Ćuk convencional
- Conversor Ćuk Entrelaçado de duas fases
- Inversor Ćuk integrado

## 1.3 Estrutura Geral do Trabalho

O capítulo 1 introduz o tema e o objeto de estudo, com uma breve explicação e contextualização do problema. No capítulo 2 é apresentado o estado da arte e o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 3 é descrito o desenvolvimento das etapas do projeto, desde a escolha do painel fotovoltaico utilizado até o dimensionamento do filtro de saída. O capítulo 4 é destinado à exposição dos conjuntos finais, compostos pela interconexão dos componentes projetados no capítulo anterior. No quinto capítulo são discutidos os resultados apresentados no capítulo anterior, enquanto no sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas pelo estudo.

## 2 Estado da Arte

### 2.1 Modelo do PV

O circuito equivalente de células fotovoltaicas pode ser representado por uma fonte de corrente, como pode ser visto na figura 1. Este modelo é amplamente aceito e utilizado em trabalhos relacionados a energia fotovoltaica e seu comportamento é descrito pelas equações 2.1 a 2.6, nas quais  $i_{pv}$  é a corrente e  $V$  a tensão de saída da célula solar, respectivamente.  $I_{ph}$  é a fotocorrente e  $I_r$  a corrente reversa de saturação da célula,  $R_s$  e  $R_p$  são as resistências série e shunt,  $q$  é a carga do elétron e  $\eta$  é o fator de idealidade da junção p-n.  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  representa a temperatura ambiente, em Kelvins e  $G$  representa a densidade de potência da irradiação solar.  $T_r$  é a temperatura nominal, em Kelvins (298K),  $I_{sc}$  é a corrente de curto circuito em condições padrão de teste (STC) ( $T_r = 25^\circ C$  e  $G = 1 kW/m^2$ ),  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura,  $I_{rr}$  é a corrente de saturação reversa em STC e  $E_g$  é o *gap* de energia entre as bandas (1.1eV).  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto das células,  $N_s$  é o número de células por painel e  $M_s$  é o número de painéis conectados em série (de Oliveira et al., 2016).

$$i_{pv} = I_{ph} - I_r \left[ e^{q(V+i_{pv}R_s)/\eta kT} - 1 \right] - \frac{V + i_{pv}R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

$$I_{ph} = [I_{SC} + \alpha (T - T_r)] \frac{G}{1000} \quad (2.2)$$

$$I_r = I_{rr} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 e^{[(qE_g/\eta k)((1/T_r) - (1/T))]} \quad (2.3)$$

$$I_{rr} = \frac{I_{SC} - (V_{oc}/R_p)}{e^{(qV_{oc}/\eta kT_r)} - 1} \quad (2.4)$$

$$V_{pv} = V N_s M_s \quad (2.5)$$

$$V_{ocPV} = V_{oc} N_s M_s \quad (2.6)$$

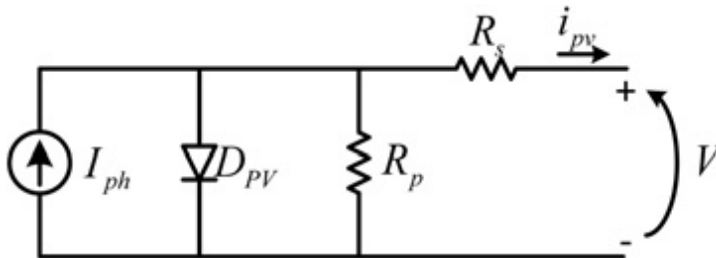


Figura 1 – Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica (de Oliveira et al., 2016)

A partir das equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 é possível inferir a existência das relações entre a corrente de saída do painel fotovoltaico, sua temperatura e a irradiação solar.

De fato, quanto maior a temperatura da célula, menor sua tensão de circuito aberto e, portanto, mais rápida sua variação de corrente. Já em relação à irradiação solar, quanto menor a magnitude desta, menor a corrente máxima da célula, relação clara ao analisar a equação 2.2.

Na figura 2 são apresentadas curvas I-V para diferentes valores de irradiação solar e temperatura de painel, para servirem de demonstração da influência dessas variáveis no comportamento do painel.

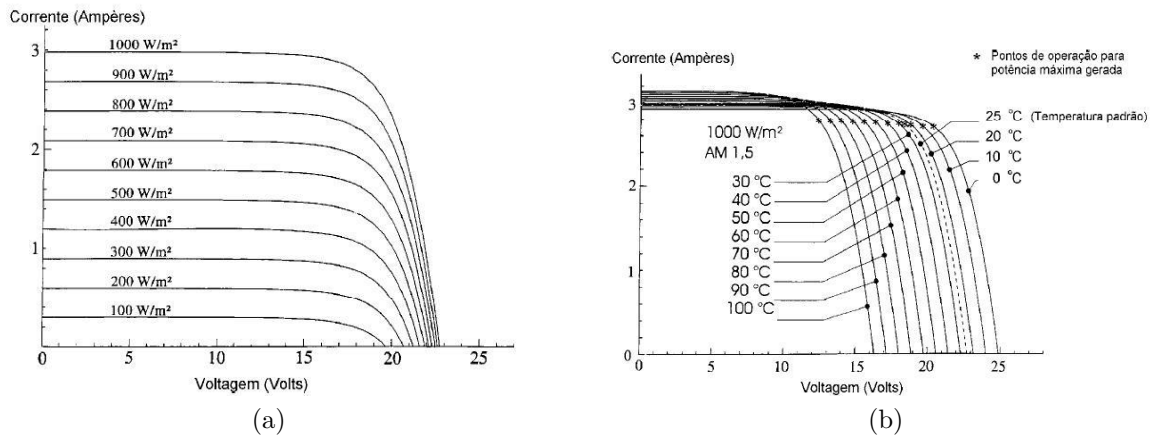


Figura 2 – Curvas IxV de painel fotovoltaico para diferentes (a) irradiâncias e (b) temperaturas

## 2.2 Conversores Estáticos CC/CC

### 2.2.1 Conversor Ćuk Convencional

Um conversor Ćuk é um conversor CC-CC baseado na transferência de energia capacitiva que é capaz de fornecer tensão maior ou menor que sua tensão de entrada, com polaridade invertida. Seu circuito pode ser visto na figura 3.

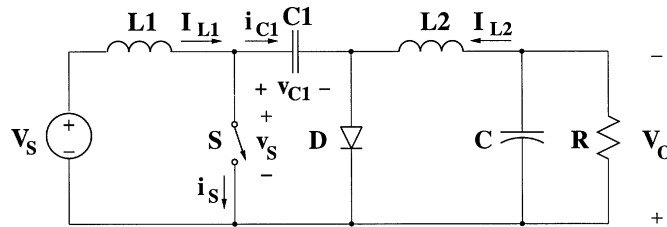


Figura 3 – Conversor Ćuk convencional (Czarkowski, 2001)

Quando a chave  $S$  está fechada ( $ON$ ), os indutores  $L1$  e  $L2$  são carregados pela tensão de entrada e capacitor  $C1$ , respectivamente. O capacitor  $C1$  polariza inversamente o diodo  $D$  e descarrega fornecendo energia para a carga  $R$ , o capacitor de filtro  $C$  e o indutor de filtro  $L2$ . Com o transistor representado pela chave  $S$  em estado aberto ( $OFF$ ),

o indutor de entrada  $L1$  carrega o capacitor de transferência de energia  $C1$ . O diodo  $D$  conduz as correntes de ambos  $L1$  e  $L2$  e, portanto, o indutor  $L2$  descarrega fornecendo energia à carga (Czarkowski, 2001) (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015).

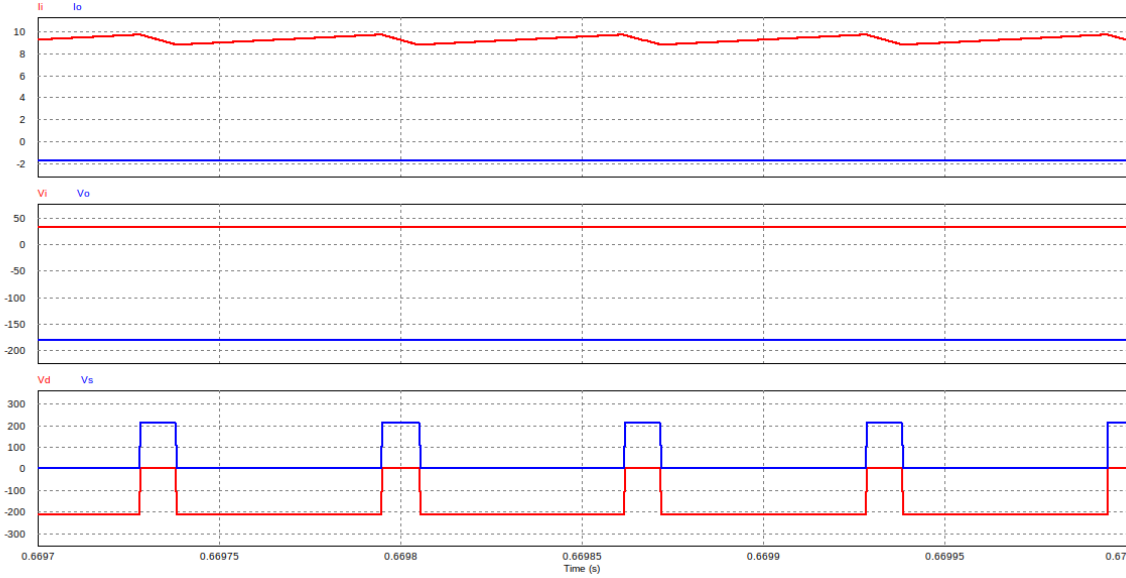


Figura 4 – Sinais de entrada, saída e tensões no transistor e no diodo do conversor cuk convencional

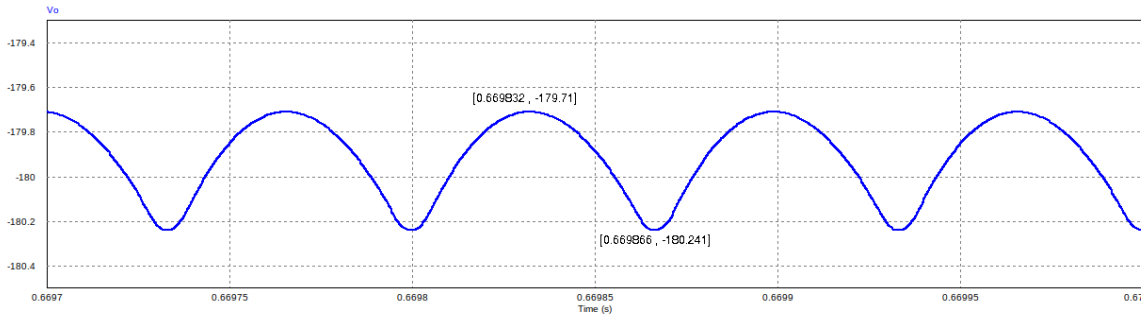


Figura 5 – Tensão de ripple de saída do conversor cuk convencional

A função de transferência CC desse conversor é dada pela equação 2.7, na qual  $d$  é o ciclo de trabalho (*duty cycle*),  $V_s$  a tensão de entrada e  $V_o$  a tensão de saída (Czarkowski, 2001) (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2018).

$$M_v = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{d}{1-d} \quad (2.7)$$

O conversor Cúk opera em modo de condução contínua para  $L1 > L_{b1}$  e  $L2 > L_{b2}$  pelas equações 2.8 e 2.9.

O capacitor de filtro  $C$  mínimo para uma certa tensão de ripple  $V_r$  pode ser encontrado utilizando a equação 2.10. Já a tensão de ripple no capacitor  $C1$  pode ser estimada



pela equação 2.11.

$$L_{b1} = \frac{(1-d)R}{2df} \quad (2.8)$$

$$L_{b2} = \frac{(1-d)R}{2f} \quad (2.9)$$

$$C_{min} = \frac{(1-d)V_o}{8V_r L_2 f^2} \quad (2.10)$$

$$V_{rc1} = \frac{dV_o}{C_1 R f} \quad (2.11)$$

Nas equações 2.8 a 2.10  $f$  é a frequência de chaveamento do transistor  $S$ . A figura 4 demonstra os sinais de tensão e corrente de entrada e saída do conversor, em estado estacionário, além da tensão no transistor e no diodo do circuito. Já a figura 5 demonstra a tensão de ripple na saída do conversor.

### 2.2.2 Conversor Ćuk Entrelaçado

Um conversor cuk entrelaçado consiste de dois conversores cuk convencionais que operam com pulsos defasados nos transistores. A conexão é feita através indutores de saída, que são conectados junto ao capacitor de saída, comum entre todas as fases. A figura 6 apresenta o circuito de um conversor cuk entrelaçado de duas fases. O objetivo principal dessa implementação reduzir o ripple de tensão na saída.

Segundo Joseph, Daniel e Unnikrishnan (2015), essa topologia tem o intuito de reduzir o ripple de corrente na entrada e reduzir o stress de chaveamento, sem sacrificar sua eficiência. Para tal, os transistores são ligados um por vez, por um período de  $T_{on}/2$ , e somente após passado um período  $T_{off}/2$  do desligamento do transistor anterior. Isso é feito utilizando-se a técnica de modulação por largura de pulso com deslocamento de fase, *PSPWM*, do inglês *Phase-Shifted Pulse Width Modulation*.

O funcionamento do conversor cuk entrelaçado de duas fases pode ser descrito em 3 modos (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015):

- Modo 1 ( $t_0-t_1$ ):  $S_1$  ligado e  $S_2$  desligado;
- Modo 2 ( $t_1-t_2$  e  $t_3-t_4$ ):  $S_1$  e  $S_2$  desligados;
- Modo 3 ( $t_2-t_3$ ):  $S_1$  desligado e  $S_2$  ligado.

No modo 1, ocorre a carga do indutor  $L_{1a}$  e a descarga do indutor  $L_{1b}$ , que fornece energia ao capacitor  $C_2$ . Enquanto isso, o capacitor  $C_1$  para a carga.

Assumindo uma variação linear na corrente dos indutores, a corrente de ripple para os indutores nesse modo pode ser calculada com as equações 2.12 a 2.14, nas quais

$t_1$  é o tempo em que o transistor  $S_1$  está ligado,  $V_d$  a tensão de entrada e  $V_{C_1}$  e  $V_{C_2}$  a tensão nos capacitores  $C_1$  e  $C_2$ , respectivamente.

$$\Delta I_{L_{1a}} = \frac{t_1 V_d}{L_{1a}} \quad (2.12)$$

$$\Delta I_{L_{1b}} = \frac{t_1 (V_{C_2} - V_d)}{L_{1b}} \quad (2.13)$$

$$\Delta I_{L_2} = \frac{t_1 (V_{C_1} + V_o)}{L_2} \quad (2.14)$$

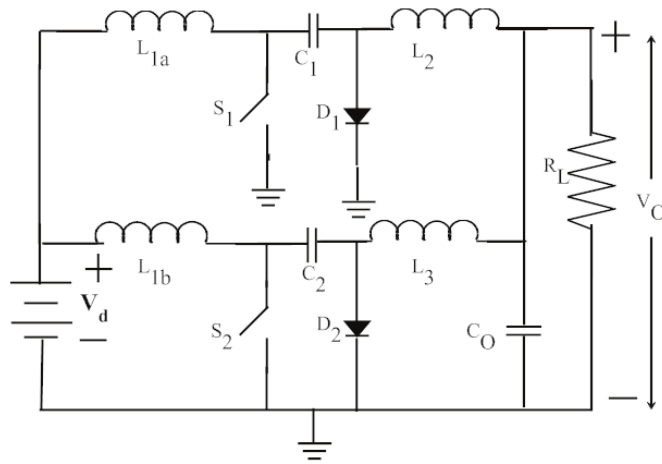


Figura 6 – Conversor Ćuk entrelaçado de duas fases (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015)

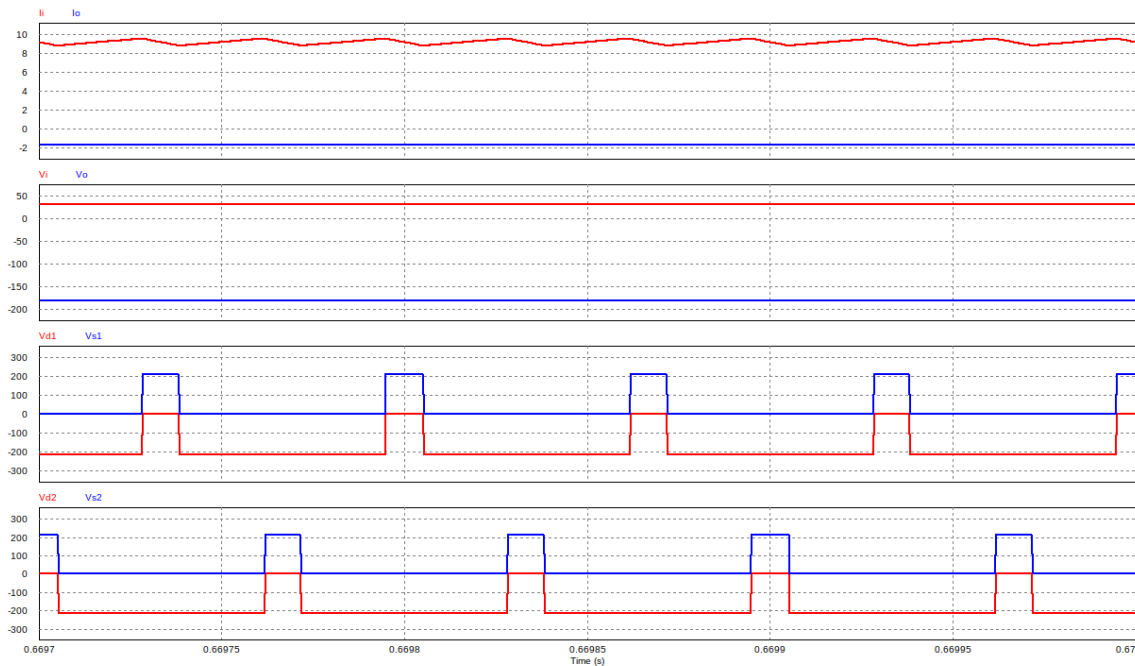


Figura 7 – Sinais de entrada, saída e tensões no transistor e no diodo do conversor cuk entrelaçado de duas fases

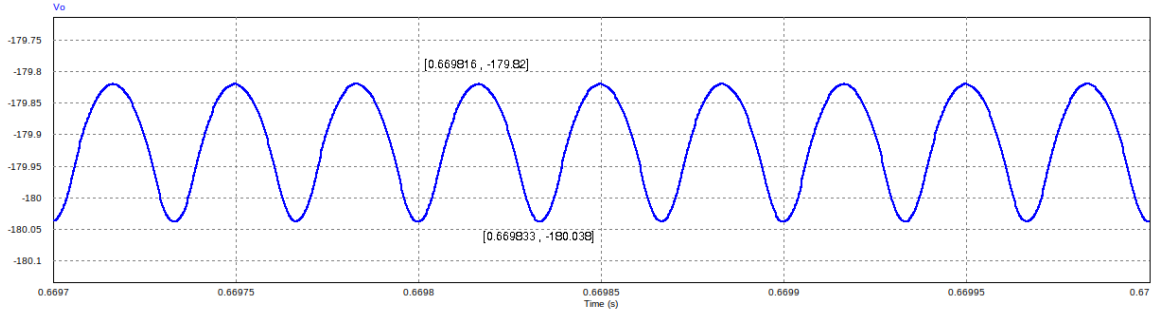


Figura 8 – Tensão de ripple de saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases

Quando ambos os transistores estão desligados, ou seja, no modo 2, os indutores de entrada  $L_{1a}$  e  $L_{1b}$  são descarregados, fornecendo energia aos capacitores  $C_1$  e  $C_2$ , respectivamente, de forma que, entre  $t_1$  e  $t_2$ ,  $C_1$  carrega a energia que foi fornecida à carga no modo anterior, enquanto que entre  $t_3$  e  $t_4$ ,  $C_2$  o faz. Além disso, os indutores  $L_2$  e  $L_3$  fornecem energia à carga e, portanto são descarregados.

Os ripples de corrente para os indutores nesse modo são encontrados utilizando as equações 2.15 a 2.17

$$\Delta I_{L_{1a}} = \frac{t_2 (V_{C_1} - V_d)}{L_{1a}} \quad (2.15)$$

$$\Delta I_{L_{1b}} = \frac{t_2 (V_{C_2} - V_d)}{L_{1b}} \quad (2.16)$$

$$\Delta I_{L_2} = -\frac{t_2 V_o}{L_2} \quad (2.17)$$

No terceiro modo, com  $S_2$  ligado, enquanto o indutor  $L_{1b}$  continua sendo carregado, o indutor  $L_{1a}$  é descarregado, fornecendo energia ao capacitor  $C_1$ . Por sua vez, o capacitor  $C_2$  fornece energia à carga e aos componentes  $L_3$ ,  $C_o$ .

Através das equações 2.12, 2.15, 2.14 e 2.17, tem-se a equação da tensão de saída (2.18), onde  $d = T_{on}/T$ .

$$V_o = -\frac{d \cdot V_d}{1 - d} \quad (2.18)$$

Na figura 7 são apresentadas as formas de onda dos sinais de entrada e saída do conversor cuk entrelaçado, além das tensões sobre os transistores e diodos de cada uma das fases, através dos quais é possível perceber o defasamento no comando das chaves. Já a figura 8 demonstra a tensão de ripple obtida pela simulação dessa implementação, que equivale a 41% do valor obtido para a simulação do conversor cuk convencional (figura 5).

## 2.3 Conversores CC/CA - Inversores tipo fonte de tensão (VSI)

O inversor de tensão é responsável por converter uma tensão contínua em outra alternada, com frequência e amplitude bem definidas. A topologia de um inversor tipo

fonte de tensão, *VSI*, do inglês *Voltage Source Inverter* monofásico em ponte completa pode ser vista na figura 9.

É facilmente perceptível que, caso ambos um transistores de uma das pernas do circuito estejam em condução simultaneamente haverá um curto-circuito na tensão de entrada  $v_i$ , que corresponde á tensão de barramento CC que alimenta o circuito. Dessa forma deve-se sempre garantir que apenas um dos transistores em cada perna conduza em um certo período de tempo.

No total o circuito apresenta cinco possíveis estados de operação, sendo quatro com tensão de saída definida(estados 1 a 4) e um com tensão indefinida(estado 5). O estados e sua tensão de saída correspondente são (Espinoza, 2001):

| Estado | $S_{1+}$  | $S_{1-}$  | $S_{2+}$  | $S_{2-}$  | Tensão de Saída |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| 1      | Ligado    | Desligado | Desligado | Ligado    | $v_i$           |
| 2      | Desligado | Ligado    | Ligado    | Desligado | $-v_i$          |
| 3      | Ligado    | Desligado | Ligado    | Desligado | 0               |
| 4      | Desligado | Ligado    | Desligado | Ligado    | 0               |
| 5      | Desligado | Desligado | Desligado | Desligado | $v_i$ ou $-v_i$ |

Tabela 1 – Possíveis estados de operação de um VSI em Ponte Completa

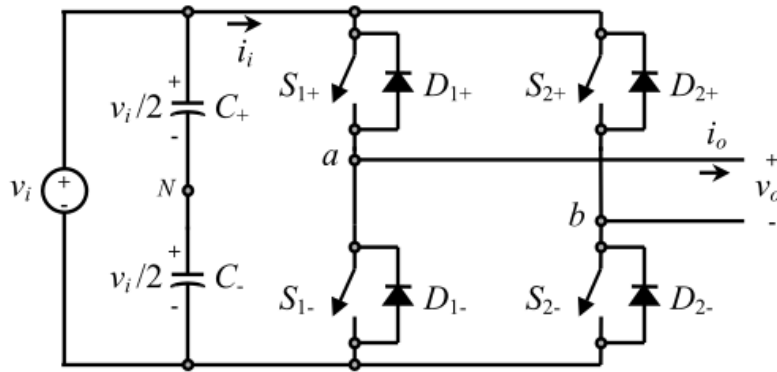


Figura 9 – Inversor VSI monofásico em ponte completa (Espinoza, 2001)

Como um inversor deve ser capaz de fornecer tensão com amplitude *bem definida*, o estado 5 deve ser evitado. Para isso, a modulação utilizada deve garantir que a todo momento um, e apenas um, dos transistores de cada perna esteja conduzindo corrente. Várias técnicas de modulação podem ser aplicadas a inversores VSI de ponte completa, entre elas as de PWM bipolar e unipolar(Espinoza, 2001).

### 2.3.1 Inversor com Modulação por Largura de Pulso Bipolar

No inversor com PWM bipolar apenas os estados 1 e 2 da tabela 1 são utilizados para gerar o sinal de saída, de modo que este apresenta apenas dois valores,  $v_i$  e  $-v_i$ .

Deseja-se que a tensão alternada na saída siga uma forma de onda que, para este trabalho é senoidal. A técnica de PWM baseada em sinal de portadora atende a essa questão ao definir os estados dos transistores a partir da comparação entre um sinal que corresponde à saída desejada  $v_m$ , chamado de modulante, e uma forma de onda triangular  $v_p$ , chamada de portadora.

Define-se que, enquanto o sinal modulante é maior que a portadora, o estado 1 é acionado, ou seja, os transistores  $S_{1+}$  e  $S_{2-}$  entram em condução, enquanto os transistores  $S_{1-}$  e  $S_{2+}$  são desligados. O estado 2 é acionado quando o sinal de portadora apresenta maior tensão que o sinal modulante.

O sinal obtido na saída de um inversor que segue esta técnica é, basicamente, uma forma de onda senoidal que apresenta amplitude fundamental  $\hat{v}_o$  a qual satisfaz a expressão 2.19, onde  $m_a$  é o índice de modulação, ou razão de modulação de amplitude, representada pela equação 2.20 (Espinoza, 2001).

$$\hat{v}_o = v_{ab} = v_i m_a \quad (2.19)$$

$$m_a = \frac{\hat{v}_m}{\hat{v}_p} \quad (2.20)$$

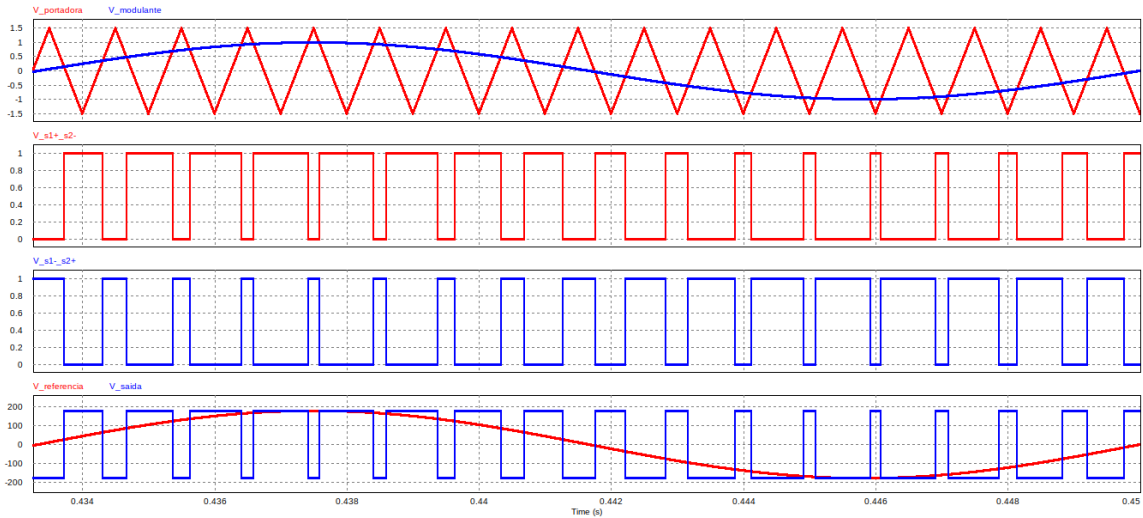


Figura 10 – Formas de onda do inversor VSI com PWM bipolar

### 2.3.2 Inversor com Modulação por Largura de Pulso Unipolar

Já em um inversor com PWM unipolar apenas os estados 1, 2, 3 e 4 da tabela 1 são utilizados para gerar o sinal de saída. Dessa forma a tensão alternada obtida apresenta três possíveis valores: 0,  $v_i$  e  $-v_i$ .

Neste tipo de modulação são utilizados dois sinais modulantes  $v_m$  e  $-v_m$ . Cada modulante é responsável pela tensão em um dos braços do inversor, em relação ao ponto

neutro ( $N$ ), de modo que  $v_m$  controla a tensão  $v_{aN}$  e  $-v_m$  é responsável por  $v_{bN}$ . A amplitude da tensão de saída para este método é expressa pela equação 2.23, encontrada pela combinação das equações 2.21 e 2.21.

$$v_{bN} = -v_{aN} \quad (2.21)$$

$$v_o = v_{aN} - v_{bN} \quad (2.22)$$

$$\hat{v}_o = 2 \cdot \hat{v}_{aN} = v_i m_a \quad (2.23)$$

Segundo Espinoza (2001), devido às tensões de fase ( $V_{aN}$  e  $v_{bN}$ ) serem idênticas e defasadas de  $180^\circ$ , a tensão de saída não apresenta harmônicos pares, presentes em inversores que utilizam o método de modulação bipolar.

Essa característica permite que inversores que utilizam a modulação unipolar utilizem filtros menores para obter tensão e corrente de alta qualidade, utilizando a mesma frequência de chaveamento que inversores com modulação bipolar (Espinoza, 2001).

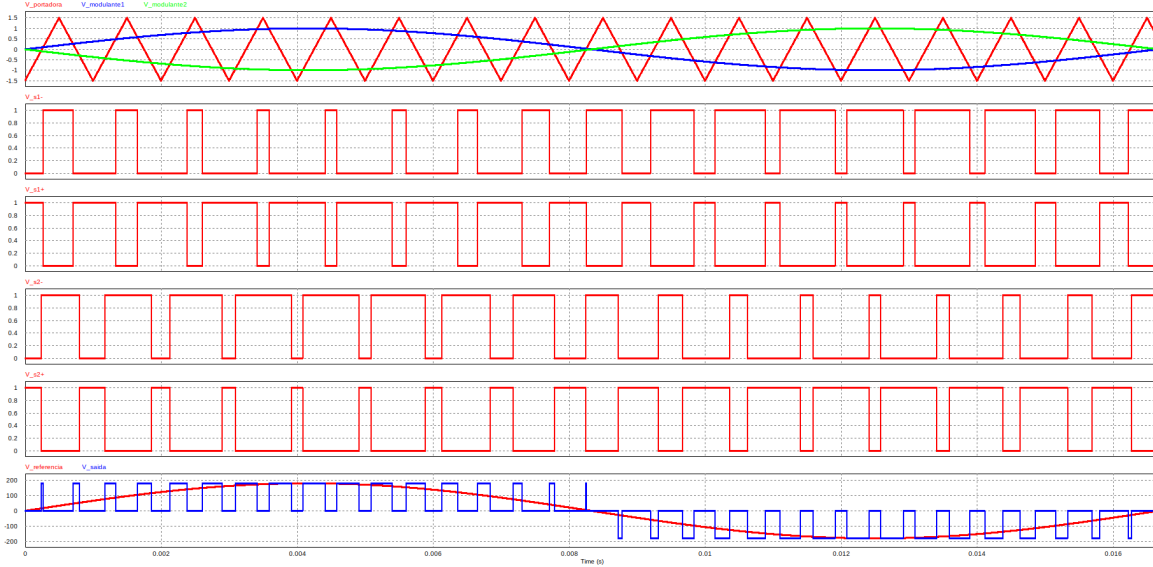


Figura 11 – Formas de onda do inversor VSI com PWM unipolar

## 2.4 Inversor Integrado (CC/CA)

### 2.4.1 Inversor Ćuk Integrado

A integração de estágios consiste na união dos estágios subidor de tensão (CC-CA) e inversor (CC-CA) em um único estágio CC-CA, com o circuito mais simples e com menor número de componentes.

Segundo proposto por Luigi et al. (2010), a primeira simplificação do conversor Ćuk integrado ao inversor de tensão em ponte completa é a retirada do capacitor e do indutor de filtro na saída no estágio elevador de tensão, ou seja, no barramento CC. Dessa forma,

tensão e corrente do primeiro estágio são entregues diretamente ao inversor. A segunda, e última simplificação possível nessa integração é a retirada do diodo do conversor cuk, uma vez que os diodos anti-paralelos do inversor são capazes de efetuar sua função.

Na figura 12 é possível ver o circuito final resultante das simplificações descritas, no qual os componentes  $L_b$ ,  $S_b$  e  $C_b$  advêm de um conversor cuk convencional.

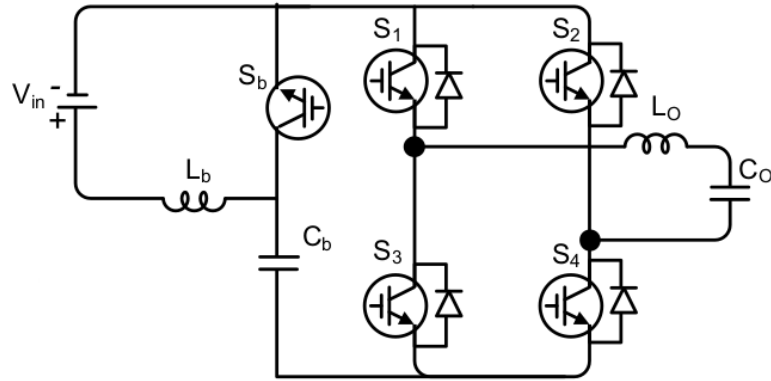


Figura 12 – Inversor Ćuk Integrado (Luigi et al., 2010)

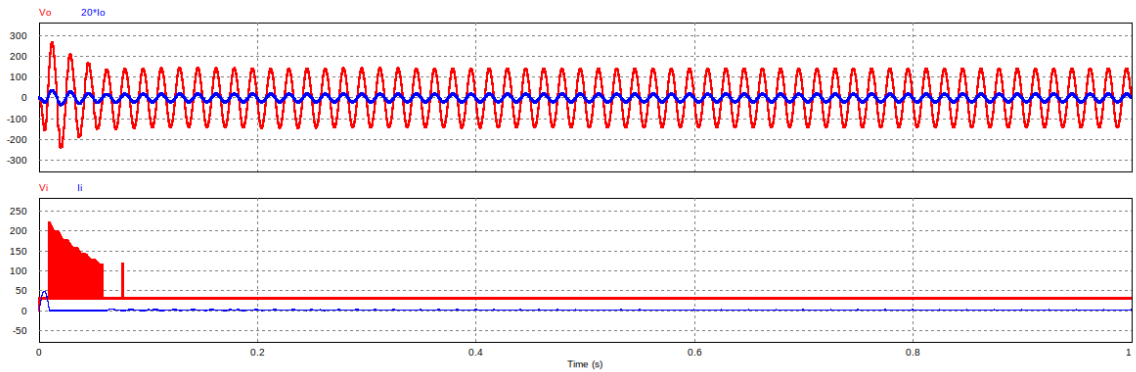


Figura 13 – Sinais de entrada e saída do inversor cuk integrado

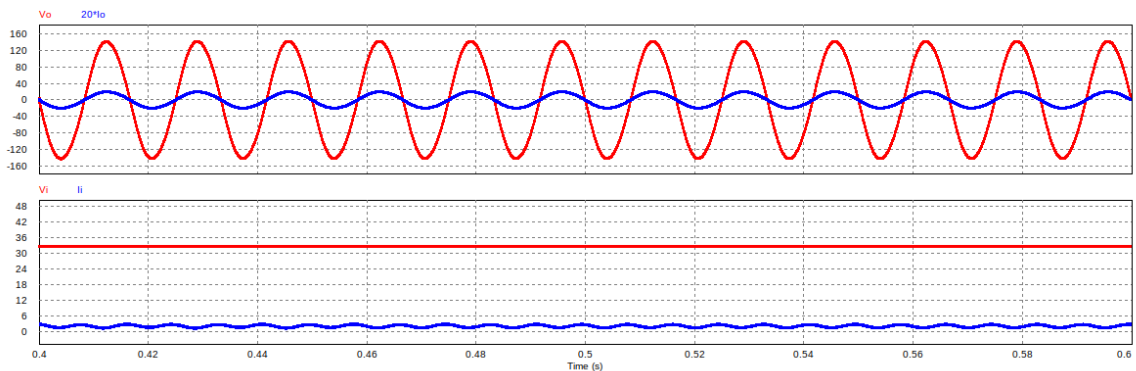


Figura 14 – Sinais de entrada e saída do inversor cuk integrado em regime permanente

## 2.5 Rastreador de ponto de máxima potência (MPPT)

O ponto de máxima potência de sistema de geração solar dependem da irradiação solar e da temperatura das células geradoras e, portanto, o rastreamento deste ponto de operação deve ser feito de forma constante. Para esse controle é geralmente utilizado um rastreador de ponto de máxima potência, *MPPT*, do inglês *Maximum Power Point Tracker* (Beriber; Talha, 2013).

Este dispositivo monitora tensão e corrente fornecidas pelo painel fotovoltaico para determinar o ponto de operação no qual este fornecerá a máxima potência disponível, de modo a aumentar, desta forma, a eficiência do painel. Existem vários algoritmos de controle do ponto de máxima potência, e a seguir serão tratados dois, o método P&O (perturba e observa) e o método da condutância incremental (IC). Estes métodos são amplamente utilizados devido, principalmente, a facilidade de implementação (Jayakumaran et al., 2018)(Beriber; Talha, 2013).

### 2.5.1 Método Perturba e Observa (P&O)

Neste método, é inserida na tensão de operação do painel fotovoltaico uma pequena perturbação, que pode ser positiva ou negativa, de acordo com a necessidade. Caso após a perturbação a potência fornecida aumenta, então é aplicada outra perturbação no mesmo sentido da anterior. Quando a potência reduz após a alteração da tensão a perturbação é invertida. Esse processo é repetido periodicamente até encontrar o ponto de operação desejado(Beriber; Talha, 2013).

A constante perturbação da tensão faz com que a potência fornecida pelo painel varie. Desta forma o ponto de máxima potência nunca é completamente atingido, já que o sistema fica oscilando em torno deste. Para reduzir a influência dessa oscilação, a amplitude da perturbação é mantida sempre baixa (Jayakumaran et al., 2018).

Como já dito, uma das vantagens deste método de MPPT está na simplicidade de sua implementação mas, além disso, apresenta alta eficiência para irradiação solar alta e constante. Já entre as desvantagens estão a possibilidade de falha para variações abruptas de irradiação e o fato de o ponto de máxima potência não ser devidamente atingido, principalmente(Jayakumaran et al., 2018).

Um fluxograma que representa o funcionamento do algoritmo P&O pode ser visto na figura 15.

### 2.5.2 Método de Condutância Incremental (IC)

Este método se baseia no princípio de que a inclinação da potência, em relação à tensão é zero no ponto de máxima potência, positiva à esquerda e negativa à direita



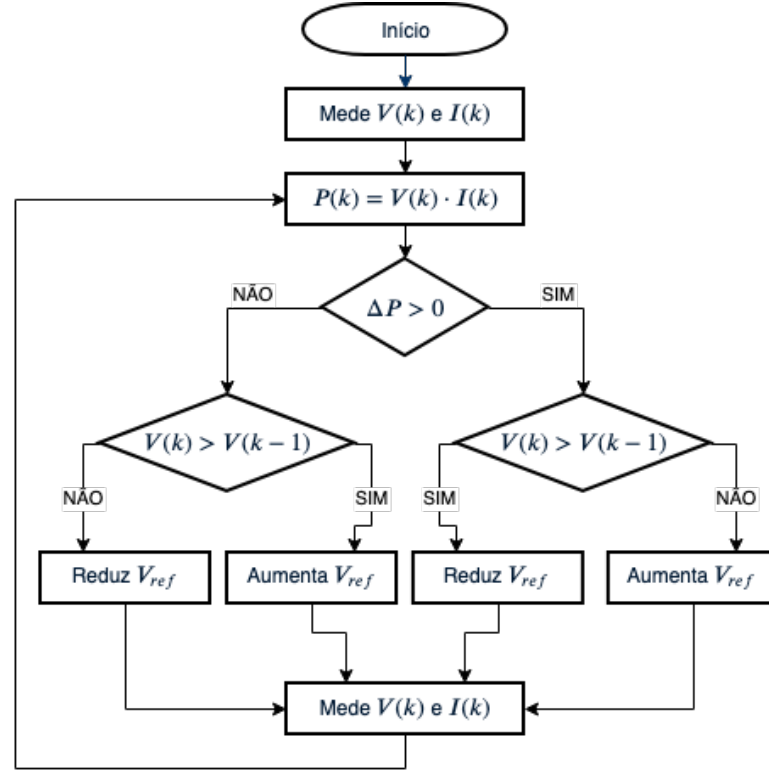


Figura 15 – Fluxograma do Método P&O, baseado no diagrama de Beriber e Talha (2013)

deste. Além disso, a perturbação no ciclo de trabalho pode ser parada quando o ponto de máxima potência é encontrado. Enquanto esta condição não é satisfeita a direção da perturbação é definida pela relação entre  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$  e  $\frac{I}{V}$  (Beriber; Talha, 2013)(Jayakumaran et al., 2018).

Dessa forma, quando a equação 2.25 é satisfeita, a perturbação seguinte é positiva e, para a equação 2.26, negativa.

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} = 0 \quad \text{No ponto de máxima potência} \quad (2.24)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} > 0 \quad \text{Esquerda do ponto de máxima potência} \quad (2.25)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} < 0 \quad \text{Direita do ponto de máxima potência} \quad (2.26)$$

Devido a ruído e erros de medição, a situação da equação 2.24 é raramente satisfeita e, portanto, utiliza-se de uma tolerância  $\epsilon$  tal qual, se o módulo da soma descrita na equação 2.24 for menor que o valor de  $\epsilon$ , é definido que o ponto de máxima potência foi encontrado e as perturbações são interrompidas(Beriber; Talha, 2013).

A principal vantagem desse método em relação ao P&O está na maior tolerância a variações rápidas irradiação solar, além do fato de ser capaz de interromper as perturbações após o ponto de operação ter sido definido. Entretanto, o custo e a complexidade do sistema são suas principais desvantagens(Jayakumaran et al., 2018).

Um fluxograma que representa o funcionamento do algoritmo de condutância incremental pode ser visto na figura 16.

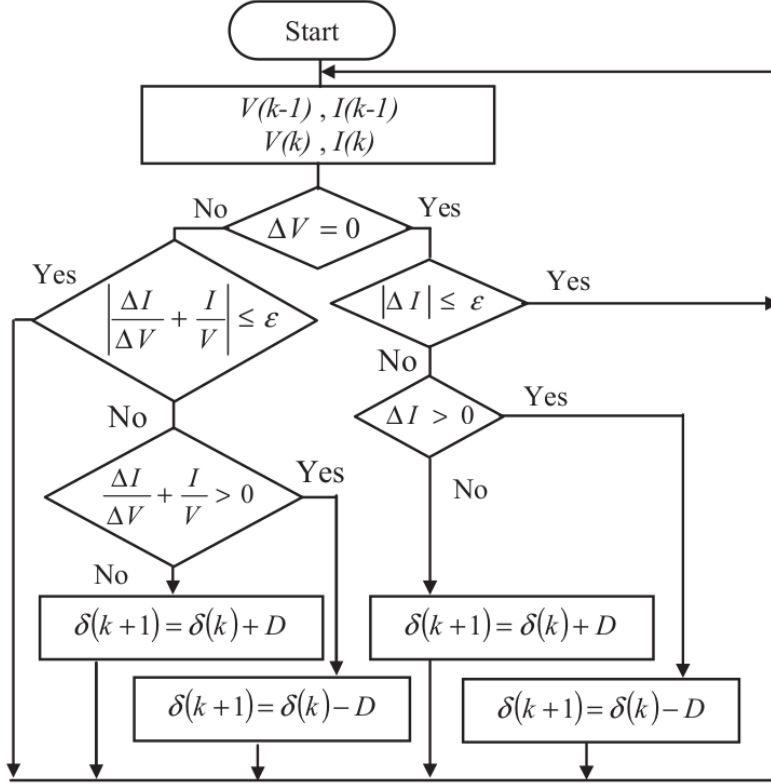


Figura 16 – Fluxograma do método de indutância incremental (Beriber; Talha, 2013)

## 2.6 Filtro

Para conectar o sistema a rede elétrica é necessário filtrar a tensão gerada a fim para reduzir os harmônicos presentes e fazer com que o sinal se assemelhe à uma senoide, e não a um trem de pulsos. Esse processo é feito com a inclusão de um filtro passivo entre o inversor e a rede da concessionária de energia.

Podem ser empregados três diferentes tipos de filtros L, LC e LCL. Destes, o último é mais utilizado atualmente devido a sua maior eficiência e ao fato de minimizar a distorção da corrente injetada na rede elétrica (Mahamat et al., 2017) (Reznik et al., 2014).

A topologia do filtro LCL pode ser vista na figura 17.

Para o projeto do filtro LCL, inicialmente é necessário encontrar os valores de impedância e capacitância base,  $Z_b$  e  $C_b$ , de acordo com as equações 2.27 e 2.28 nas quais  $P_n$  é a potência nominal do sistema,  $V_g$  a tensão nominal da rede, e  $f$  a frequência da

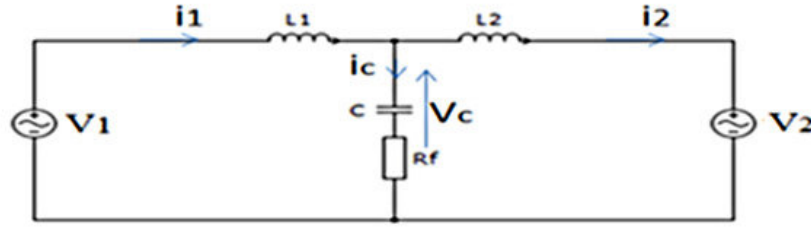


Figura 17 – Topologia do filtro LCL monofásico(Mahamat et al., 2017)

rede elétrica.

$$Z_b = \frac{V_g^2}{P_n} \quad (2.27)$$

$$C_b = \frac{1}{2\pi f Z_b} \quad (2.28)$$

Os indutores  $L_1$  e  $L_2$  podem ser encontrados a partir das equações 2.29 e 2.30, respectivamente. Nessas equações  $V_{CC}$  é a tensão do barramento CC ao qual o inversor está conectado,  $f_{sw}$  é a frequência de chaveamento do inversor e  $\Delta I_{L1_{max}}$  a variação máxima de corrente desejada no indutor,  $k_a$  é a atenuação desejada e  $C$  o valor do capacitor, definido pela equação 2.31.

$$L_1 = \frac{V_{CC}}{6f_{sw}\Delta I_{L1_{max}}} \quad (2.29)$$

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{k_a^2}} + 1}{(2\pi f_{sw})^2 C} \quad (2.30)$$

$$C = kC_b \quad (2.31)$$

A frequência de ressonância do filtro implica diretamente no valor do resistor de ressonância,  $R_f$  e pode ser calculada a partir dos valores de  $L_1$ ,  $L_2$  e  $C$ , como demonstra a equação 2.32. Além disso, caso essa frequência não satisfaça a equação 2.33, o filtro deve ser recalculado para outro valor de atenuação.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \quad (2.32)$$

$$10f_g < f_{res} < 0,5f_{sw} \quad (2.33)$$

O resistor  $R_f$  é responsável por atenuar parte da oscilação de tensão proveniente do chaveamento, a fim de evitar a ressonância e deve ter o valor equivalente a um terço da impedância do capacitor  $C$  na frequência de ressonância(Reznik et al., 2014), assim como demonstra a equação 2.34.

$$R_f = \frac{1}{6\pi f_{res} C} \quad (2.34)$$

## 3 Desenvolvimento do Projeto

Para o desenvolvimento do projeto, primeiramente é necessário definir a potência a ser utilizada no sistema. Após isso, é escolhido um painel fotovoltaico comercial para que seus parâmetros sejam utilizados no modelo utilizado nas simulações. Com as características do painel é possível projetar os conversores CC/CC e, com estes, os inversores responsáveis pela conversão CC/CA.

Com os inversores funcionais, são projetados os sistemas de rastreamento de máxima potência, responsável por otimizar a potência obtida do painel fotovoltaico e o filtro LCL, que condiciona o sinal de onda quadradas obtido pelos inversores a uma senoide que pode ser conectada à rede elétrica.

Como no projeto estão em estudos microinversores os quais são conectados a um único painel fotovoltaico, foi escolhido um painel de potência média no mercado, de 300W. Os conversores serão baseados no conversor cuk, sendo estes o conversor cuk convencional e o conversor cuk entrelaçado de duas fases, além do inversor cuk integrado, composto por uma simplificação do conversor cuk convencional conectado a um inversor.

### 3.1 Painel Fotovoltaico

Para o painel fotovoltaico será utilizado o modelo DYMOND CS6K-300, da fabricante [Canadian Solar](#), constituído de 60 células solares de silício monocristalino. Suas características elétricas, sob condições padronizadas de teste, *STC*<sup>1</sup>, do inglês *Standard Test Conditions* e de temperatura estão dispostas nas tabelas 2 e 3, respectivamente.

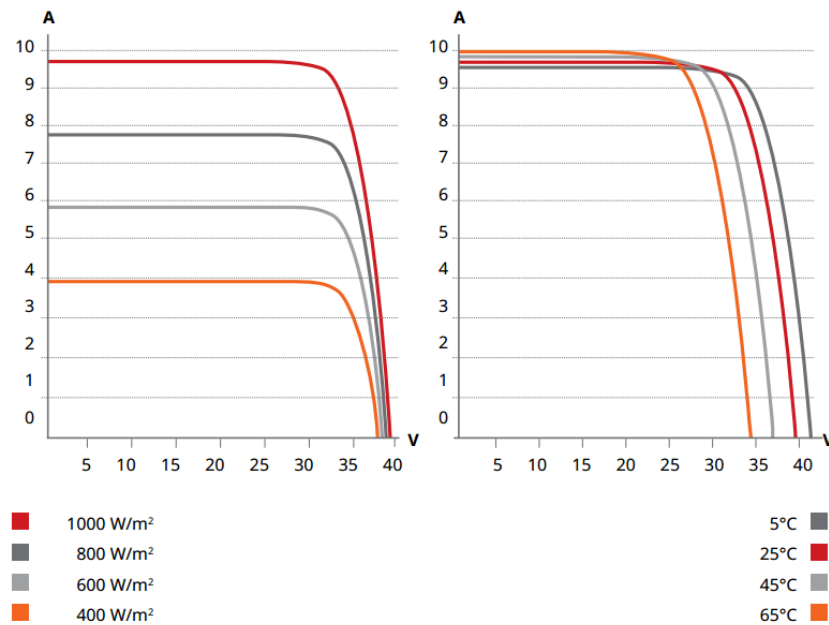
O comportamento da curva IxV do modelo para diferentes temperaturas e irradiância está presente na figura 18.

|                                  | <b>CS6K 300</b>               |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Potência máx. nominal (Pmax)     | 300W                          |
| Tensão de operação ótima (Vmp)   | 32,5V                         |
| Corrente de operação ótima (Imp) | 9,24A                         |
| Tensão de circuito aberto (Voc)  | 39,7V                         |
| Corrente de curto circuito (Isc) | 9,83V                         |
| Eficiência do módulo             | 18,33%                        |
| Temperatura de operação          | -40°C ~ +85°C                 |
| Tensão máx. do sistema           | 1500 (IEC) ou 1000 V (IEC/UL) |
| Max. Series Fuse Rating 15 A     | 15A                           |
| Classificação de operação        | Classe A                      |
| Tolerância de potência           | 0 ~ +5W                       |

Tabela 2 – Características elétricas em *STC*<sup>1</sup> do painel selecionado ([Canadian Solar, 2018](#))

<sup>1</sup> Irradiância de 1000W/m<sup>2</sup>, temperatura do módulo de 25°C e massa de ar de 1,5

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| Coeficiente de Temperatura (Pmax)                | $-0,39 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ |
| Coeficiente de Temperatura (Voc)                 | $-0,29 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ |
| Coeficiente de Temperatura (Isc)                 | $0,05 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$  |
| Temperatura de Operação Nominal do Módulo (NMOT) | $42 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |

Tabela 3 – Características de temperatura do painel selecionado ([Canadian Solar, 2018](#))Figura 18 – Curvas IxV do painel selecionado ([Canadian Solar, 2018](#))

Para modelar o comportamento do painel no PSIM, foi seguido o procedimento indicado no tutorial ([POWERSIM, 20-?](#)). Utiliza-se, portanto, informações das presentes nas tabelas 2 e 3, já da figura 18 é extraída a inclinação  $\frac{dV}{dI}$  na tensão de circuito aberto  $V_{OC}$ , que é de  $-0,4V/A$ .

Nas figuras 19 e 20 são mostrados os parâmetros e as características, respectivamente, do módulo fotovoltaico utilizado no PSIM.

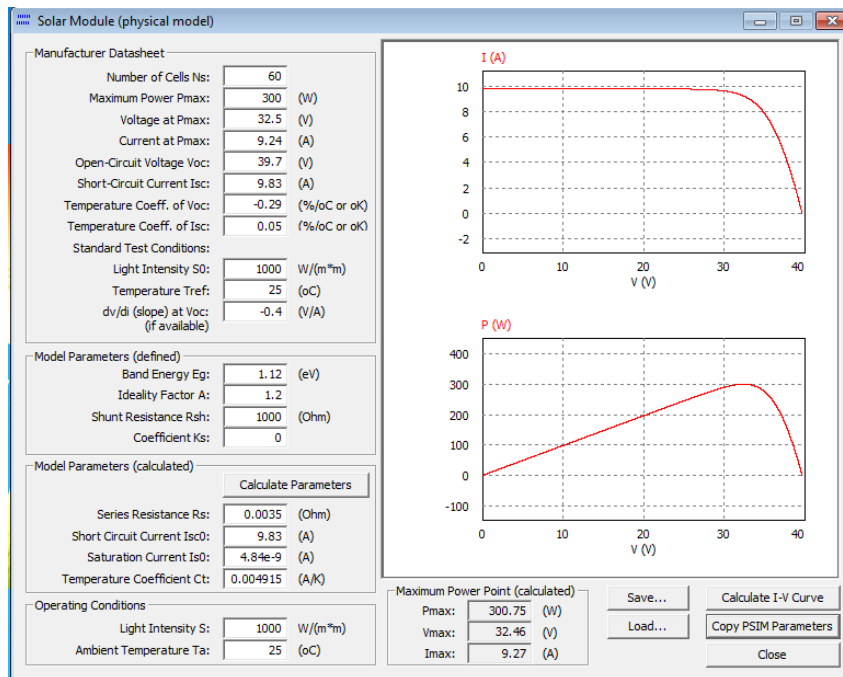


Figura 19 – Parâmetros do módulo fotovoltaico no PSIM

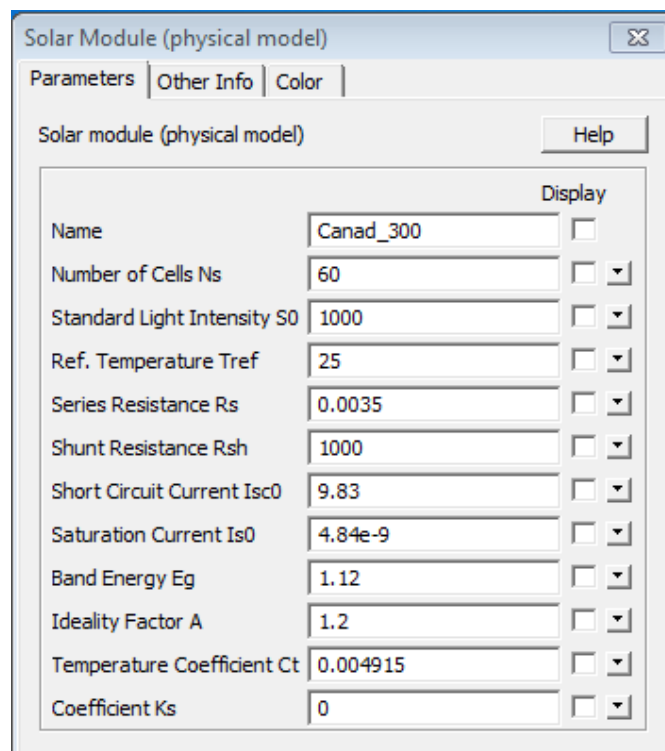


Figura 20 – Características do módulo fotovoltaico no PSIM

O circuito que representa o painel fotovoltaico pode ser visto na figura 21, na qual  $Irrad$  é a irradiância,  $Temp$  a temperatura e  $V_{out}$  a tensão de saída.

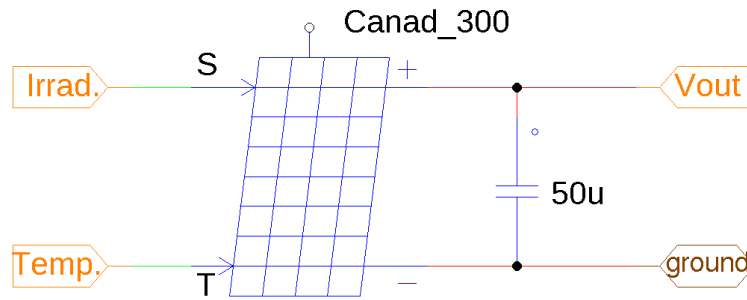


Figura 21 – Circuito do módulo fotovoltaico no PSIM

## 3.2 Projeto dos Conversores CC/CC

Apesar de mais complexos e caros que conversores CC/CC básicos, conversores cuk apresentam melhores características de corrente, tanto de entrada quanto de saída que estas topologias (K.D; Daniel; Unnikrishnan, 2017) e, por isso foram escolhidos para como objeto de análise deste trabalho.

### 3.2.1 Dimensionamento do Conversor Ćuk Convencional

As seções 3.2.1.1 a 3.2.1.3 a seguir representam os passos no projeto de um conversor cuk convencional. Primeiramente é definido o comportamento desejado do circuito que, para este projeto é:

- Frequência de chaveamento de  $15kHz$ ;
- Potência de  $300W$ ;
- Tensão de entrada de  $32,5V$ , equivalente à tensão máxima do painel fotovoltaico;
- Tensão de saída de  $180V$ , equivalente à tensão de pico da rede elétrica monofásica;
- Tensão de ripple de saída de  $0,5V$ ;
- Corrente de ripple de  $0,1A$  no indutor  $L2$ ;
- Tensão de ripple de  $1V$  no capacitor de transferência  $C1$ ;
- Corrente de ripple de  $1A$  no indutor  $L1$ .

Além disso, dados a potência e tensão de saída pode-se encontrar a carga equivalente  $R$ :

$$R = \frac{P}{V^2} = 108\Omega \quad (3.1)$$

### 3.2.1.1 Ciclo de Trabalho

O ciclo de trabalho do conversor cuk é encontrado a partir de seus valores de tensão de entrada e saída desejados. Utilizando a função de transferência deste circuito, definida na equação 2.7 e com as tensões de entrada e saída, encontra-se o *duty cycle* encontrado na equação 3.2.

$$d = \frac{V_o}{V_o + V_s} = 0,847 \quad (3.2)$$

### 3.2.1.2 Indutores

Para definir os indutores inicialmente é necessário encontrar o valor mínimo desses componentes para que o circuito opere em modo de condução contínua, através das equações 2.8 e 2.9. Sendo assim tem-se:

$$L_{b1} = \frac{(1-d)R}{2df} = 648\mu H \quad (3.3)$$

$$L_{b2} = \frac{(1-d)R}{2f} = 549\mu H \quad (3.4)$$

Calcula-se, também, os valores necessários para obter o comportamento desejado do circuito e utiliza-se o menor valor que satisfaça as duas condições. Os cálculos para os parâmetros do circuito estão representados pelas equações 3.5 e 3.6.

$$L1 = \frac{V_s \cdot d}{f \cdot 1,00A} = 1,99mH \quad (3.5)$$

$$L2 = \frac{V_s \cdot d}{f \cdot 0,10A} = 18,3mH \quad (3.6)$$

### 3.2.1.3 Capacitores

Os capacitores  $C2$  e  $C1$  são calculados a partir das equações 2.10 e 2.11, respectivamente. Substituindo os valores já encontrados nessas equações têm-se:

$$C2 = \frac{0,153 \cdot 180V}{8 \cdot 0,5V \cdot 18,3mH \cdot (15kHz)^2} = 1,67\mu F \quad (3.7)$$

$$C1 = \frac{0,153 \cdot 180V}{108\Omega \cdot 15kHz \cdot 1V} = 94,3\mu F \quad (3.8)$$

### 3.2.1.4 Circuito resultante e resultados de simulação

Com os valores de componentes calculados nas equações 3.2 a 3.8, ajustados para valores comerciais, foi montado o circuito de um conversor cuk convencional que pode ser visto na figura 22.



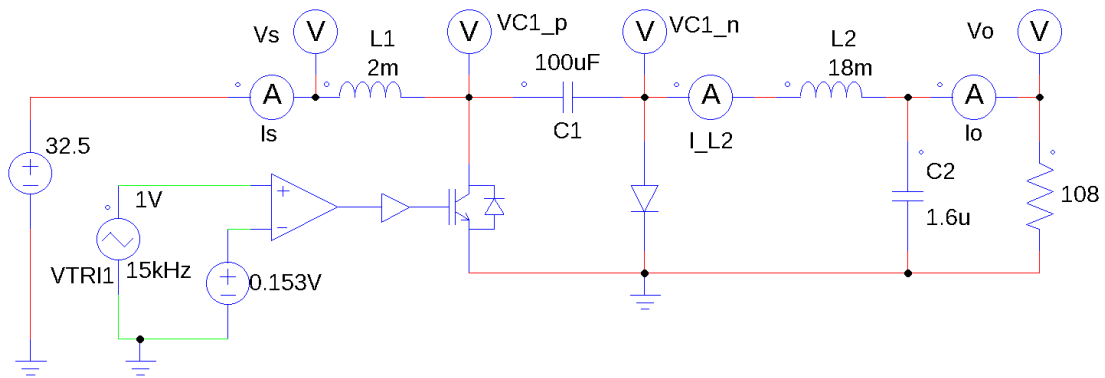
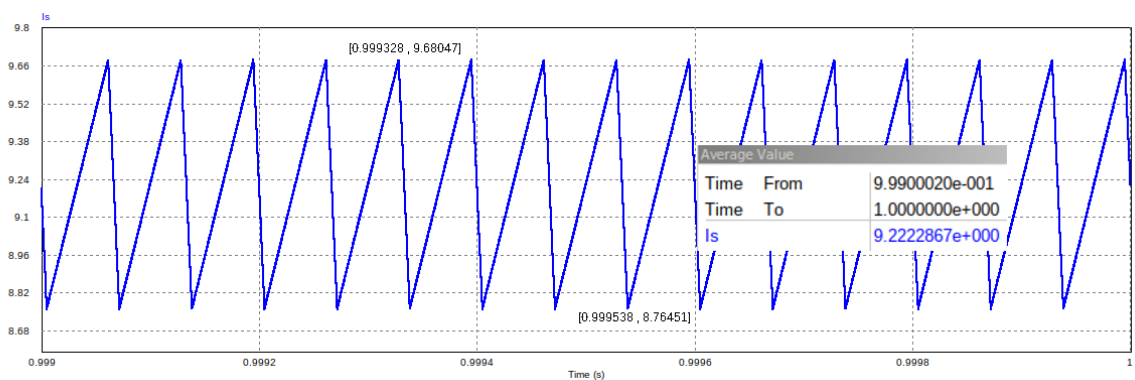


Figura 22 – Circuito do conversor cuk convencional

A partir da simulação do circuito da figura 22 no PSIM, obteve-se os valores de média e ripple presentes na tabela 4. Além disso, as formas de onda verificadas são apresentadas na figuras 23 a 29.

|  |          |
|--|----------|
| Corrente média em $L1$                 | 9,22A    |
| Corrente de ripple em $L1$             | 0,92A    |
| Corrente de ripple em $L2$             | 0,10A    |
| Tensão de ripple em $C1$               | 0,94V    |
| Tensão de saída média do conversor     | -179,91V |
| Tensão de ripple de saída do conversor | 0,53V    |
| Potência de saída média                | 299,71W  |
| Oscilação da potência de saída         | 1,77W    |

Tabela 4 – Valores medidos para o conversor cuk convencional

Figura 23 – Corrente de ripple no indutor  $L1$  do conversor cuk convencional

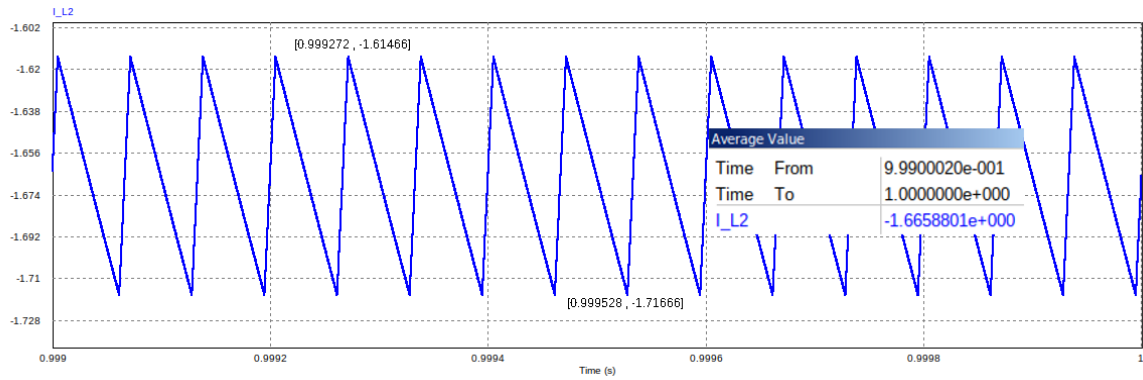


Figura 24 – Corrente de ripple no indutor  $L2$  do conversor cuk convencional

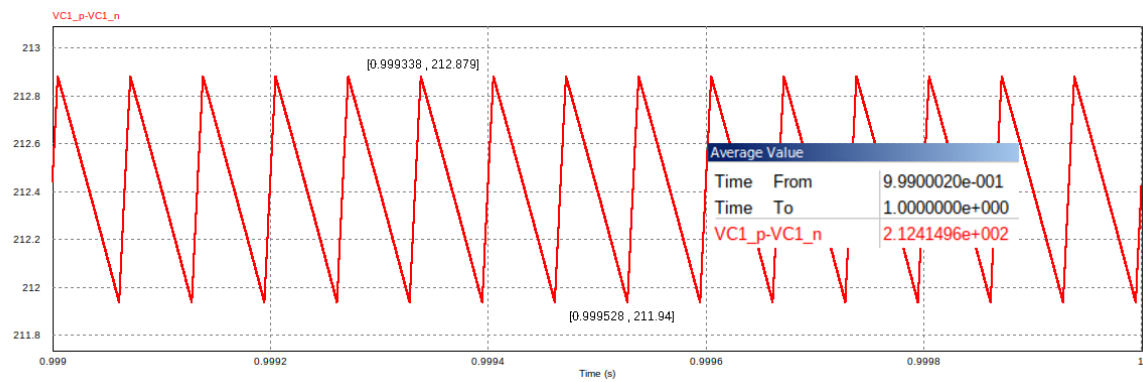


Figura 25 – Tensão de ripple no capacitor  $C1$  do conversor cuk convencional

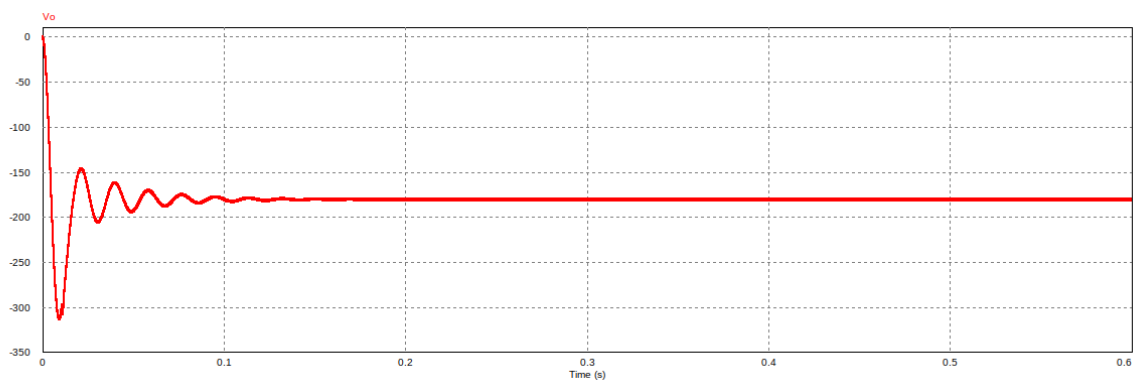


Figura 26 – Comportamento da tensão de saída do conversor cuk convencional

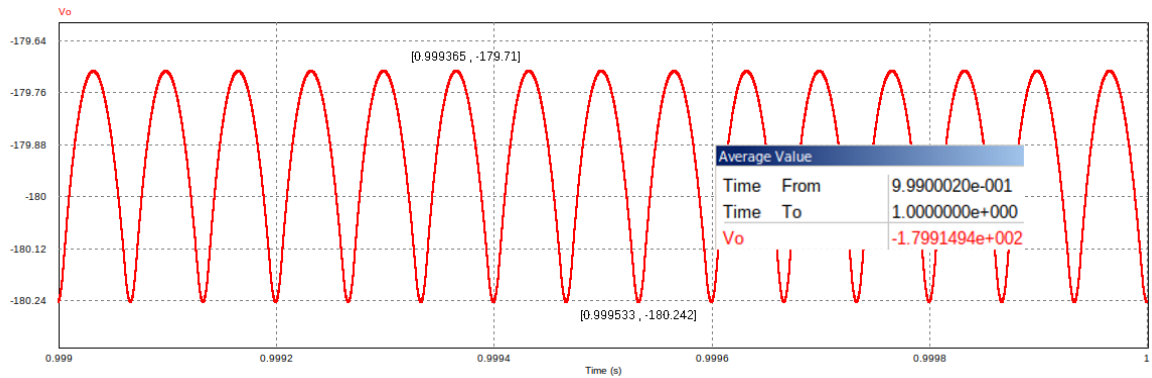


Figura 27 – Tensão de ripple de saída do conversor cuk convencional

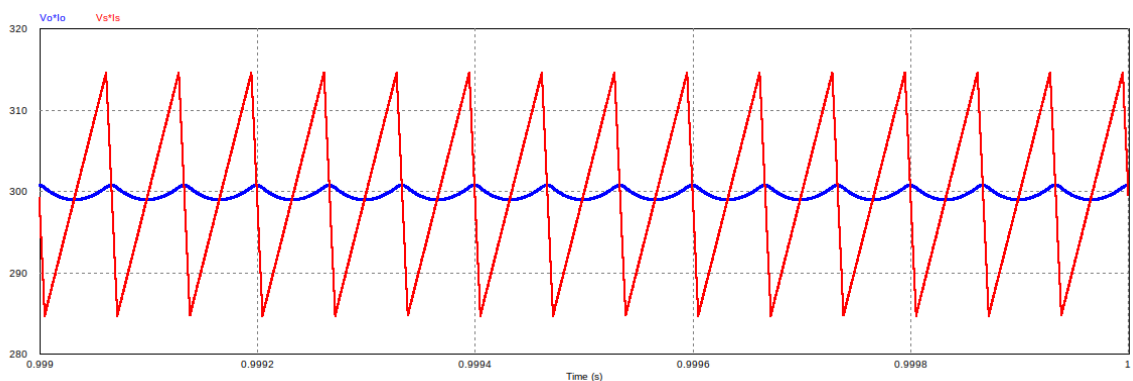


Figura 28 – Potência na entrada e saída do conversor cuk convencional

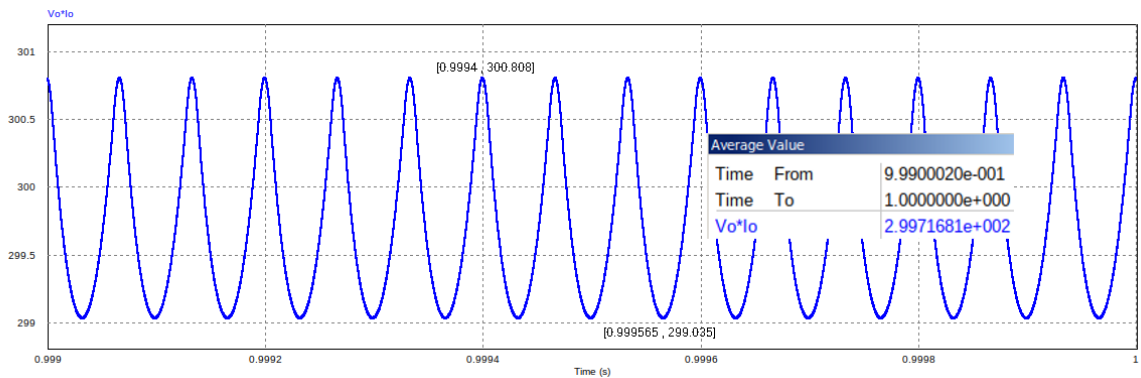


Figura 29 – Oscilação da potência na saída do conversor cuk convencional

Percebe-se, a partir dos dados expostos na tabela 4 que os ripples desejados foram atingidos. Além disso, o conversor projetado para 300W apresenta um ótimo rendimento, de 99,9%, com uma oscilação de potência de apenas 0,6%.

### 3.2.2 Dimensionamento do Conversor Ćuk Entrelaçado

O conversor cuk entrelaçado apresenta como principal vantagem ao conversor cuk convencional, menores ripples de corrente, já que a corrente de entrada é dividida entre as

fases do mesmo (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015)(K.D; Daniel; Unnikrishnan, 2017). Essa característica também reduz o estresse de chaveamento dos transistores, implicando numa melhor qualidade da potência obtida e entregue pelo conversor (K.D; Daniel; Unnikrishnan, 2017).

Para a definição dos valores de componentes do conversor cuk entrelaçado serão utilizados os mesmos parâmetros de projeto do conversor cuk convencional. Além disso, os cálculos serão efetuados para uma das fases e os componentes encontrados serão replicados para todas as fases do circuito.

Dessa forma, a partir da equação 3.1, sabe-se que a carga equivalente vista pelo circuito  $R$  é de  $108\Omega$ .

### 3.2.2.1 Ciclo de Trabalho

O ciclo de trabalho do conversor cuk entrelaçado é encontrado a partir da equação 2.18 que equivale á equação 2.7. Dessa forma, para os mesmos parâmetros de tensão de entrada e saída, o ciclo de trabalho deste conversor é igual ao do conversor cuk convencional, definido na equação 3.2 como 0,847.

### 3.2.2.2 Indutores

Como o ciclo de trabalho, a carga e a frequência de chaveamento do conversor cuk entrelaçado são iguais aos do conversor cuk convencional, os valores dos indutores a serem utilizados, por fase, serão iguais os encontrados para o conversor anterior. Dessa forma, teremos  $L_{X1}$  e  $L_{X2}$ , onde  $X$  indica a fase, definidos nas equações 3.9 e 3.10, respectivamente.

$$L_{X1} = 1,99mH \quad (3.9)$$

$$L_{X2} = 18,3mH \quad (3.10)$$

### 3.2.2.3 Capacitores

Assim como no conversor cuk convencional, os capacitores são encontrados a partir das equações 2.10 e 2.11. Sendo assim, teremos os capacitores  $C_{X1}$  e  $C2$ , onde  $X$  representa a fase, com os valores presentes nas equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$C_{X1} = 1,67\mu F \quad (3.11)$$

$$C2 = 94,3\mu F \quad (3.12)$$

### 3.2.2.4 Circuito resultante e resultados de simulação

Assim como no conversor cuk convencional, os valores encontrados para cada componente foram aproximados a fim de se utilizar apenas valores comerciais. O circuito do

conversor cuk entrelaçado de duas fases montado no PSIM pode ser visto na figura 30.

Percebe-se que o pwm de cada braço, apesar de apresentar o mesmo ciclo de trabalho é defasado de  $180^\circ$ , que equivale ao atraso de  $360^\circ/N$ , onde N representa o número de fases (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015).

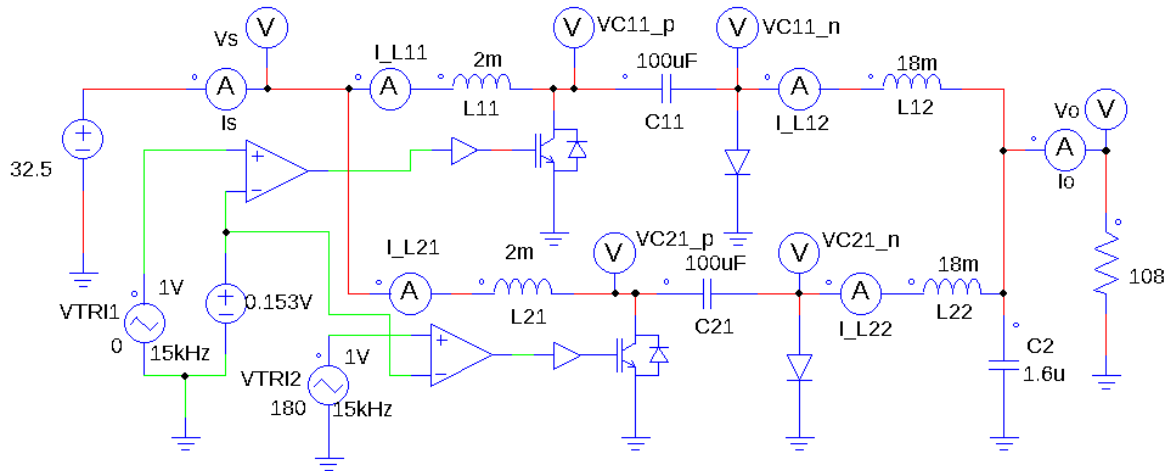


Figura 30 – Circuito do conversor cuk entrelaçado de duas fases

A partir da simulação do circuito da figura 30 no PSIM, obteve-se os valores de média e ripple presentes na tabela 5. Além disso, as formas de onda verificadas são apresentadas na figuras 31 a 38.

|  | Fase 1 | Fase 2 | -        |
|--|--------|--------|----------|
| Corrente média em $L_{X1}$             | 4,62A  | 4,60A  | -        |
| Corrente de ripple em $L_{X1}$         | 0,91A  | 0,90A  | -        |
| Corrente de ripple em $L_{X2}$         | 0,10A  | 0,10A  | -        |
| Tensão de ripple em $C_{X1}$           | 0,83V  | 0,83A  | -        |
| Corrente média na entrada              | -      | -      | 9,23A    |
| Corrente de ripple na entrada          | -      | -      | 0,72A    |
| Tensão média de saída do conversor     | -      | -      | -179,91V |
| Tensão de ripple de saída do conversor | -      | -      | 0,22V    |
| Potência de saída média                | -      | -      | 299,71W  |
| Oscilação da potência de saída         | -      | -      | 0,72W    |

Tabela 5 – Valores medidos para o conversor cuk entrelaçado de duas fases

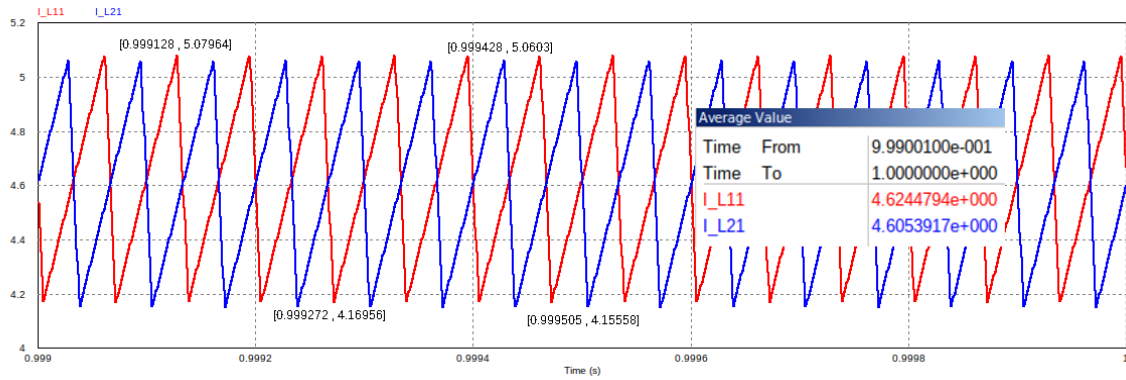


Figura 31 – Corrente de ripple no indutores  $L_{11}$  e  $L_{21}$  do conversor cuk entrelaçado de duas fases

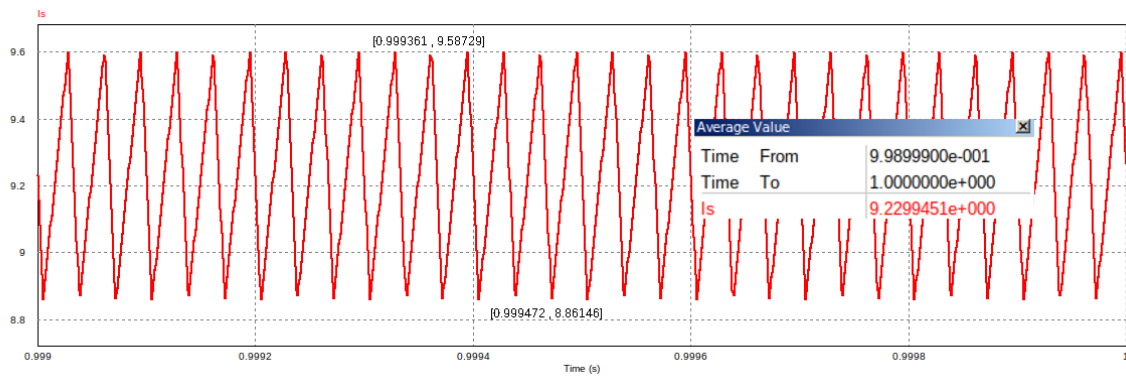


Figura 32 – Corrente de ripple na entrada do conversor cuk entrelaçado de duas fases

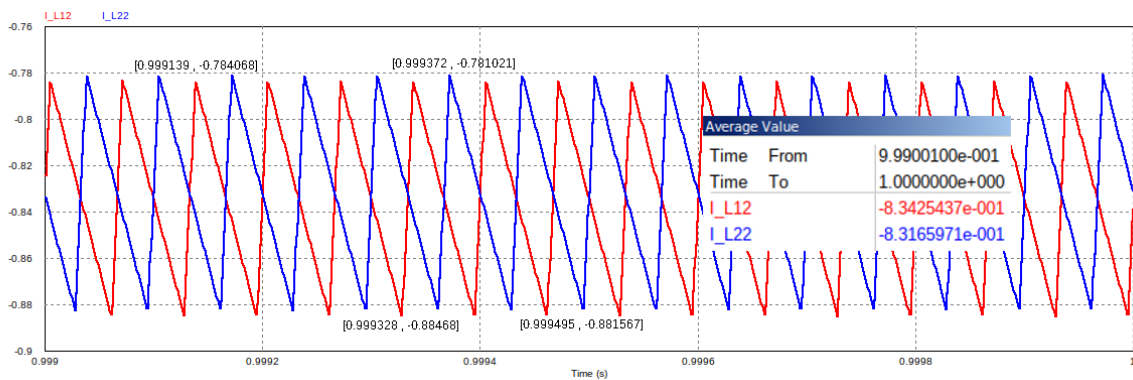


Figura 33 – Corrente de ripple nos indutores  $L_{12}$  e  $L_{22}$  do conversor cuk entrelaçado de duas fases

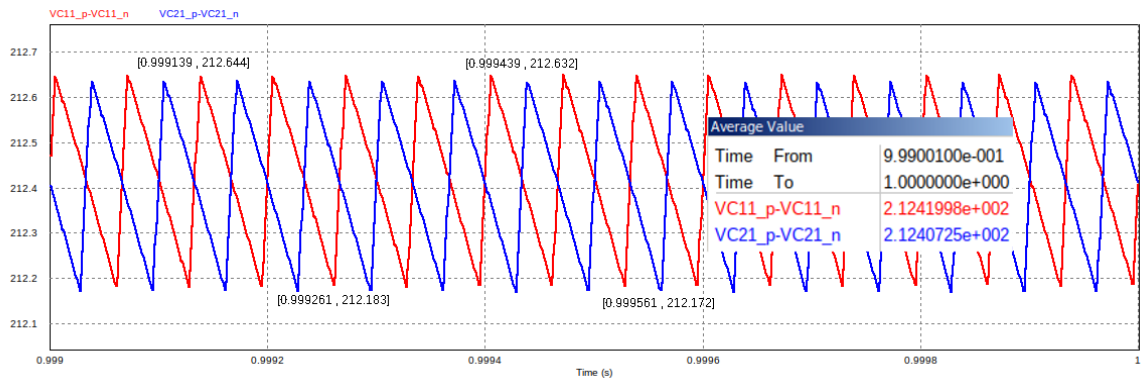


Figura 34 – Tensão de ripple nos capacitores  $C_{11}$  e  $C_{21}$  do conversor cuk entrelaçado de duas fases

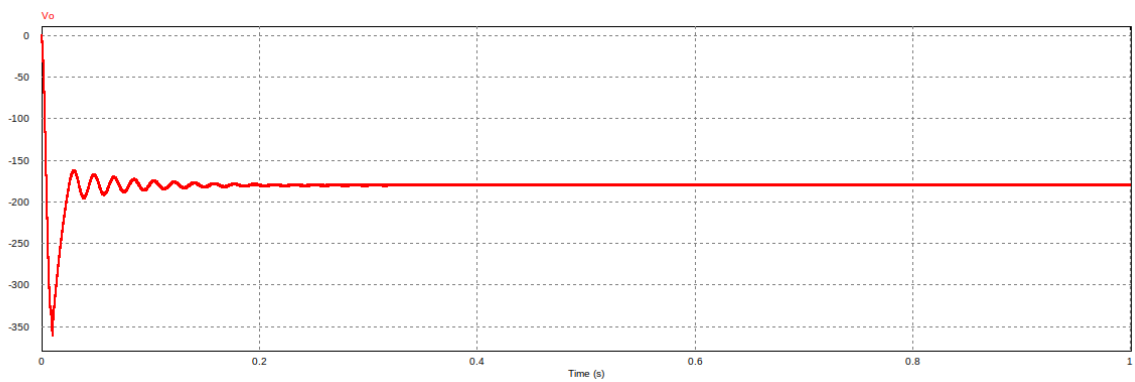


Figura 35 – Comportamento da tensão de saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases

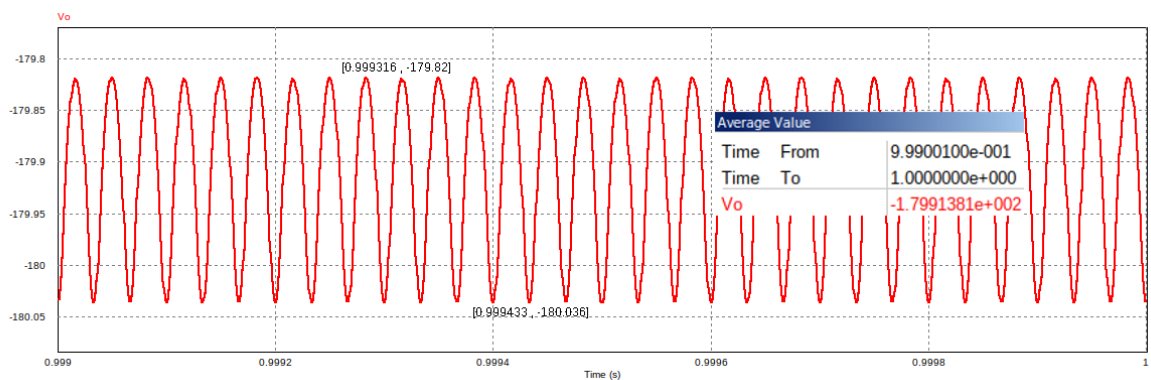


Figura 36 – Tensão de ripple de saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases

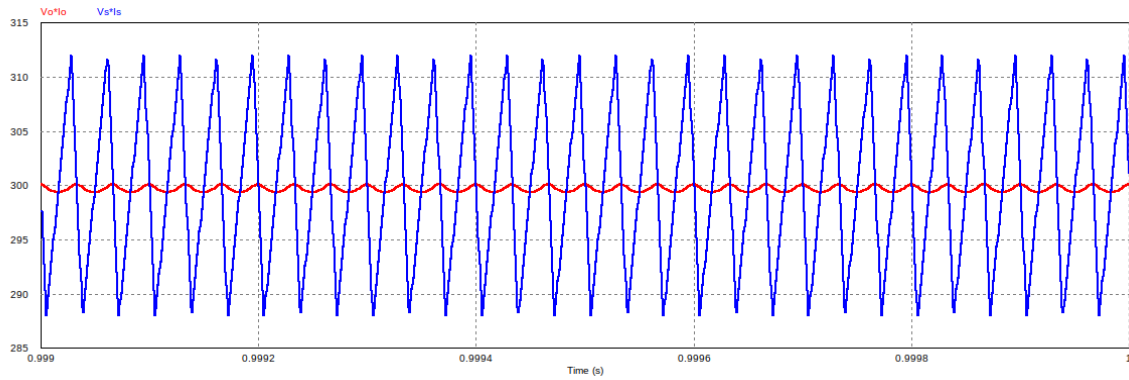


Figura 37 – Potência na entrada e saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases

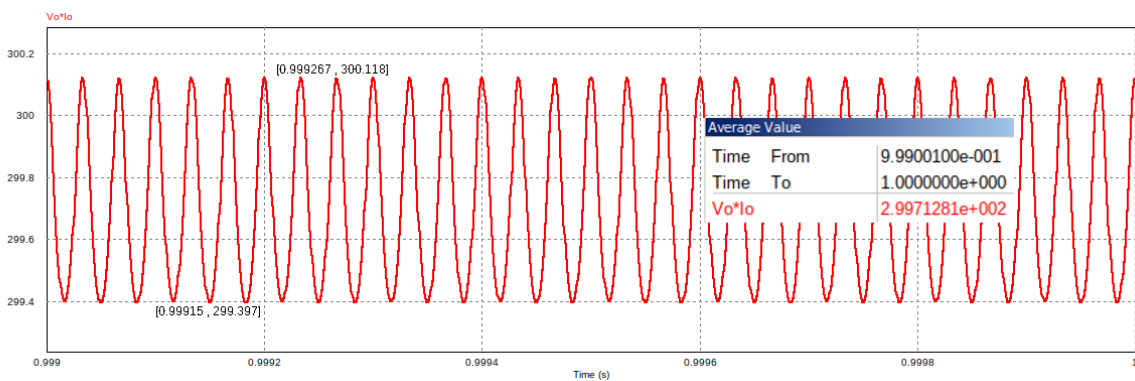


Figura 38 – Oscilação da potência saída do conversor cuk entrelaçado de duas fases

De acordo com os resultados presentes na tabela 5, foram obtidos os valores desejados cada uma das fases do conversor. Se comparados aos valores referentes aos resultados do conversor cuk convencional, tabela 4, é possível perceber que, enquanto cada uma das fases do conversor cuk entrelaçado apresenta ripple de corrente igual ao encontrado na entrada do conversor cuk convencional, a variação da corrente na entrada do conversor cuk entrelaçado é equivalente a 78% da encontrada na outra implementação.

Além da melhoria de qualidade da corrente de entrada no circuito, o conversor cuk entrelaçado também apresentou tensão de ripple equivalente a 58% menor e oscilação de potência equivalente a 41% dos valores apresentados pela implementação convencional, apesar de apresentar mesmo rendimento que este, considerando-se valores médios de potência.

### 3.3 Projeto dos Conversores CC/CA

#### 3.3.1 Inversor tipo fonte de tensão (VSI) Bipolar

A figura 39 apresenta o circuito montado no PSIM para simular um inversor VSI com PWM bipolar. Foi utilizada uma fonte de tensão de 180V para emular a alimentação



do circuito.

Para o sinal de portadora foi utilizada uma fonte de sinal triangular de 1kHz e 3V de amplitude pico a pico. Já como modulante, uma fonte de sinal senoidal de 1V e 60Hz, uma vez que a modulante deve corresponder à forma de onda e frequência da saída desejada.

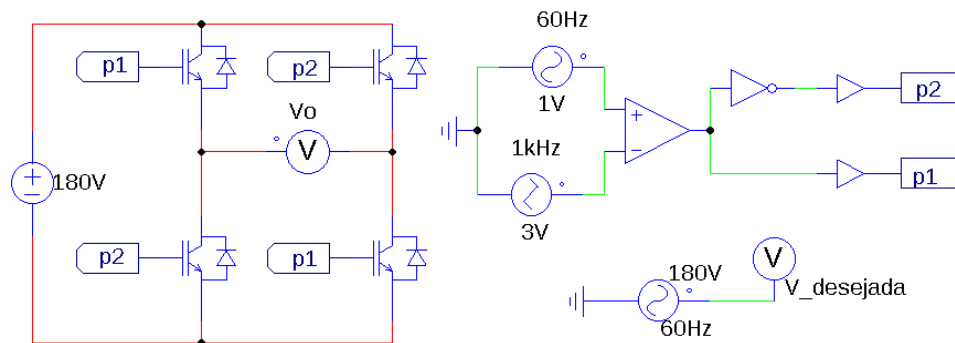


Figura 39 – Inversor VSI Bipolar

Para analisar as características deste inversor foi simulado o circuito da figura 39, do qual obteve-se o sinal de saída que pode ser visto na figura 40, juntamente com o sinal senoidal desejado, para facilitar a comparação. Ainda na figura 40 é possível verificar que este circuito apresenta distorção harmônica total, *THD*, do inglês *Total Harmonic Distortion* de 1,84%.

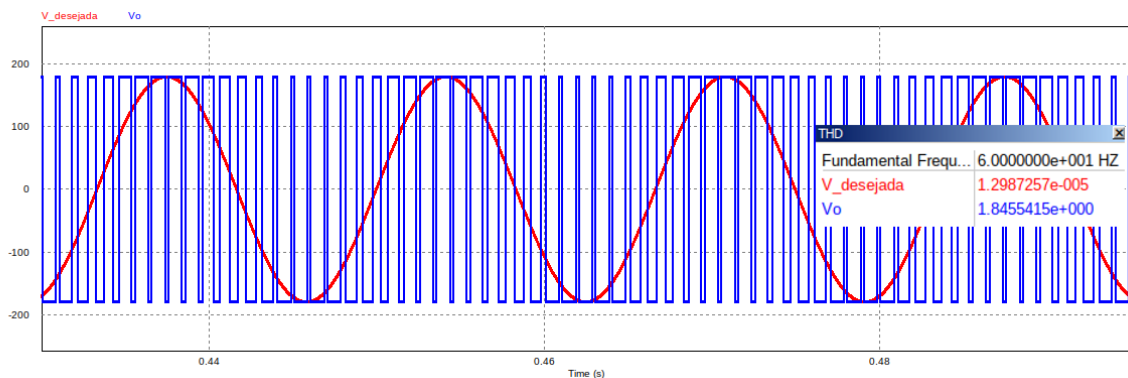


Figura 40 – Sinal de saída do inversor VSI bipolar

### 3.3.2 Inversor tipo fonte de tensão (VSI) Unipolar

A figura 41 apresenta o circuito montado no PSIM para simular um inversor VSI com PWM unipolar. Assim como no inversor bipolar, utilizou-se uma fonte de tensão contínua de 180V para emular a alimentação do circuito.

Para o sinal de portadora foi utilizada uma fonte de sinal triangular de 1kHz e 3V de amplitude pico a pico. Já para as modulantes, foram utilizadas duas fontes senoidais de 60Hz e 1V de amplitude, defasadas entre si de 180°.

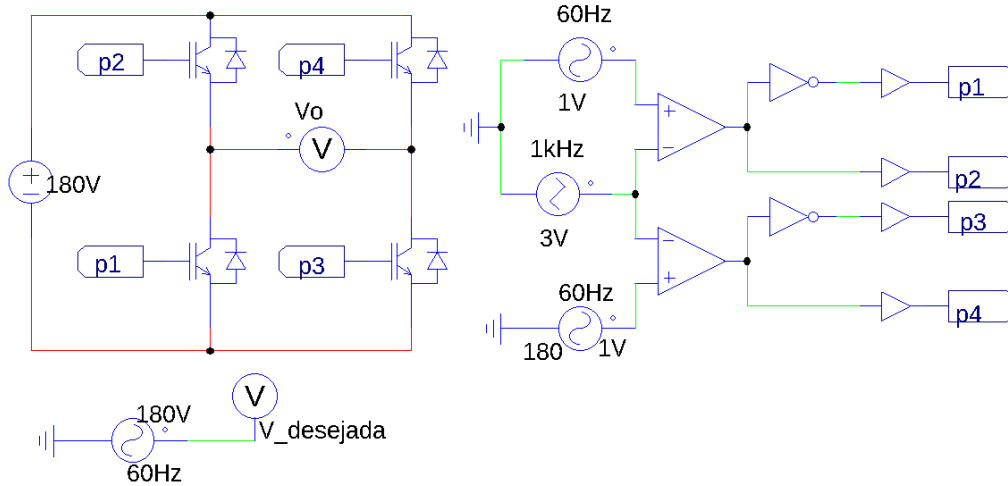


Figura 41 – Inversor VSI Unipolar

Para analisar as características deste inversor foi simulado o circuito da figura 41, do qual assim como para o inversor bipolar, obteve-se o sinal de saída, presente na figura 42. Ainda a partir desta figura verifica-se que este circuito apresenta distorção harmônica total consideravelmente inferior ao inversor bipolar, de 0,96%.

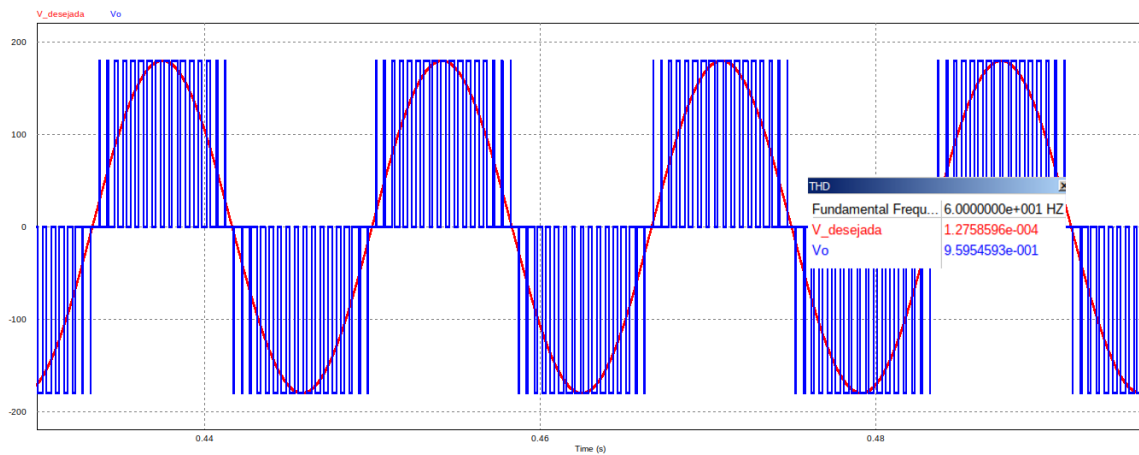


Figura 42 – Sinal de saída do inversor VSI unipolar

### 3.3.3 Inversor Ćuk Integrado

O inversor cuk integrado é uma versão simplificada do conversor convencional, descrito na seção 3.2.1. Nesta implementação, os componentes responsáveis pela filtragem do sinal de saída ( $L2$  e  $C2$ ) e é incorporado ao capacitor  $C1$  um inversor. Os diodos paralelos aos transistores do inversor executam a função do diodo.

Dessa forma, tanto o ciclo de trabalho quanto os valores dos componentes restantes,  $L1$  e  $C1$  podem ser encontrados através das equações do conversor cuk convencional, sendo estas as equações 3.2, 3.5 e 3.8, respectivamente.

### 3.3.3.1 Circuito Resultante e resultados de simulação

Sendo assim está presente na figura 43 o circuito utilizado na simulação do inversor cuk integrado.

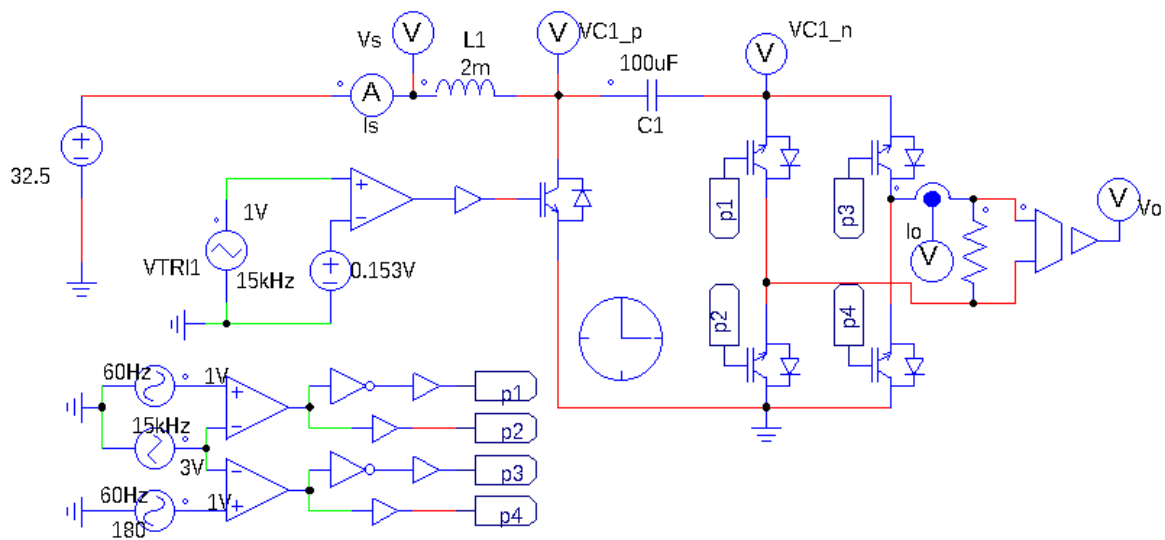


Figura 43 – Circuito do inversor cuk integrado

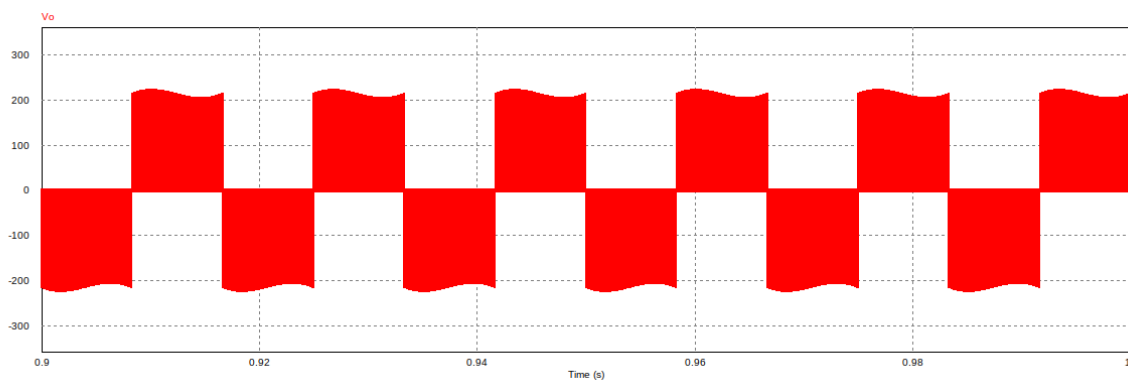


Figura 44 – Sinal de saída do inversor cuk integrado

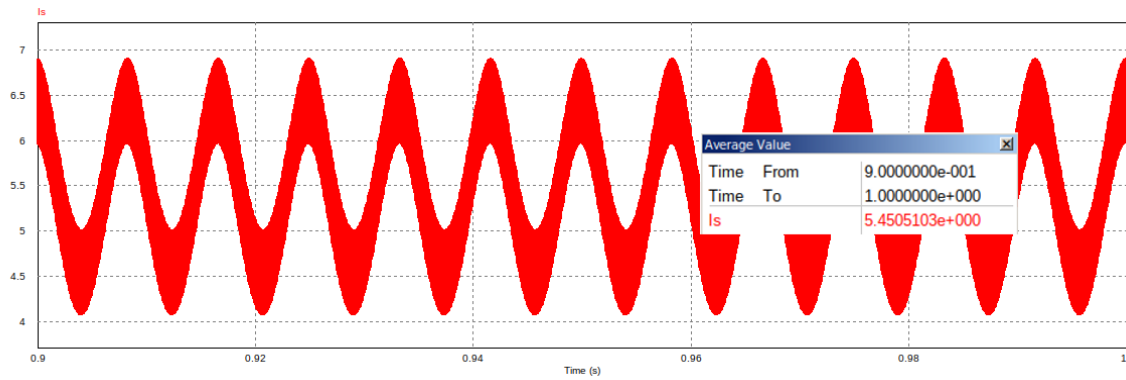


Figura 45 – Corrente no indutor  $L1$  do inversor cuk integrado

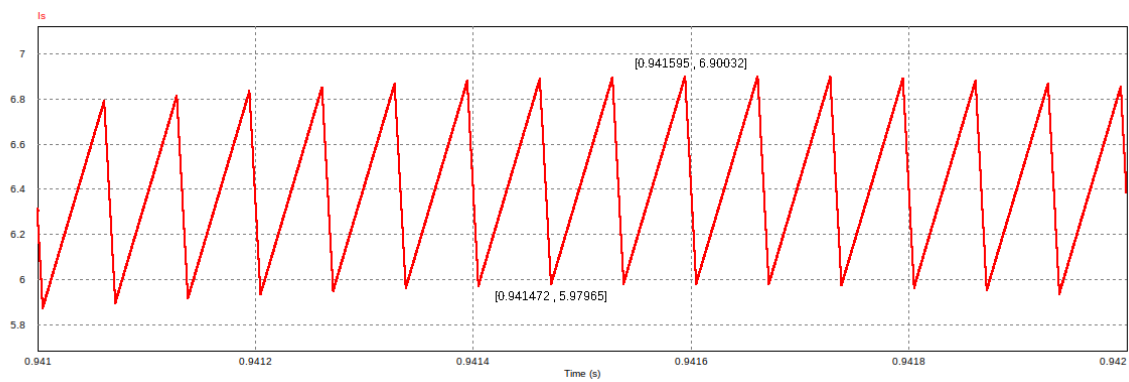


Figura 46 – Detalhe da oscilação na corrente no indutor  $L1$  do inversor cuk integrado

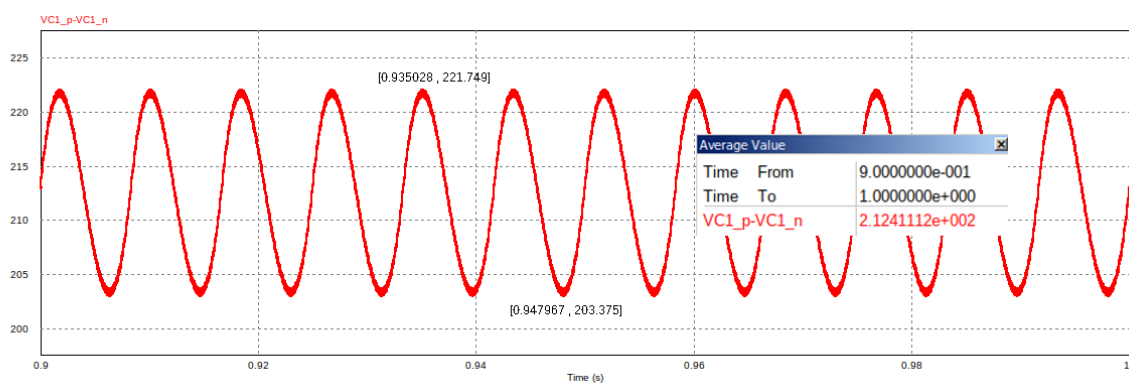


Figura 47 – Tensão no capacitor  $C1$  do inversor cuk integrado

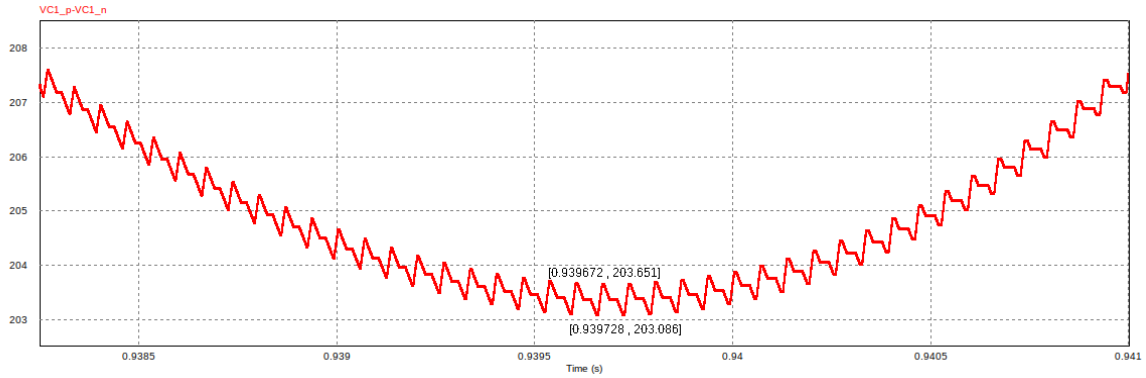


Figura 48 – Detalhe da oscilação na tensão no capacitor  $C1$  do inversor cuk integrado

Nas figuras 45 a 48 é possível perceber a influência do chaveamento dos transistores do inversor utilizado nos sinais da corrente de entrada e da tensão no capacitor  $C1$ , que apresentam um ruído triangular de alta frequência de aproximadamente 0,92A e 0,6V, respectivamente além de características senoidais.

### 3.4 Rastreador de ponto de máxima potência (MPPT)

O algoritmo de rastreamento de ponto de máxima potência do painel fotovoltaico escolhido foi o  $PEO$ . Foi desenvolvida uma rotina em C, que segue o fluxograma da figura 15 utilizando o **C Block**, um segurador de ordem zero com frequência de amostragem de 500Hz e um comparador de tensão ao qual é conectado uma fonte de sinal triangular de 15kHz e 1V de amplitude, a portadora.

O segurador se faz necessário para determinar a frequência da execução da rotina, uma vez que o **C Block** executa o código a cada passo da simulação.

Para facilitar a inserção da MPPT nos circuitos, foi montado um sub-circuito, que compreende os dois blocos e o comparador da implementação(49). O código implementado pode ser visto no anexo A.

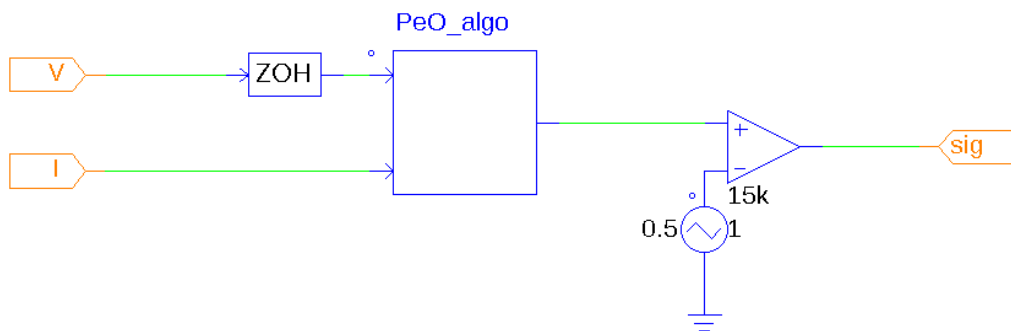


Figura 49 – Circuito de MPPT implementado

Nas figuras 51 e 53 são expostos os comportamentos dos conversores cuk convencional e entrelaçado de duas fases quando alimentados pelo painel fotovoltaico juntamente com o MPPT implementado. Os circuitos utilizados podem ser vistos nas figuras 50 e 52.

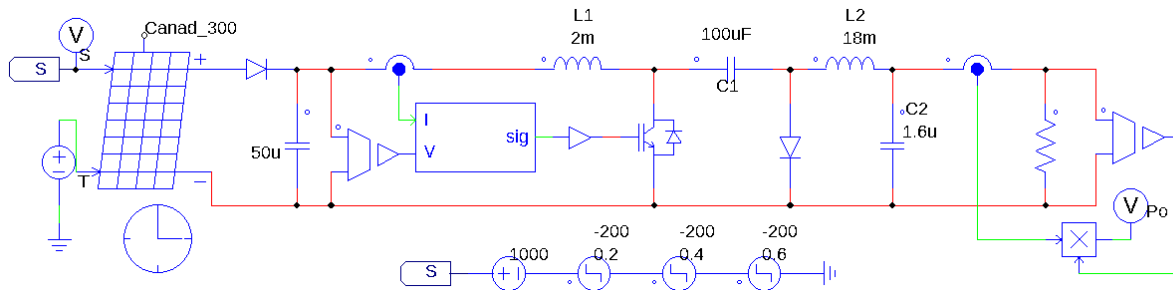


Figura 50 – Circuito do conversor cuk convencional alimentado pelo painel fotovoltaico com MPPT

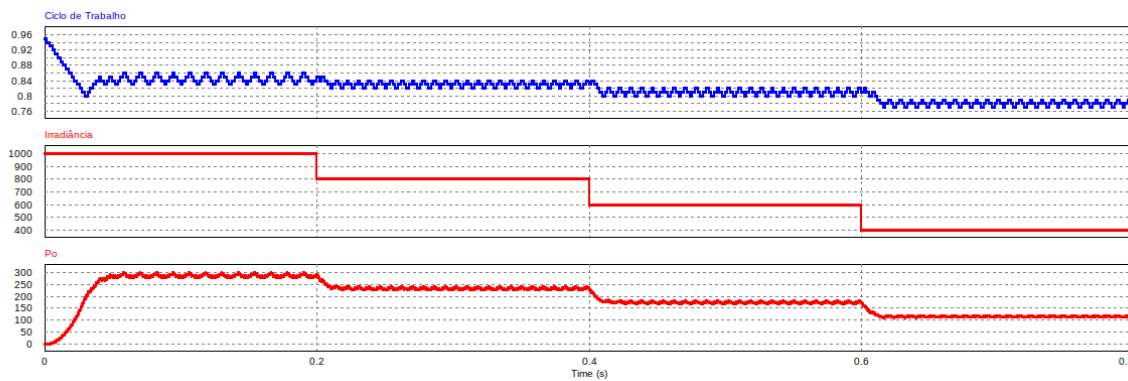


Figura 51 – Comportamento do ciclo de trabalho e da potência de saída para alterações de irradiância para o conversor cuk convencional

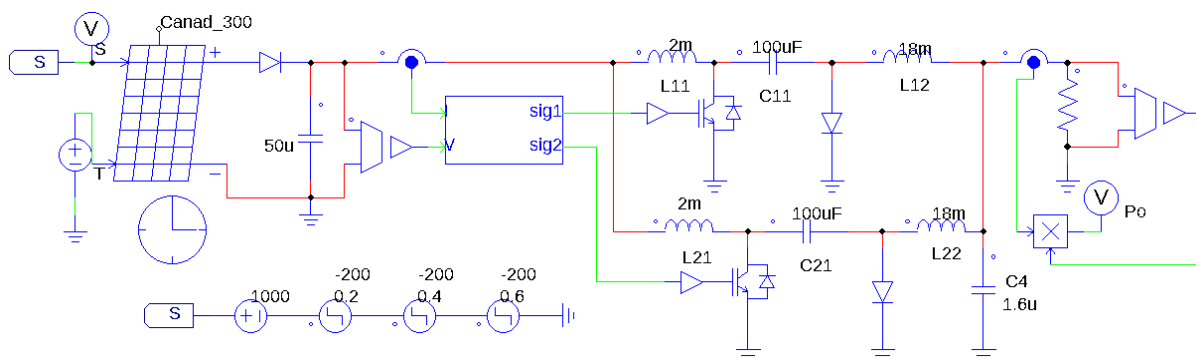


Figura 52 – Circuito do conversor cuk entrelaçado alimentado pelo painel fotovoltaico com MPPT

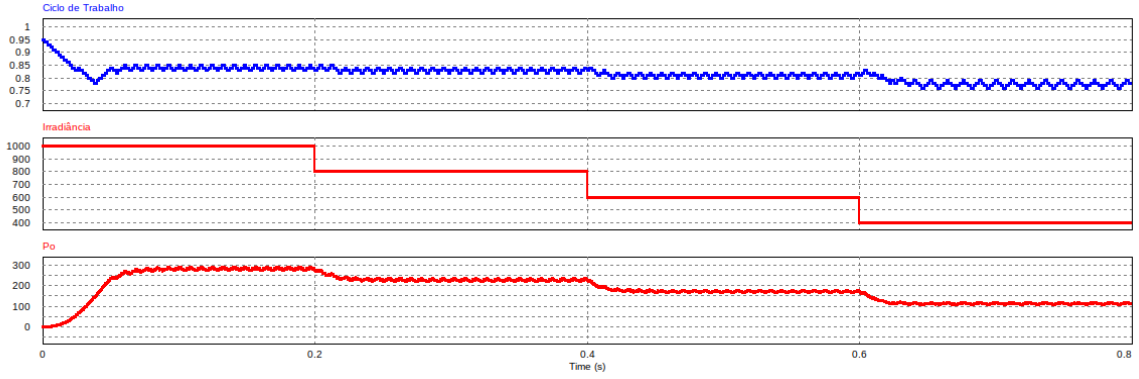


Figura 53 – Comportamento do ciclo de trabalho e da potência de saída para alterações de irradiância para o conversor cuk entrelaçado

### 3.5 Filtro

Os componentes do filtro são encontrados a partir das equações 2.27 a 2.34.

O filtro é projetado para um inversor de  $300W$ , conectado a rede monofásica, com tensão de barramento CC de  $210V$  e frequência de chaveamento de  $15kHz$ . Utilizando esses parâmetros, são encontrados os componentes representados pelas equações 3.13 a 3.15.

$$L_1 = 9,88mH \quad (3.13)$$

$$L_2 = 68,4\mu H \quad (3.14)$$

$$C = 9,87\mu F \quad (3.15)$$

Verifica-se, a partir da equação 2.32 e dos componentes encontrados que a frequência de ressonância do circuito é de  $6144Hz$ . Como a frequência de ressonância é superior a  $600Hz$  e inferior a  $7500Hz$  a equação 2.33 é satisfeita e pode-se calcular o resistor de ressonância, a partir da equação 2.34. O valor encontrado para o resistor está presente na equação 3.16.

$$R_f = 0,87\Omega \quad (3.16)$$

O filtro resultante pode ser visto na figura 54, com o capacitor  $C$  aproximado para o valor comercial mais próximo, de  $10\mu F$ .

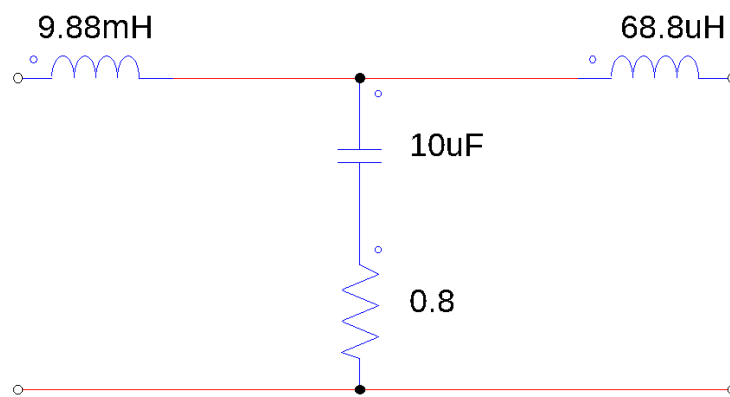


Figura 54 – Filtro LCL implementado



## 4 Conjuntos Finais

Neste capítulo são apresentados os conjuntos formados a partir da conexão dos circuitos dimensionados no capítulo 3 e os resultados das simulações executadas com os mesmos.

São, ao todo, seis conjuntos distintos uma vez que cada implementação proposta é conectada a um inversor bipolar e a um inversor unipolar, a fim de avaliar a influência desse estágio. Todos as combinações apresentam, entretanto, o painel fotovoltaico, o rastreador de ponto máximo de potência e o filtro LCL em comum.

Todas as figuras de circuitos desse capítulo são apresentadas também no anexo B em modo paisagem e, portanto, com maior qualidade.

### 4.0.1 Conjuntos baseados no conversor cuk convencional

#### 4.0.1.1 Inversor cuk convencional bipolar

O circuito implementado no PSIM para o conjunto que utiliza o conversor cuk convencional conectado ao inversor bipolar, com rastreamento de ponto máximo de potência é apresentado na figura 55. Além disso, a tabela 6 apresenta os principais resultados encontrados através da simulação deste circuito.

Na figura 56 são apresentados tensão e corrente de saída, ampliada em dez vezes, com informação da distorção harmônica total desses sinais, considerando frequência base de 60Hz. O espectro de frequências da tensão de saída obtida pode ser analisada na figura 57.

Já a figura 58 mostra os sinais de entrada e saída do conjunto para alterações na irradiância que alimenta o painel fotovoltaico.

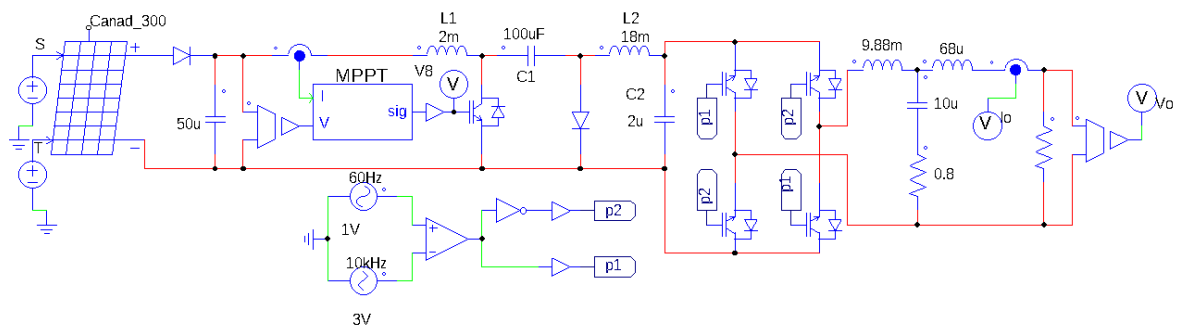


Figura 55 – Circuito implementado para o inversor cuk convencional bipolar

| Corrente de saída eficaz | Corrente de ripple | Tensão de saída eficaz | Tensão de Ripple | Potência de saída | Rendimento | THD   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|-------|
| 2,26A                    | 20,21 mA           | 126,62V                | 1,13V            | 286,31W           | 95,44%     | 1,20% |

Tabela 6 – Valores obtidos para o inversor cuk convencional bipolar

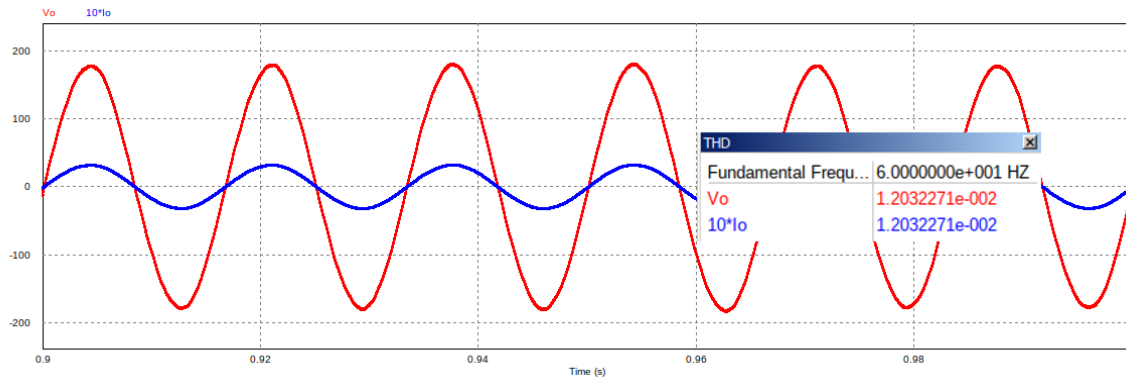


Figura 56 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk convencional bipolar

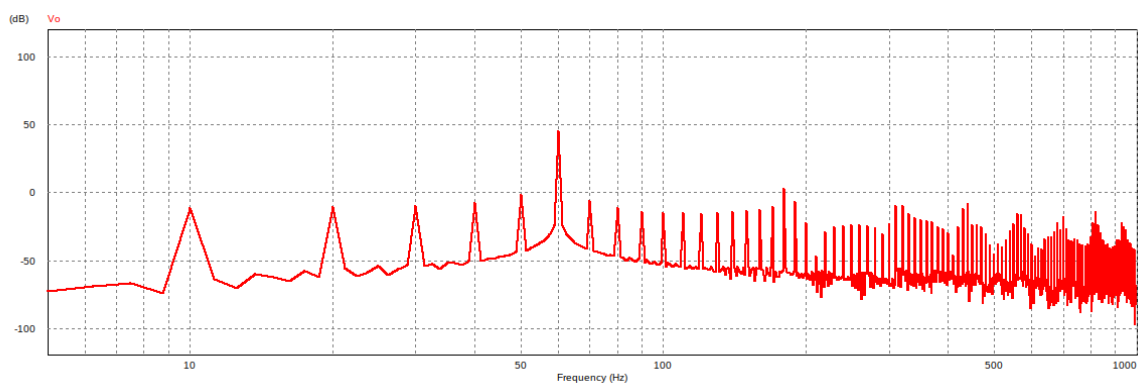


Figura 57 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk convencional bipolar

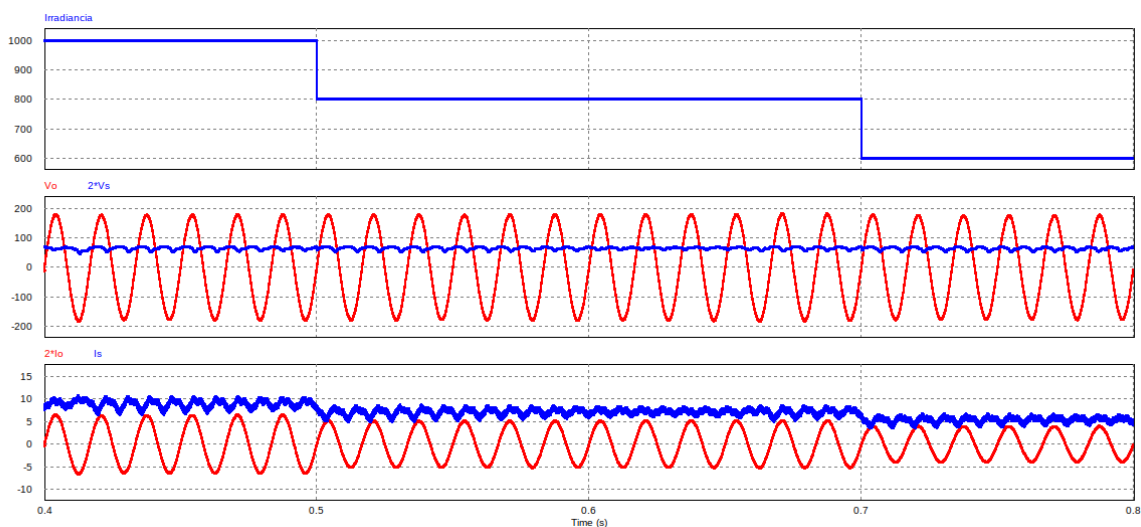


Figura 58 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk convencional bipolar com variação de irradiância

#### 4.0.1.2 Inversor cuk convencional unipolar

O circuito implementado no PSIM para o conjunto que utiliza o conversor cuk convencional conectado ao inversor unipolar, com rastreamento de ponto máximo de potência é apresentado na figura 59. Além disso, a tabela 7 apresenta os principais resultados encontrados através da simulação deste circuito.

Na figura 60 são apresentados tensão e corrente de saída, ampliada em dez vezes, com informação da distorção harmônica total desses sinais, considerando frequência base de 60Hz. O espectro de frequências da tensão de saída obtida pode ser analisada na figura 61.

Já a figura 62 mostra os sinais de entrada e saída do conjunto para alterações na irradiância que alimenta o painel fotovoltaico.

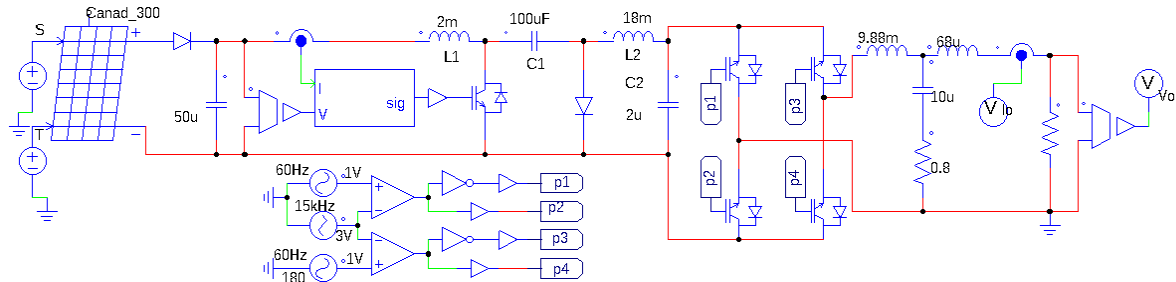


Figura 59 – Circuito implementado para o inversor cuk convencional unipolar

| Corrente de saída eficaz | Corrente de ripple | Tensão de saída eficaz | Tensão de Ripple | Potência de saída | Rendimento | THD   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|-------|
| 2,26A                    | 2,99mA             | 126,32V                | 0,17V            | 284,93W           | 94,98%     | 1,18% |

Tabela 7 – Valores obtidos para o inversor cuk convencional unipolar

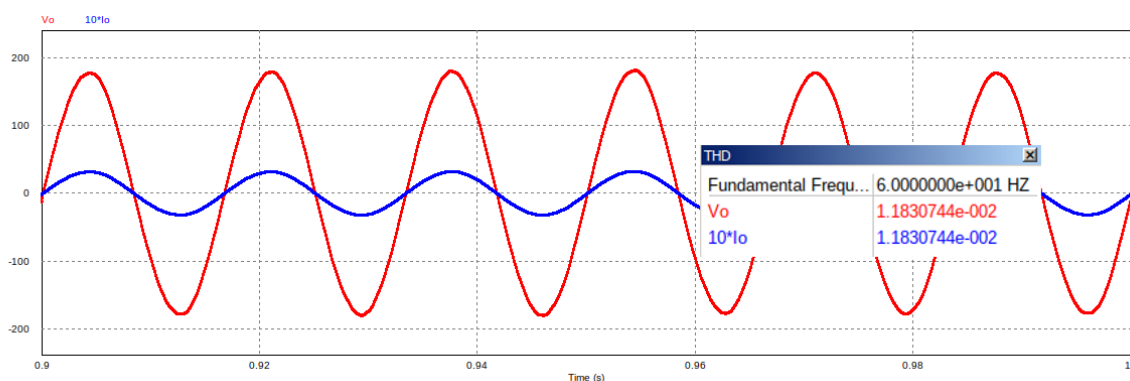


Figura 60 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk convencional unipolar

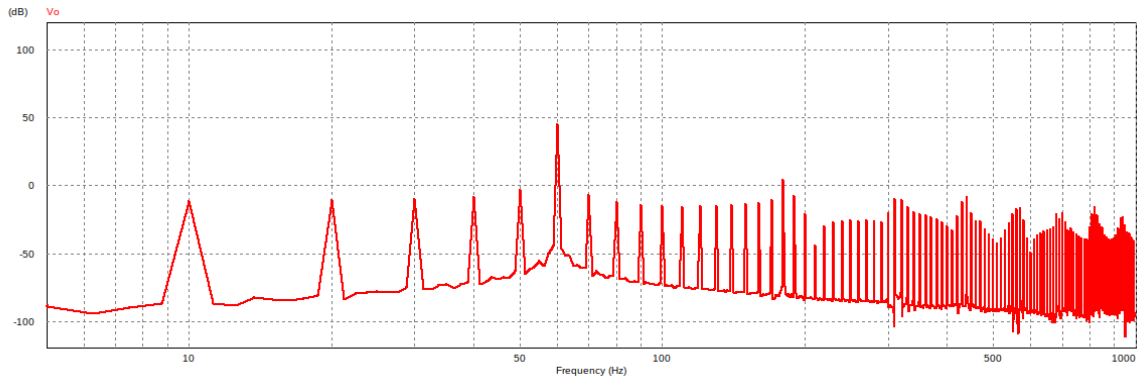


Figura 61 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk convencional unipolar

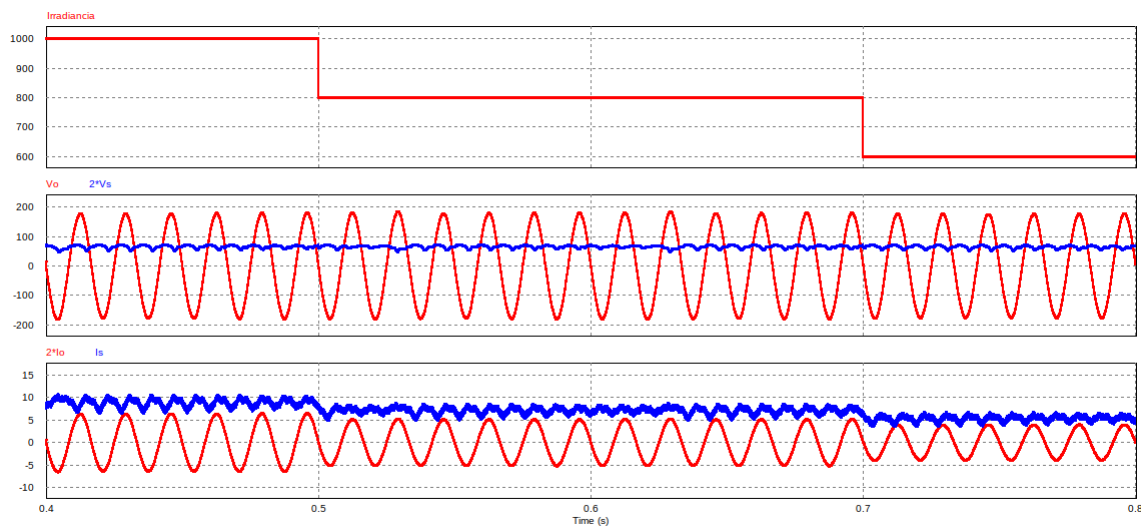


Figura 62 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk convencional unipolar com variação de irradiância

## 4.0.2 Conjuntos baseados no conversor cuk entrelaçado de duas fases

### 4.0.2.1 Inversor cuk entrelaçado bipolar

A figura 63 apresenta o circuito resultante da conexão do conversor cuk entrelaçado de duas fases ao inversor bipolar implementado no PSIM. Além disso, a tabela 8 apresenta os principais resultados encontrados através da simulação deste circuito. Na figura 64 são apresentados tensão e corrente de saída, ampliada em dez vezes, com informação da distorção harmônica total desses sinais. O espectro de frequências da tensão de saída obtida pode ser analisada na figura 65.

Já a figura 66 mostra os sinais de entrada e saída do conjunto para alterações na irradiância que alimenta o painel fotovoltaico.

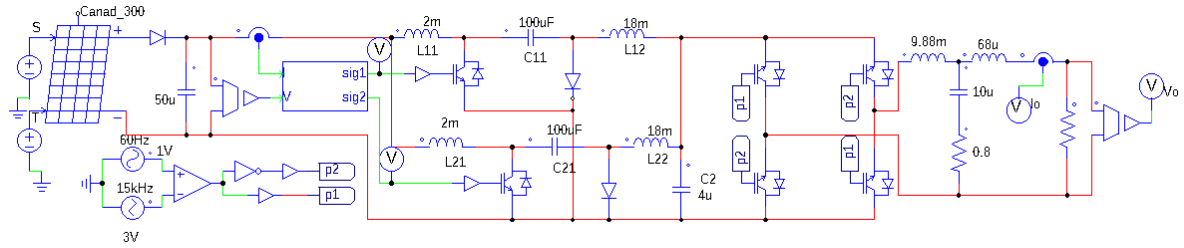


Figura 63 – Circuito implementado para o conversor cuk entrelaçado de duas fases com inversor bipolar

| Corrente de saída eficaz | Corrente de ripple | Tensão de saída eficaz | Tensão de Ripple | Potência de saída | Rendimento | THD   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|-------|
| 2,27A                    | 9,47mA             | 126,94V                | 0,53V            | 287,73W           | 95,91%     | 1,02% |

Tabela 8 – Valores obtidos para o inversor cuk entrelaçado bipolar

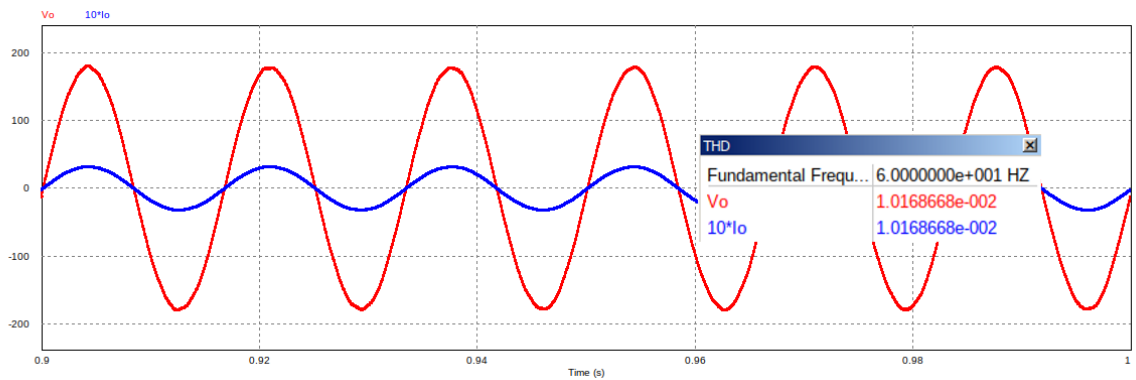


Figura 64 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk entrelaçado bipolar

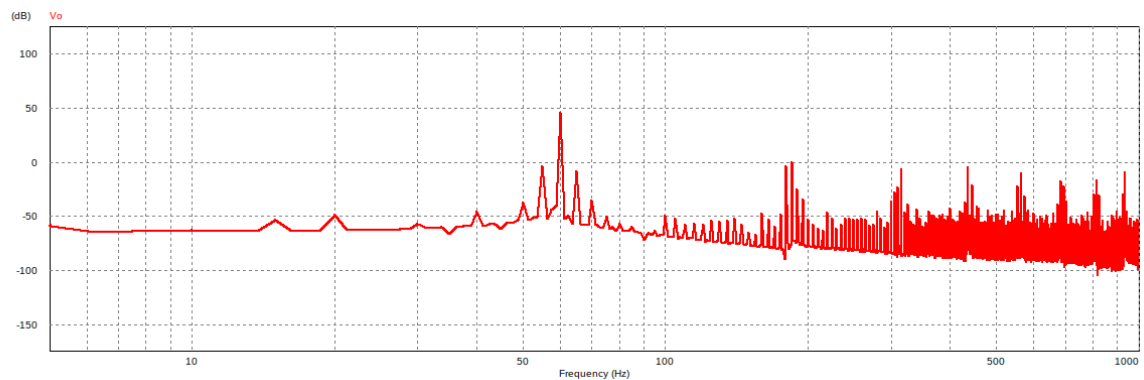


Figura 65 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk entrelaçado bipolar

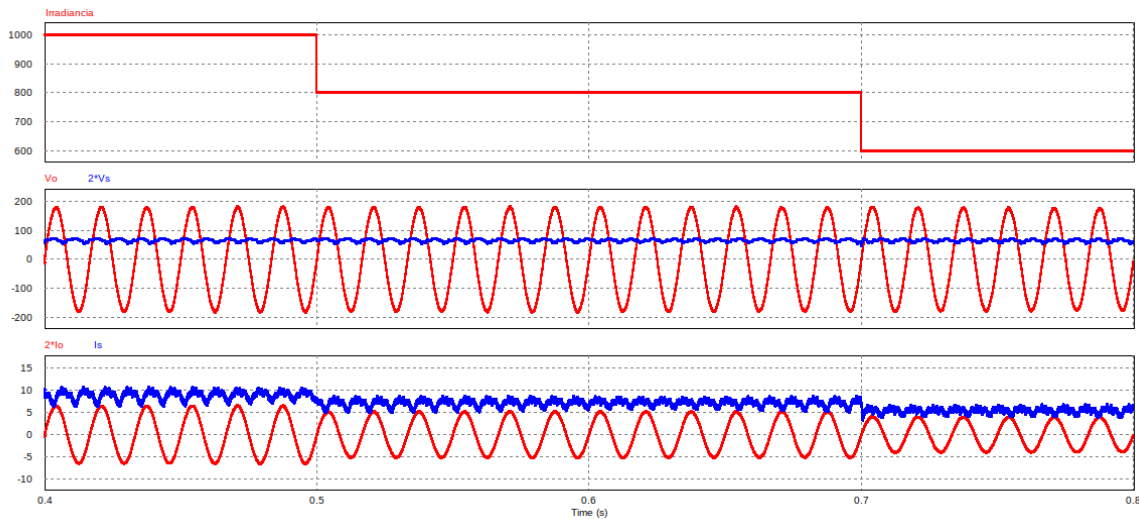


Figura 66 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk entrelaçado bipolar com variação de irradiância

#### 4.0.2.2 Inversor cuk entrelaçado unipolar

A figura 67 apresenta o circuito resultante da conexão do conversor cuk entrelaçado de duas fases ao inversor unipolar implementado no PSIM. Além disso, a tabela 9 apresenta os principais resultados encontrados através da simulação deste circuito. Na figura 68 são apresentados tensão e corrente de saída, ampliada em dez vezes, com informação da distorção harmônica total desses sinais. O espectro de frequências da tensão de saída obtida pode ser analisada na figura 69.

Já a figura 70 mostra os sinais de entrada e saída do conjunto para alterações na irradiância que alimenta o painel fotovoltaico.

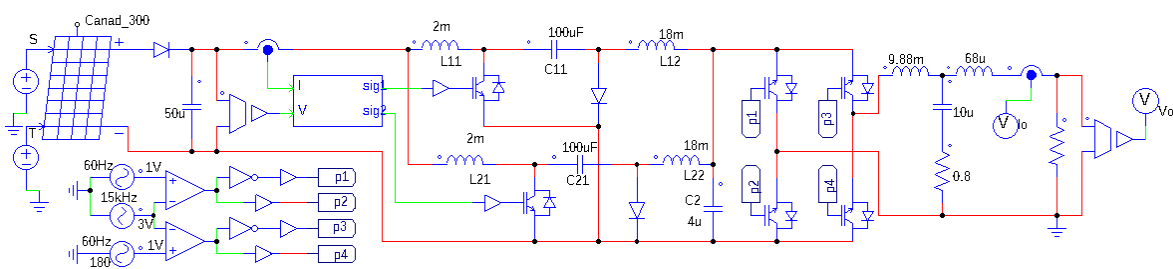


Figura 67 – Circuito implementado para o conversor cuk entrelaçado de duas fases com inversor unipolar

| Corrente de saída eficaz | Corrente de ripple | Tensão de saída eficaz | Tensão de Ripple | Potência de saída | Rendimento | THD   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|-------|
| 2,27A                    | 2,98mA             | 126,91V                | 0,16V            | 287,59W           | 95,86%     | 1,01% |

Tabela 9 – Valores obtidos para o inversor cuk entrelaçado unipolar

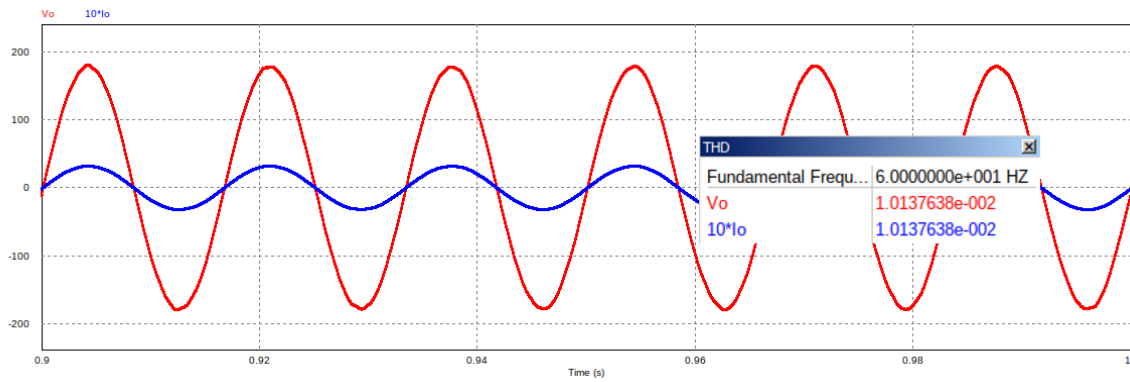


Figura 68 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk entrelaçado unipolar

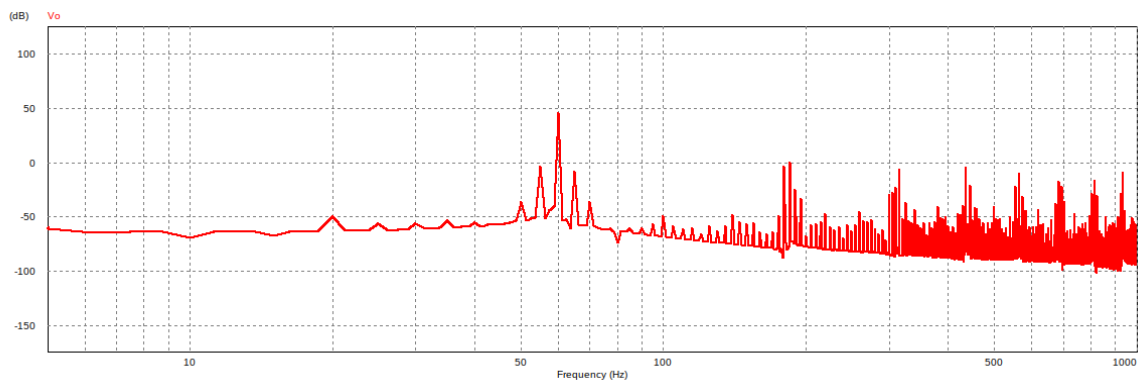


Figura 69 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk entrelaçado unipolar

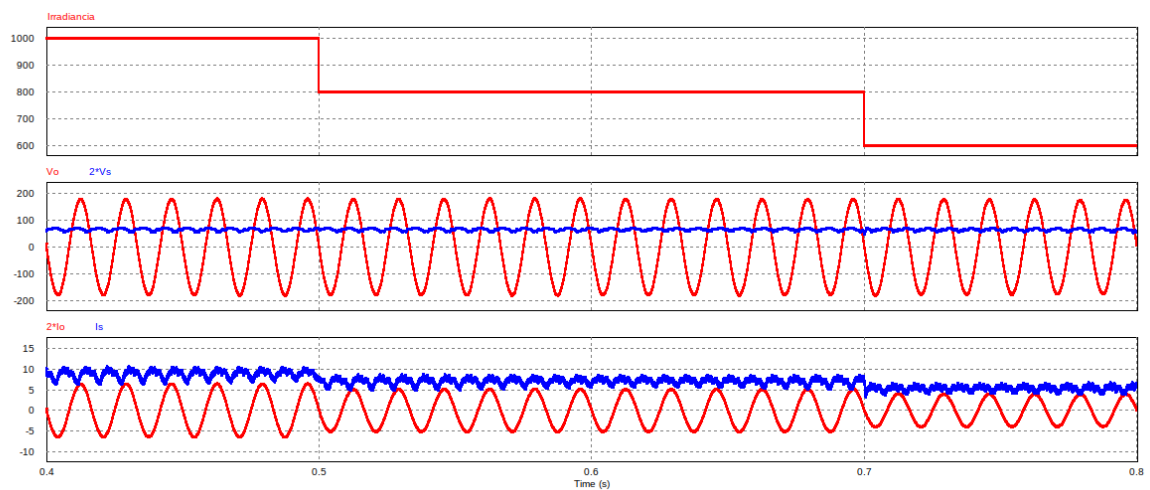


Figura 70 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk entrelaçado unipolar com variação de irradiância

### 4.0.3 Conjuntos baseados no inversor cuk integrado

#### 4.0.3.1 Inversor cuk integrado bipolar

O circuito implementado no PSIM para o inversor cuk integrado bipolar é apresentado na figura 71, já a figura 72 mostra os sinais de tensão e corrente de saída, ampliada em dez vezes, além do valor medido para a distorção harmônica total dos mesmos. O espectro de frequências da tensão de saída obtida pode ser analisada na figura 73.

Além disso, a tabela 10 apresenta os principais resultados encontrados através da simulação deste circuito e a figura 74 mostra os sinais de entrada e saída do conjunto para alterações na irradiância que alimenta o painel fotovoltaico.

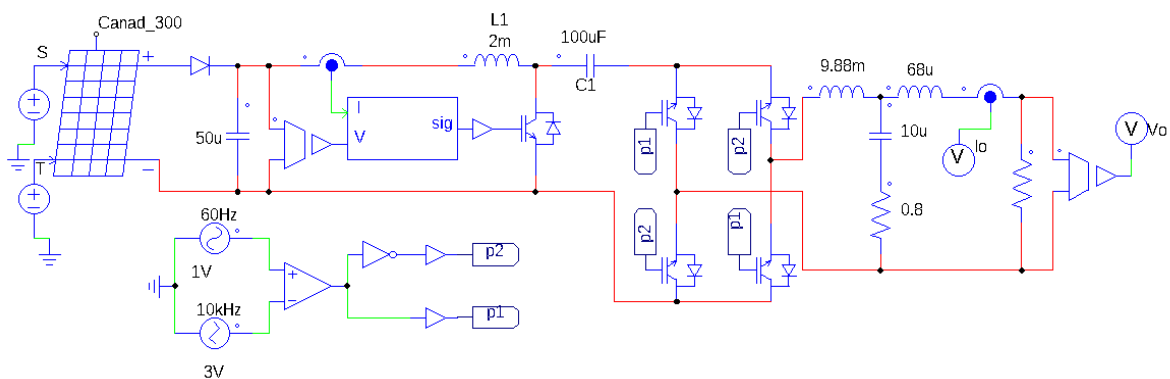


Figura 71 – Circuito implementado para o inversor cuk integrado bipolar

| Corrente de saída eficaz | Corrente de ripple | Tensão de saída eficaz | Tensão de Ripple | Potência de saída | Rendimento | THD    |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|--------|
| 2,24A                    | 7,57mA             | 125,64V                | 0,42V            | 281,87W           | 93,96%     | 25,53% |

Tabela 10 – Valores obtidos para o inversor cuk integrado bipolar

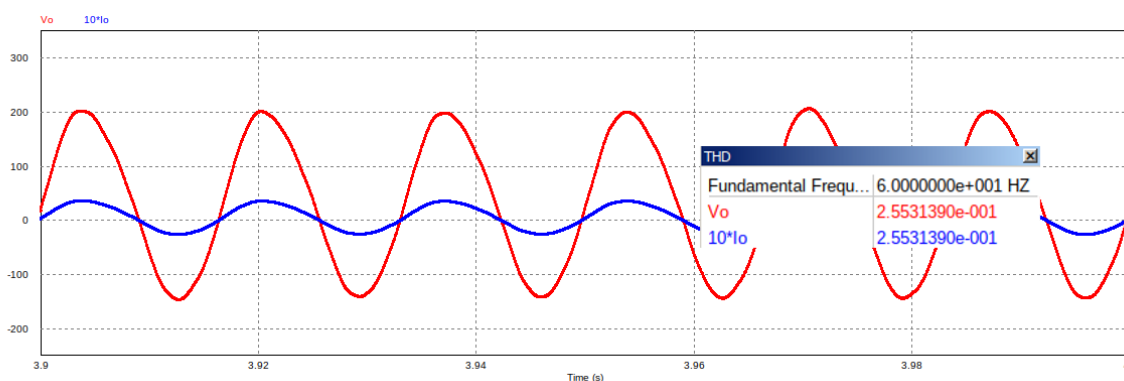


Figura 72 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk integrado bipolar



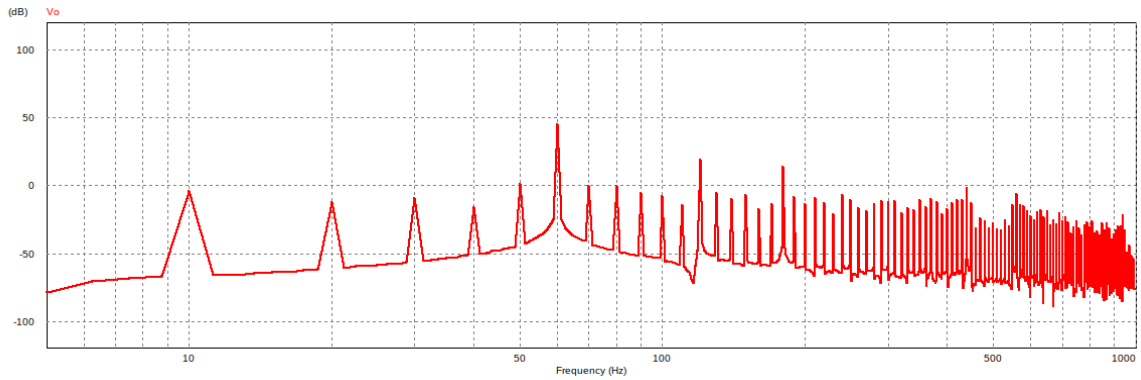


Figura 73 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk integrado bipolar

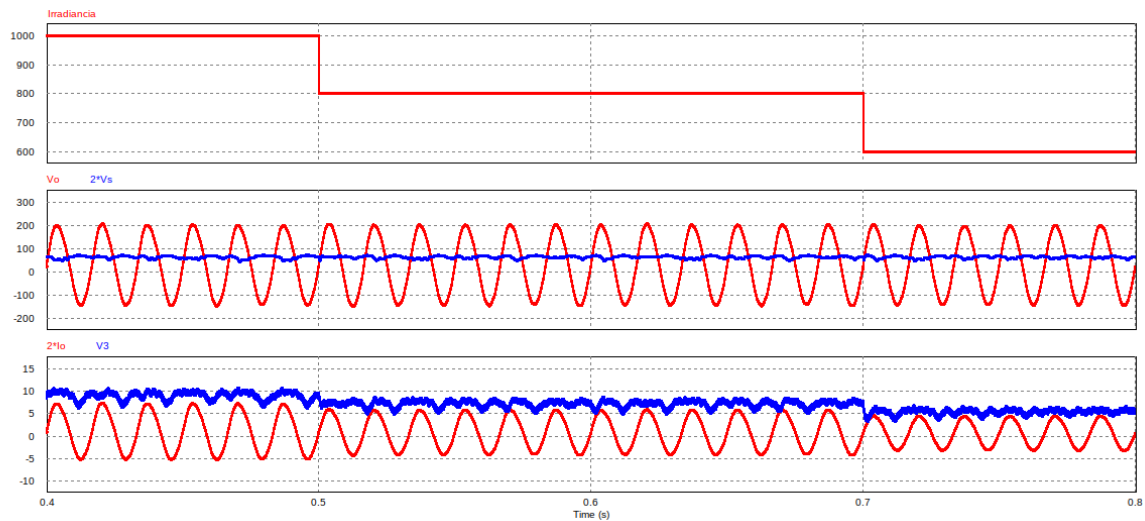


Figura 74 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk integrado bipolar com variação de irradiância

#### 4.0.3.2 Inversor cuk integrado unipolar

O circuito implementado no PSIM para o inversor cuk integrado unipolar é apresentado na figura 75, já a figura 76 mostra os sinais de tensão e corrente de saída, ampliada em dez vezes, além do valor medido para a distorção harmônica total dos mesmos. O espectro de frequências da tensão de saída obtida pode ser analisada na figura 77.

Além disso, a tabela 11 apresenta os principais resultados encontrados através da simulação deste circuito e a figura 78 mostra os sinais de entrada e saída do conjunto para alterações na irradiância que alimenta o painel fotovoltaico.

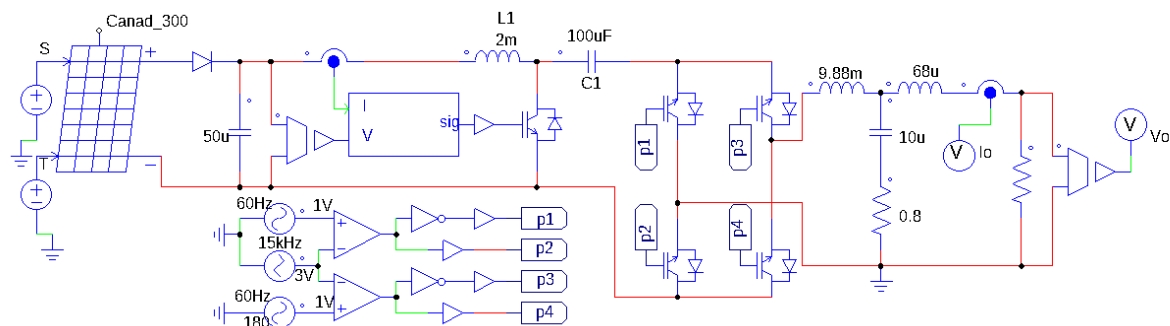


Figura 75 – Circuito implementado para o inversor cuk integrado unipolar

| Corrente de saída eficaz | Corrente de ripple | Tensão de saída eficaz | Tensão de Ripple | Potência de saída | Rendimento | THD   |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|-------|
| 2,27A                    | 2,86mA             | 127,07V                | 0,16V            | 288,33W           | 96,11%     | 3,07% |

Tabela 11 – Valores obtidos para o inversor cuk integrado unipolar

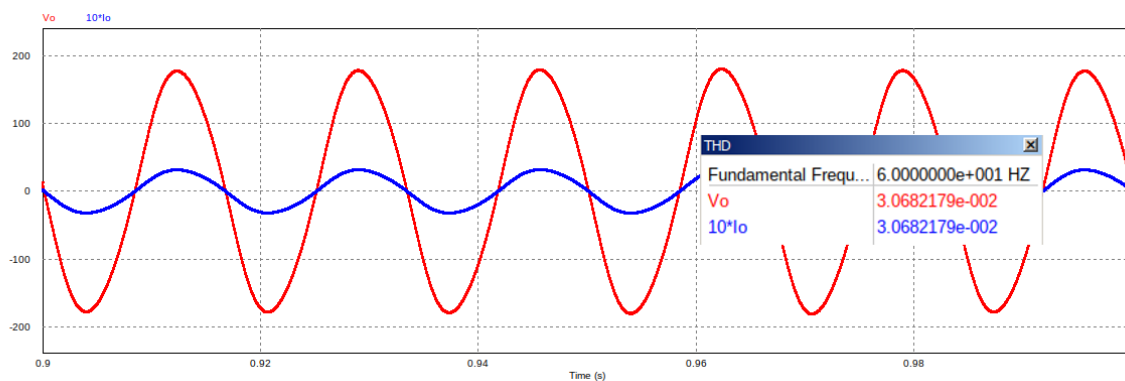


Figura 76 – Sinais de saída obtidos para o inversor cuk integrado unipolar

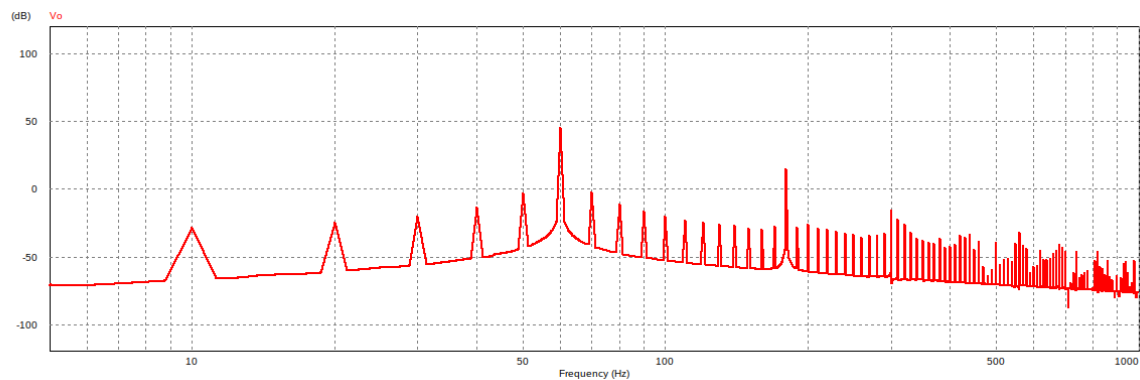


Figura 77 – Espectro de frequências da tensão de saída do inversor cuk integrado unipolar

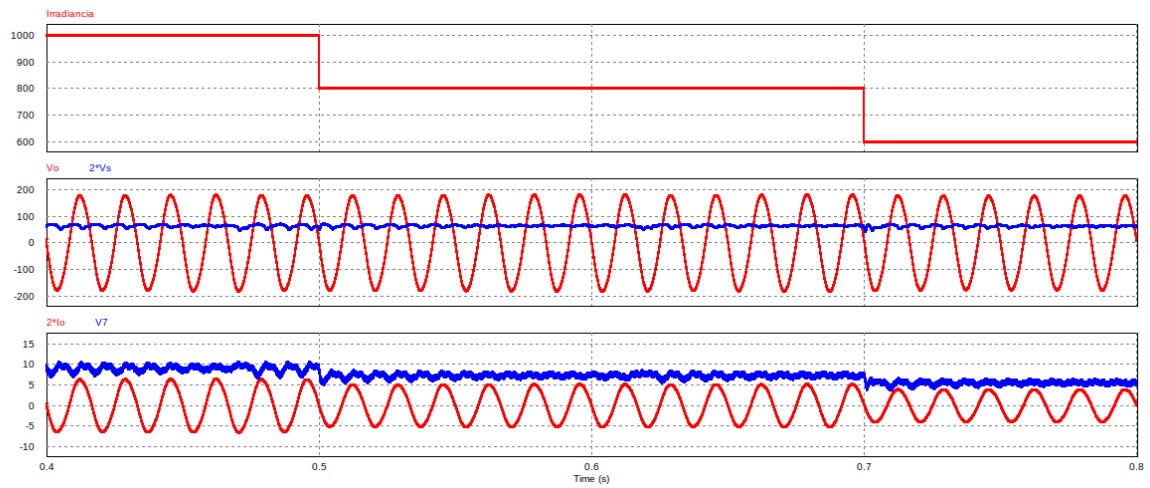


Figura 78 – Sinais de entrada e saída para o inversor cuk integrado unipolar com variação de irradiância

## 5 Análise dos Resultados Obtidos

Ao analisar as figuras 58, 62, 66, 70, 74 e 78 percebe-se que o sistema de rastreamento de ponto de máxima potência apresenta o mesmo comportamento para todos os conjuntos simulados para alterações da irradiância solar, confirmando o comportamento esperado.

Como pode ser visto na figura 18, o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico, para variações da irradiância apresenta aproximadamente a mesma tensão para uma vasta gama de valores, enquanto a corrente máxima gerada é reduzida.

É possível perceber também, uma variação na tensão de saída do painel e, consequentemente também na corrente fornecida, durante todo o período amostrado. Essa oscilação é esperada devido ao algoritmo de rastreamento utilizado, que oscila continuamente em torno do ponto de máxima potência. Esse comportamento propicia, também uma adequação mais rápida a variações de irradiância, uma vez que a varredura ocorre durante todo o funcionamento do sistema, inclusive após o ponto ótimo ter sido encontrado.

Em relação á tensão de saída, enquanto a maior parte das implementações conseguiu fornecer tensão compatível com a conexão à rede elétrica, o inversor integrado bipolar não se comportou como esperado, como pode ser percebido ao se comparar a figura 72 com as demais figuras que representam o sinal de saída dos conjuntos: 56, 60, 64, 68 e 76.

Apesar desse inversor apresentar tensão eficaz igual ao valor esperado, de 127V, a tensão fornecida por este apresenta uma componente contínua de aproximadamente 30V. A ausência de nível 0 no estágio inversor faz com que, a tensão fornecida pelo painel não seja filtrada no conversor e apareça na saída do conjunto. O inversor cuk integrado unipolar não apresenta o mesmo problema devido ao nível adicional apresentado pelo seu estágio inversor.

A tabela 12 apresenta os resultados de rendimento, distorção harmônica total, tensão e corrente de ripple para os seis conjuntos simulados.

Em relação às variações de corrente e tensão, percebe-se que, enquanto os inversores bipolares apresentam valores consideravelmente distintos entre si, os unipolares apresentam valores sempre bem próximos. Esse comportamento indica que o PWM senoidal unipolar utilizado para controlar o estágio inversor dessas implementações é capaz de reduzir a influência do estágio subidor de tensão de tal forma que este possa ser ignorado para essas variáveis. Já entre os inversores bipolares, o inversor integrado apresentou variações menores que os demais o que não era esperado. Entretanto, por apresentar

componente contínua não tensão será desconsiderado.

Ao analisar as variações de tensão e corrente de saída dos inversores cuk convencional bipolar e cuk entrelaçado bipolar pode-se perceber que os valores apresentados pela implementação entrelaçada são aproximadamente metade dos apresentados pela convencional. Esse comportamento está de acordo com o esperado, com as oscilações reduzindo de acordo com o aumento do número de fases do inversor.

|                           |          | Rendimento | Variação da tensão de saída | Variação da corrente de saída | THD    |
|---------------------------|----------|------------|-----------------------------|-------------------------------|--------|
| Inversor cuk convencional | bipolar  | 95,44%     | 1,13V                       | 20,21mA                       | 1,20%  |
|                           | unipolar | 94,98%     | 0,17V                       | 2,99mA                        | 1,18%  |
| Inversor cuk entrelaçado  | bipolar  | 95,91%     | 0,53V                       | 9,47mA                        | 1,02%  |
|                           | unipolar | 95,86%     | 0,16V                       | 2,98mA                        | 1,01%  |
| Inversor cuk integrado    | bipolar  | 93,96%     | 0,42V                       | 7,57mA                        | 25,53% |
|                           | unipolar | 96,11%     | 0,16V                       | 2,86mA                        | 3,07%  |

Tabela 12 – Resultados de rendimento e qualidade do sinal obtidos para os conjuntos finais

Em relação ao rendimento percebe-se que, em geral, inversores unipolares apresentam rendimento um pouco inferior às mesmas implementações bipolares, ou seja, para se obter sinais de saída menos poluídos o inversor unipolar sacrifica uma pequena parcela da potência gerada, devido a seu terceiro nível, 0, no qual não é transmitida potência para a saída.

A exceção a essa regra é o inversor cuk integrado. Enquanto sua implementação bipolar apresenta o pior rendimento entre os inversores utilizados a implementação unipolar, que resolve o problema de tensão contínua na saída do conjunto apresenta o maior rendimento, de 96,11%, enquanto o segundo maior é o do inversor cuk entrelaçado bipolar, de 95,91%. Enquanto o resultado do inversor integrado pode ser atribuído ao número reduzido de componentes capazes de dissipar energia dessa implementação, o do inverso entrelaçado está relacionado, principalmente ao menor estresse de chaveamento nos transistores do estágio elevador de tensão, devido ao aumento do número de fases responsáveis por lidar com a mesma potência inserida.

Segundo a recomendação IEEE-519, para sistemas com tensão de barramento inferiores a 1kV a distorção harmônica total deve ser inferior a 8% (IEEE..., 2014). Dos inversores implementados, apenas o inversor integrado unipolar não respeita esse limite.

Percebe-se, entre as implementações restantes que os inversores que utilizam o controle unipolar apresentam distorção harmônica total um pouco inferior aos que utilizam o controle bipolar, devido à maior atenuação dos harmônicos presentes.

Por fim, apesar de apresentar variações de tensão e corrente de saída próximas aos valores das demais implementações unipolares, o inversor cuk integrado unipolar apresenta distorção harmônica total praticamente três vezes maior que os demais. Esse valor se ocorre, principalmente por uma maior presença do harmônico de terceira ordem devido

à menor atenuação dos harmônicos nesse circuito. Essa menor atenuação, por sua vez é devida à simplicidade do circuito, que não apresenta um filtro entre os estágios elevador de tensão e inversor.

## 6 Conclusão

O desenvolvimento de um sistema para fontes fotovoltaicas conectadas a rede elétrica com microinversores baseados no conversor cuk foi, em geral, bem sucedido. O sistema de rastreamento de ponto máximo de potência implementado agiu da forma esperada em conjunto com os inversores, de modo a manter a tensão estável e o painel fotovoltaico fornecendo a máxima potência para valores variáveis da irradiância solar.

Com exceção do inversor cuk integrado bipolar, as demais implementações foram capazes de fornecer tensão senoidal com amplitude e frequência compatíveis com a rede elétrica e com distorção harmônica máxima abaixo do limite recomendado pela IEEE-519.

Assim como esperado, os inversores unipolares apresentaram melhores resultados em relação à qualidade dos sinais de saída, em detrimento da potência disponibilizada. Além disso, os inversores entrelaçados, mais complexos que os convencionais apresentaram melhores resultados tanto em relação ao rendimento quanto em relação à qualidade do sinal entregue.

Apesar de mais simples, o inversor integrado apresentou melhor rendimento entre os analisados, sendo um forte candidato para a implementação de microinversores comerciais, já que sua implementação apresenta um custo inferior. Entretanto, esse inversor deve necessariamente apresentar estágio inversor unipolar que apresente um nível de tensão nulo, além dos demais.

Para um sistema em que o foco seja, além do rendimento, a menor distorção harmônica possível, pode ser utilizado o inversor cuk entrelaçado de duas fases unipolar, que apresenta rendimento próximo ao do inversor cuk integrado unipolar, mas com distorção harmônica equivalente a um terço à deste último. Essa implementação é, porém mais complexa e cara, devido ao maior número de componentes necessários.

Um sistema composto por inversores integrados unipolares, apesar de ainda apresentarem um controle mais complexo na etapa inversora, representam uma implementação mais barata e menor, além de um ótimo rendimento e se adequar à recomendação técnica de qualidade relativa à distorção harmônica.

Dessa forma, a implementação de um sistema para conexão de fontes fotovoltaicas a rede baseado em microinversores de baixa potência é uma alternativa possível e viável ao atual modelo de inversores de alta potência.

# Referências

Ackermann, G. A. T.; Söder, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, n. 3, p. 195 – 204, 2001. ISSN 0378-7796. Citado na página 9.

ANEEL. *Geração Distribuída*. 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Citado na página 9.

Beriber, D.; Talha, A. Mppt techniques for pv systems. In: *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1437–1442. ISSN 2155-5532. Citado 4 vezes nas páginas 3, 22, 23 e 24.

Bouzguenda, M. et al. Solar photovoltaic inverter requirements for smart grid applications. In: *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5. Citado na página 10.

Canadian Solar. *PV Module Product Datasheet V5.571 EN*. 2018. Disponível em: <<https://www.canadiansolar.com/upload/37080f6dcf409df2/6eb95e52d0590f66.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 3, 6, 26 e 27.

Czarkowski, D. Cuk converter. In: \_\_\_\_\_. *Power Electronics Handbook*. [S.l.]: Academic Press, 2001. cap. 13, p. 218. Citado 3 vezes nas páginas 3, 13 e 14.

de Oliveira, F. M. et al. Grid-tied photovoltaic system based on pso mppt technique with active power line conditioning. *IET Power Electronics*, v. 9, n. 6, p. 1180–1191, 2016. ISSN 1755-4535. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 12.

Espinoza, J. R. Full-bridge vsi. In: \_\_\_\_\_. *Power Electronics Handbook*. [S.l.]: Academic Press, 2001. cap. 14, p. 231–232. Citado 4 vezes nas páginas 3, 18, 19 e 20.

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, p. 1–29, June 2014. Citado na página 59.

Jayakumaran, T. et al. A comprehensive review on maximum power point tracking algorithms for photovoltaic cells. In: *2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 343–349. ISSN 2576-9065. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

Joseph, K. D.; Daniel, A. E.; Unnikrishnan, A. Reduced ripple interleaved cuk converter with phase shifted pwm. In: *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado 6 vezes nas páginas 3, 14, 15, 16, 34 e 35.

Joseph, K. D.; Daniel, A. E.; Unnikrishnan, A. Interleaved cuk converter with reduced switch current. In: *2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 14.

Junior, L. G. et al. Evaluation of integrated inverter topologies for low power pv systems. In: *2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 35–39. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.



- K.D, J.; Daniel, A. E.; Unnikrishnan, A. Interleaved cuk converter with improved transient performance and reduced current ripple. *The Journal of Engineering*, v. 2017, n. 7, p. 362–369, 2017. ISSN 2051-3305. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 34.
- Luigi, G. et al. Integrated inverter topologies for low power photovoltaic systems. In: *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado 4 vezes nas páginas 3, 10, 20 e 21.
- Machado, M. M.; de Sousa, M. C. S.; Hewings, G. Economies of scale and technological progress in electric power production: The case of Brazilian utilities. *Energy Economics*, v. 59, n. C, p. 290–299, 2016. Citado na página 9.
- Mahamat, C. et al. Optimized design of an lcl filter for grid connected photovoltaic system and analysis of the impact of neighbors' consumption on the system. *Journal of Electrical Systems*, v. 13, p. 618–632, 12 2017. Citado 3 vezes nas páginas 3, 24 e 25.
- Nezamuddin, O.; Crespo, J.; dos Santos, E. C. Design of a highly efficient microinverter. In: *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 3463–3468. Citado na página 10.
- POWERSIM. *PSIM Tutorial - How to Use Solar Module Physical Model*. 20–? Disponível em: <<https://powersimtech.com/drive/uploads/2016/04/Tutorial-Solar-Module-physical-model.pdf>>. Citado na página 27.
- Reznik, A. et al. LCL filter design and performance analysis for grid-interconnected systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 50, p. 1225–1232, 03 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- Shawky, A.; Ahmed, M. E.; Orabi, M. Performance analysis of isolated dc-dc converters utilized in three-phase differential inverter. In: *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 821–826. Citado na página 11.



# Anexos

# ANEXO A – Código da implementação de MPPT utilizado

```
double temp = 1;
double old_v, old_p, old_out;

double v = in[0];
double i = in[1];

double p = v*i;

double delta_p = p-old_p;
double delta_v = v-old_v;

if(delta_p > 0){
    if(delta_v > 0){
        temp -= 0.01;
    } else if (delta_v < 0){
        temp += 0.01;
    }
} else if (delta_p < 0){
    if(delta_v > 0){
        temp += 0.01;
    } else if (delta_v < 0){
        temp -= 0.01;
    }
} else {
    temp = temp;
}

if(temp > 0.95) temp = 0.95;
if(temp < 0.05) temp = 0.05;

out[0] = temp;
old_v = v;
old_p = p;
```

## ANEXO B – Circuitos dos Inversores Implementados no PSIM

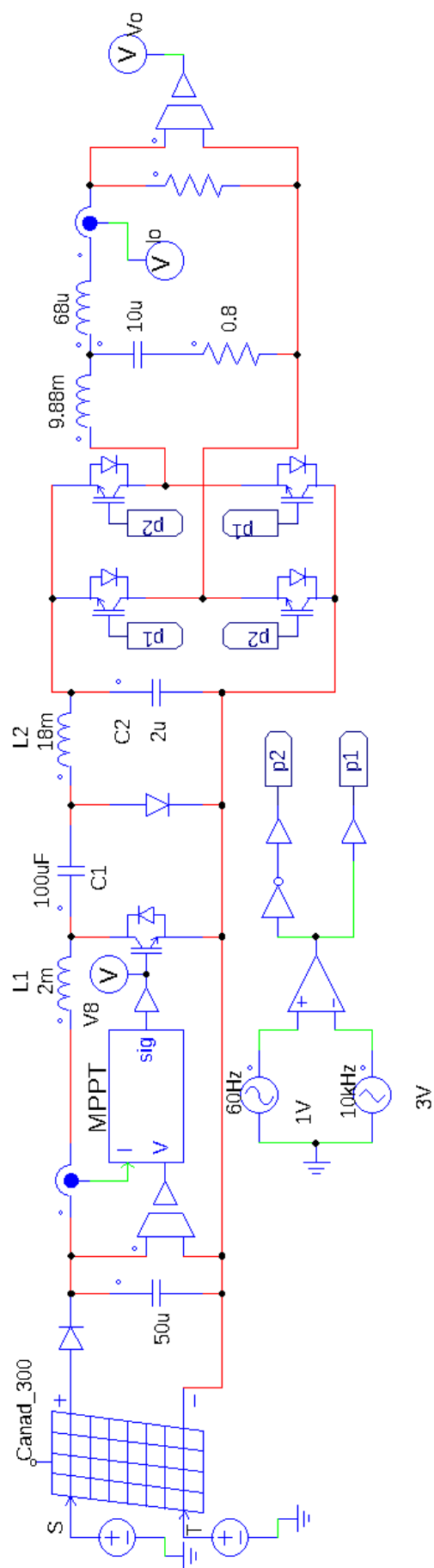


Figura 79 – Circuito do inversor cuk convencional bipolar implementado

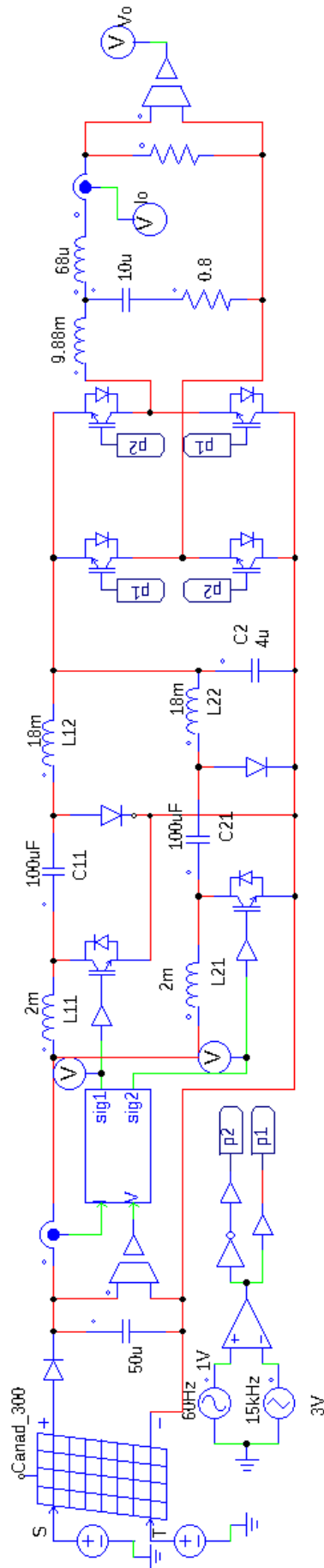


Figura 80 – Circuito do inversor cuk entrelaçado bipolar implementado



Figura 81 – Circuito do inversor cuk integrado bipolar implementado



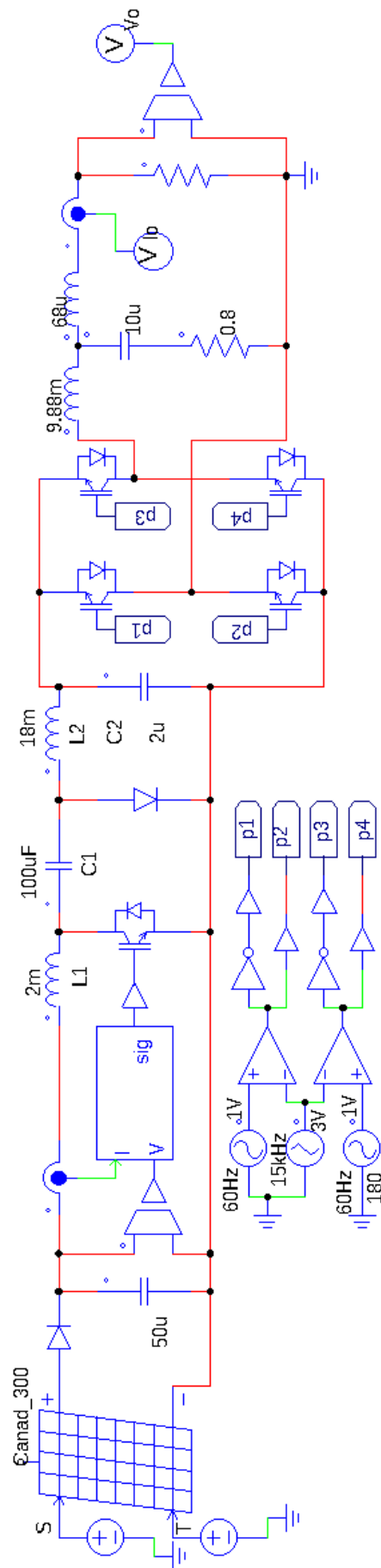


Figura 82 – Circuito do inversor cuk convencional unipolar implementado

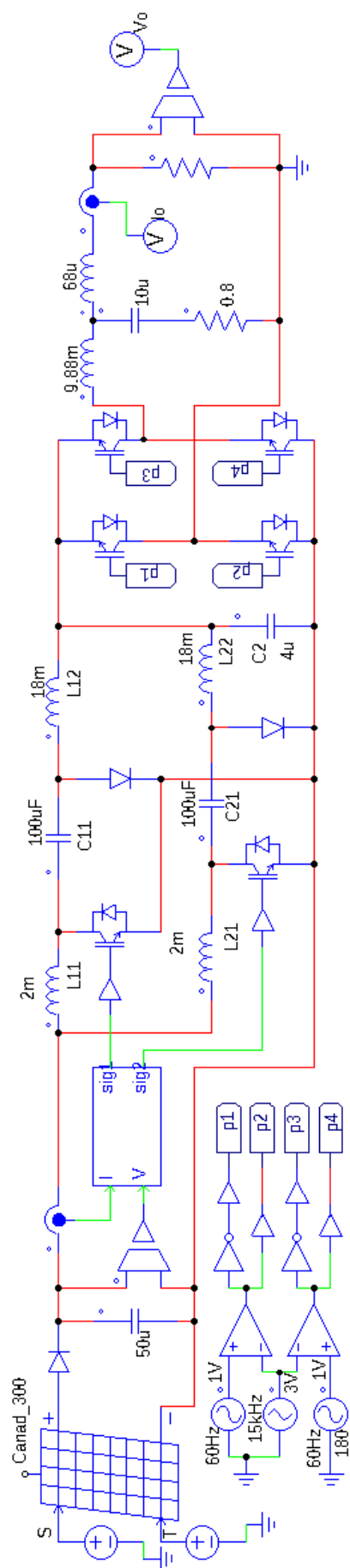


Figura 83 – Circuito do inversor cuk entrelaçado unipolar implementado

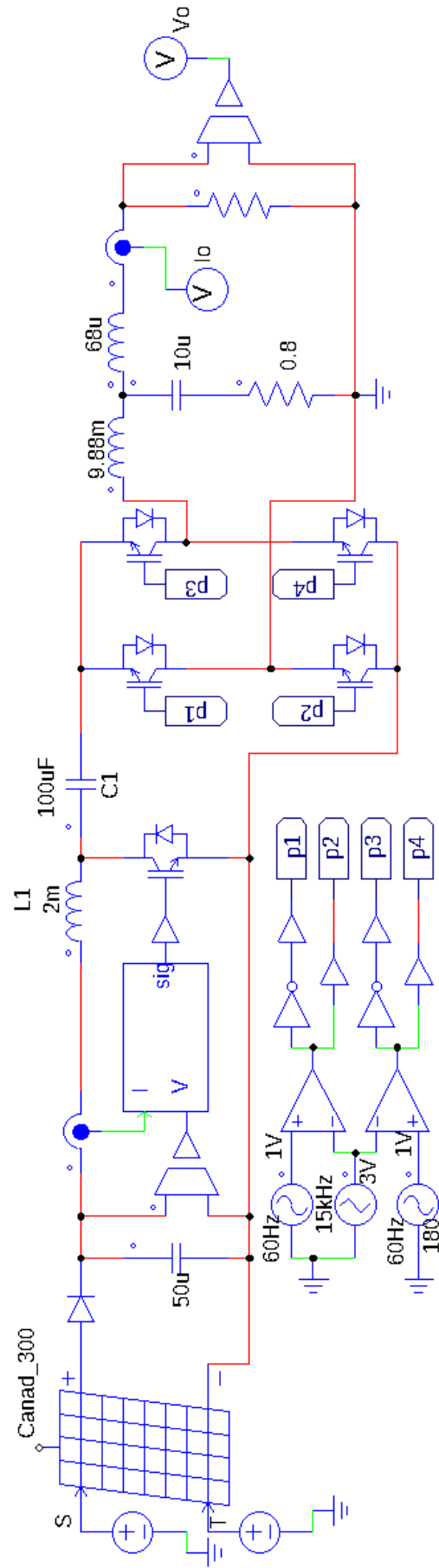


Figura 84 – Circuito do inversor cuk integrado unipolar implementado