

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ALAN ALVES FERRIOLI

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE CONVERSOR FLYBACK COM PROCESSAMENTO
PARCIAL DE ENERGIA APLICADO AO RASTREAMENTO DE MÁXIMA
POTÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**Alegrete
2015**

ALAN ALVES FERRIOLI

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE CONVERSOR FLYBACK COM PROCESSAMENTO
PARCIAL DE ENERGIA APLICADO AO RASTREAMENTO DE MÁXIMA
POTÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

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

Orientador: Prof. Guilherme Sebastião da Silva, Me.

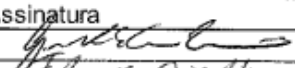
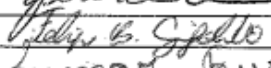
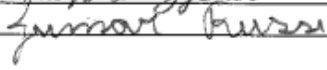
**Alegrete
2015**

Autoria: Alan Alves Ferrioli

Título: ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE CONVERSOR FLYBACK COM PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA APLICADO AO RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

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

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

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

Data da aprovação: 7 de Dezembro de 2015.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado saúde e perseverança para que pudesse realizar esse trabalho.

A minha mãe Rosangela Alves, por ter dado suporte para que pudesse me dedicar aos estudos e por acreditar em meu potencial

Aos meus avós Elcy O. Alves e Maria Elena da Rosa Alves, pelo exemplo de vida e ensinamentos passados.

Aos meus irmãos, Andrelize, Maria Vitória e João Vitor, pelo convívio, amizade e companheirismo.

A minha namorada Priscila M. de Souza, pelo amor, carinho, dedicação, atenção, incentivo e por compreender os momentos de ausência.

Aos meus familiares, por estarem sempre comigo em todos os momentos.

Ao professor Guilherme S. da Silva, com quem aprendi muito, pelos conselhos, todo apoio e competência em minha orientação.

E aos meus amigos, que de uma forma ou de outra me ajudaram a superar etapas difíceis durante minha graduação, principalmente os que moraram junto comigo durante todos esses anos, deixo meus sinceros agradecimentos.

Estendo meus agradecimentos ainda, para todos aqueles que possam ter colaborado para a realização desse trabalho mesmo que de forma indireta.

“Um homem é julgado não a partir de onde se posiciona nos momentos de conforto e conveniência, mas onde se posiciona nos momentos de desafio e controvérsia”.

(Martin Luther King Jr.)

"Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais seguro para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais."

(Thomas Edson)

RESUMO

Nesse trabalho será analisado um conversor flyback com processamento parcial de energia aplicado a um sistema fotovoltaico, utilizado também para o rastreamento do ponto máxima potência. O método de processamento parcial juntamente com o rastreamento de máxima potência proporciona um aumento significativo no rendimento do sistema. Essa forma de processamento se destaca por sua simplicidade de projeto, alta eficiência energética e baixo custo. Sua alta eficiência é conseguida por possuir a saída do módulo diretamente ligado á saída do conversor fazendo assim com que apenas uma parte da energia seja processada pelo conversor.

Palavras-chave: conversor CC/CC, ponto de máxima potência, processamento parcial de energia.

ABSTRACT

This work will be reviewed flyback converter with partial power processing applied to a photovoltaic system, also used for tracking the maximum power point. The partial processing method with the tracking maximum power provides a significant increase in system performance. This form of processing stands out for its simplicity of design, high energy efficiency and low cost. Its high efficiency is achieved by having the output of the directly connected module will converter output thereby causing only part of the energy to be processed by the converter.

Keywords: converter DC/DC, maximum power point, partial power processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: (a) Processamento parcial (b) Processamento integral.....	15
Figura 2.1: Estrutura simplificada de uma célula fotovoltaica.....	18
Figura 2.2: Circuito Equivalente de uma célula fotovoltaica.	19
Figura 2.3: Associação de células série.	20
Figura 2.4: Associação de células em paralelo.	21
Figura 2.5: Associação de células mista.	21
Figura 2.6: Curva de tensão versus corrente e a curva de potência versus tensão do gerador fotovoltaico KD245GH-4FB.....	23
Figura 2.7: Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.	24
Figura 2.8: Curva I-V e P-V do arranjo obtidas por simulação.	26
Figura 2.9: Fluxo de potência através de um sistema de processamento parcial.	27
Figura 2.10: Módulo ligado à carga utilizando conversor CC/CC.	29
Figura 2.11: Curva de carga referente à resistência equivalente de entrada em função da razão cíclica e resistência de carga.....	29
Figura 2.12: Fluxograma do algoritmo da técnica P&O clássica.	31
Figura 3.1: Conversor com processamento parcial de energia.	33
Figura 3.2: Obtenção do conversor Flyback.....	35
Figura 3.3: Conversor Flyback considerando indutância de magnetização.	36
Figura 3.4: Primeira etapa de funcionamento do conversor Flyback.....	36
Figura 3.5: Segunda etapa de funcionamento do conversor Flyback.....	38
Figura 3.6: Principais formas de onda do conversor flyback operando em MCC.....	40
Figura 3.7: Conversor Flyback com Processamento parcial.	42
Figura 3.8: Primeira etapa de funcionamento do conversor Flyback com Processamento parcial.	43
Figura 3.9: Segunda etapa de funcionamento do conversor Flyback com Processamento parcial.	44
Figura 3.10: Principais formas de onda do conversor flyback com processamento parcial de energia operando em MCC.....	45
Figura 3.11: Conversor com processamento parcial proposto para simulação sem análise de perda.....	47
Figura 3.12: Tensão na chave S do circuito.	48
Figura 3.13: Tensão no diodo D.	48

Figura 3.14: Tensão na indutância na magnetização.....	49
Figura 3.15: Corrente na indutância de magnetização.....	50
Figura 3.16: Tensão no capacitor.....	50
Figura 3.17: Tensão de saída do conversor.....	51
Figura 3.18: Corrente de saída do conversor.....	51
Figura 4.1: Diagrama de simulação do conversor flyback.....	55
Figura 4.2: Diagrama de simulação do conversor flyback com PPE.....	55
Figura 4.3: Diagrama de simulação do conversor flyback contemplando perdas nos semicondutores.....	57
Figura 4.4: Diagrama de simulação do conversor flyback com processamento parcial de energia contemplando perdas nos semicondutores.....	58
Figura 4.5: Comparação das potências dissipadas pelos semicondutores.....	59
Figura 4.6: Curva de rendimento para determinados níveis de potências.....	60
Figura 4.7: Degrau na radiação solar.....	63
Figura 4.8: Diagrama de simulação do conversor flyback com processamento parcial aplicado ao MPPT.....	63
Figura 4.9: Formas de onda de tensão, corrente e potências obtidas pela simulação do conversor flyback com PPE atuando como rastreador de máxima potência.....	64
Figura 4.10: Diagrama de simulação do conversor flyback aplicado ao MPPT.....	65
Figura 4.11: Formas de onda de tensão, corrente e potências obtidas pela simulação do conversor flyback atuando como rastreador de máxima potência.....	65
Figura 4.12: Diagrama de simulação do conversor flyback com PPE considerando perdas e atuando como MPPT.....	67
Figura 4.13: Curvas de potência do painel fotovoltaico, utilizando um conversor flyback com PPE como MPPT.....	68
Figura 4.14: Diagrama de simulação do conversor flyback considerando perdas e atuando como MPPT.....	68
Figura 4.15: Curvas de potência do painel fotovoltaico, utilizando um conversor flyback como MPPT.....	69
Figura 4.16: Potências dissipadas pelos semicondutores com irradiação de 1000 W/m ²	70
Figura 4.17: Potências dissipadas pelos semicondutores com irradiação de 200 W/m ²	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros obtidos por conexão de células.....	22
Tabela 2.2: Características do módulo KD245GH-4FB.....	22
Tabela 2.3: Características do arranjo constituído por módulos KD245GH-4FB.....	26
Tabela 3.1: Características de projeto conversor flyback PPE em MCC.....	46
Tabela 4.1: Características de projeto dos conversores.	54
Tabela 4.2: Esforço nas chaves semicondutoras.....	56
Tabela 4.3: Potências e perdas referentes ao conversor flyback.....	58
Tabela 4.4: Potências e perdas referentes ao conversor flyback com processamento parcial de energia.....	59
Tabela 4.5: Especificações de projeto dos conversores aplicados ao MPPT.	61
Tabela 4.6: Esforço nas chaves semicondutoras utilizadas no conversor aplicado como MPPT (1000 W/m ²).....	67
Tabela 4.7: Eficiência global dos conversores aplicados ao MPPT.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente alternada.
CC	Corrente contínua.
MPPT	Rastreamento de máxima potência.
MCC	Modo de condução contínua.
MDC	Modo de condução descontínua.
PMP	Ponto de Máxima Potência.
P&O	Perturba e Observa.
PV	Fotovoltaica (do inglês, photovoltaic).
STC	Condições Padrões de Teste.
PPE	Processamento Parcial de Energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativas.....	16
1.2 Objetivos Gerais	16
1.3 Objetivos Específicos.....	16
1.4 Estrutura do Trabalho	17
2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	18
2.1 Introdução.....	18
2.2 Célula fotovoltaica	18
2.3 Módulos fotovoltaicos	20
2.4 Arranjos Fotovoltaicos	23
2.5 Processamento Parcial de Energia.....	27
2.6 Perdas nos Semicondutores de Potência	28
2.7 Rastreamento de Máxima Potência.....	28
2.7.1 Método Perturbe e Observe	30
2.8 Conclusão.....	31
3 CONVERSOR FLYBACK COM PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA... 33	
3.1 Introdução.....	33
3.2 Análises do rendimento do sistema	33
3.3 Conversor Flyback.....	35
3.3.1 Análise no Modo de Condução Contínua.....	36
3.4 Conversor Flyback com Processamento Parcial de Energia	41
3.4.1 Análise no Modo de Condução Contínua.....	42
3.5 Conclusão.....	52
4 CONVERSOR FLYBACK COM PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA APLICADO À SISTEMAS FOTOLTAICOS	53
4.1 Introdução.....	53
4.2 Análises com perdas nos semicondutores.....	53
4.3 Rastreamento de Máxima Potência.....	60
4.3.1 Estudo do rendimento global do sistema	66
4.4 Conclusão.....	71
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é utilizado como fonte de energia em diversos tipos de sistemas de geração de energia elétrica e também o principal combustível dos motores usados nos sistemas de transportes, além disso, possui diversas finalidades indispensáveis para a civilização atual. Desse modo, considerando a dependência das sociedades modernas industrializadas deste tipo de combustível, pode-se afirmar que, o uso racional do petróleo e seus derivados são fundamentais para garantir a sobrevivência das mesmas. Esse fato gera preocupação, pois ao se considerar o consumo e as reservas ainda existentes, tem-se que os níveis das reservas de petróleo deverão atingir uma situação crítica nos próximos 40 ou 50 anos [5].

Tendo isso em vista, esse panorama se faz favorável ao desenvolvimento de tecnologias para o melhor aproveitamento de fontes de energias renováveis como estratégia para redução do consumo e da atual dependência dos combustíveis fósseis.

A energia solar fotovoltaica é uma das mais importantes fontes de energias renováveis e apresenta grande potencial. A geração fotovoltaica de energia elétrica vem sendo amplamente discutida no meio científico, o que faz com que vários trabalhos sejam desenvolvidos nessa área, fazendo com que se tenha embasamento para projetos cada vez mais complexos. O crescimento exponencial da tecnologia fotovoltaica pode ser atribuído a alguns aspectos distintos: o primeiro refere-se à melhora significativa dos materiais empregados na fabricação de células fotovoltaicas, o segundo aspecto impulsionador da tecnologia refere-se à busca incessante por fontes renováveis de energia que se adequem às legislações ambientais vigentes [2].

Assim, a geração de energia fotovoltaica impôs novos desafios à sua tecnologia de conversão de energia elétrica. Além do desenvolvimento de painéis mais eficientes a um custo menor, um sistema fotovoltaico de energia para ser difundido depende também do desenvolvimento de equipamentos complementares que tornem os sistemas mais versáteis, ou seja, adaptando-os as mais diversas aplicações e os tornando mais eficientes, aproveitando melhor a energia gerada pelos painéis [4].

A geração fotovoltaica também deve seu progresso à evolução paralela da eletrônica de potência que é a ferramenta utilizada para embasar o estudo dos conversores estáticos empregados nos sistemas fotovoltaicos.

Os conversores são responsáveis pelo processamento da energia proveniente dos painéis, tornando-a assim adequada para alimentar uma carga específica. O conversor é determinado conforme a carga a ser alimentada. Para carga em corrente alternada são utilizados conversores CC/CA e nos casos de carga em corrente contínua os conversores CC/CC. Eles são utilizados entre o módulo e a carga; isso ocorre não apenas para alimentar a carga de maneira adequada, mas também para possibilitar que o módulo atue no ponto de máxima potência, a fim de garantir elevada eficiência no processo de conversão da energia solar em eletricidade.

A proposta do processamento parcial é projetar um conversor eletrônico CC/CC que tem como vantagens a simplicidade, alta eficiência e baixo custo. Sua alta eficiência é conseguida pelo fato de uma porção da energia da entrada do painel ser entregue diretamente a carga do conversor CC/CC. Isso se deve ao fato da tensão na saída do sistema ser a soma da tensão de entrada com a tensão sobre a saída do conversor estático, como pode ser observado na Figura 1.1, que faz uma comparação com um sistema de processamento integral.

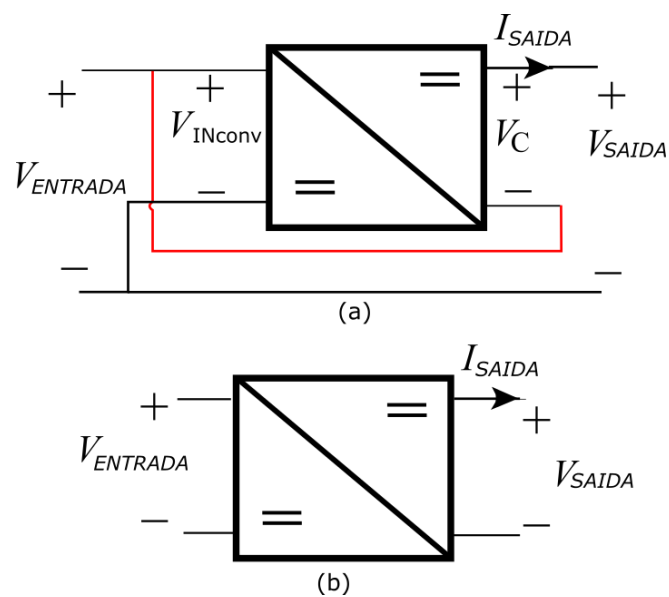


Figura 1.1: (a) Processamento parcial (b) Processamento integral.

Observando a Figura 1.1 pode-se verificar que no método de processamento parcial a tensão de entrada fica em série com a de saída.

1.1 Justificativas

O interesse pelas fontes renováveis na produção de energia elétrica tem sido impulsionado pela crescente demanda energética e pelo esgotamento dos combustíveis fósseis.

Nesse cenário a energia fotovoltaica tem ganhado destaque, por apresentar certas vantagens como; possuir o mínimo de impacto ambiental, ocasionar uma redução na tarifa pelo fato da fonte geradora ser livre, longo tempo de vida útil do material aproximadamente 30 anos e, além disso, possui operação silenciosa [6].

Mesmo com tantos fatores a seu favor a energia fotovoltaica também deve seu progresso, ao desenvolvimento da eletrônica de potência.

A eletrônica de potência é utilizada nesse sistema para processar os níveis de tensão e corrente de entrada, adequando-os para alimentar a carga. O conversor também é utilizado para o rastreamento do ponto de máxima transferência de potência.

O objetivo principal deste trabalho é a análise e simulação de um conversor CC/CC para ser utilizado no processamento da energia proveniente do painel e também utilizá-lo como circuito rastreador de máxima potência, e assim aumentar a eficiência do sistema. Resultados experimentais mostram que essa metodologia de processamento possui uma eficiência ponderada de 98,22% [1].

1.2 Objetivos Gerais

Os objetivos gerais deste trabalho de conclusão de curso visam possibilitar:

- i) Modelagem de um conversor flyback com processamento parcial energia atuando com rastreador de máxima potência em um sistema fotovoltaico.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho abrangem:

- i) Comparação de perdas do processamento parcial de energia e processamento integral;

- ii) Verificar a desempenho do rastreamento de máxima potência do módulo utilizando o conversor com processamento;
- iii) Obtenção da eficiência dos modelos de processamentos utilizados.

1.4 Estrutura do Trabalho

O texto deste trabalho está disposto em cinco capítulos, incluindo introdução e conclusões.

No capítulo 2 são descritas as partes que formam um sistema de geração fotovoltaica, sendo apresentado o conceito e modelo de um célula solar fotovoltaica, associação de células, a distinção entre célula, módulo e arranjo, perdas nos semicondutores de potência, conceito sobre o processamento de energia e técnicas de rastreamento de máxima potência.

No capítulo 3, é introduzida uma proposta sobre o rendimento do sistema. Também é definida uma modelagem do conversor flyback com Processamento Parcial de Energia (PPE) e são apresentadas todas as curvas referentes aos parâmetros do circuito e algumas simulações que serve para validar o modelo matemático presente nesse.

No capítulo 4, é abordada uma análise de perdas nos semicondutores de potência do conversor, assim pode-se obter o rendimento do mesmo. Logo se aplicou o rastreamento de máxima potência ao painel, com princípio de obter a eficiência referente a ele. Em seguida, se estudou o rastreamento de máxima potência considerando as perdas no diodo e no MOSFET.

Por fim, no capítulo 5, São apresentadas as considerações finais da monografia. Comentando os resultados obtidos através da simulação computacional do conversor flyback com processamento parcial de energia.

2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1 Introdução

A utilização da energia gerada por um módulo fotovoltaico depende de um conversor estático. Esse geralmente possui a função de condicionar a energia gerada nos painéis para conexão com a rede ou a uma carga específica e também extrair o máximo de potência dos painéis sujeitos às condições adversas. Este conjunto é nomeado sistema fotovoltaico.

Neste capítulo serão apresentadas noções indispensáveis para a compreensão do desenvolvimento do trabalho, abordando o conceito e modelagem de uma célula fotovoltaica, associação de células, distinção entre módulo e arranjo, diferentes topologias de sistemas e técnicas de rastreamento de máxima potência.

2.2 Célula fotovoltaica

A célula solar fotovoltaica é um dispositivo capaz de através da luz solar gerar energia elétrica. Tradicionalmente uma célula fotovoltaica mede entre 210 cm^2 e 220 cm^2 , tendo sua capacidade de geração em aproximadamente $0,6\text{ V}$ de tensão para uma potência aproximada de 1 W ou 3 W [3].

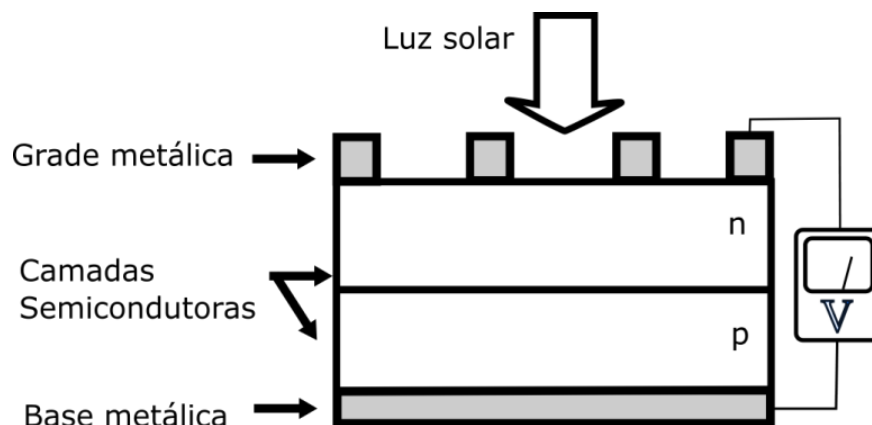


Figura 2.1: Estrutura simplificada de uma célula fotovoltaica.

Conforme apresentado na Figura 2.1 as camadas do tipo n e p representam materiais semicondutores conectados a um barramento metálico para conexão das cargas e circulação da corrente elétrica. A célula é resumidamente um diodo

semicondutor onde a junção p-n é exposta à luz solar [3]. Na Figura 2.2 pode ser visto o circuito simplificado de uma célula fotovoltaica.

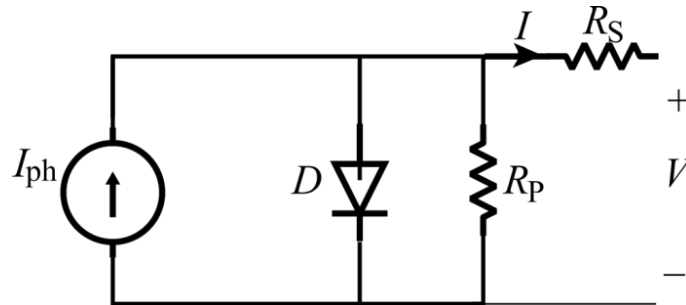


Figura 2.2: Circuito Equivalente de uma célula fotovoltaica.

O equacionamento do modelo apresentado na Figura 2.2 resulta na relação tensão e corrente características de uma célula solar [8].

$$I = I_{ph} - I_r \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot \frac{T}{q}}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Onde:

I - Corrente de terminal da célula fotovoltaica.

V - Tensão de terminal de uma célula fotovoltaica.

I_{ph} - Corrente fotogerada.

I_r - Corrente de saturação reversa da célula.

R_s - Resistência série da célula.

R_p - Resistência paralela da célula.

q - Carga do elétron.

n - Fator de qualidade da junção.

k - Constante de Boltzmann.

T - Temperatura ambiente.

A corrente de saturação reversa da célula e a corrente fotogerada são dependentes da temperatura [2]. Seu comportamento é descrito pelas seguintes equações.

$$I_{ph}(T, G) = [I_{ph,0} + K_I \cdot (T - T_0) \frac{G_0}{G}] \quad (2.2)$$

$$I_r = I_{r,0} + K_I \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \cdot e^{[q \cdot \frac{E_g}{n \cdot k} \cdot (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})]} \quad (2.3)$$

Onde:

K_I – Constante corrente temperatura.

$I_{ph,0}$ – Corrente saturação reversa nominal.

T_0 – Temperatura nominal.

G – Radiação solar.

G_0 – Radiação solar nominal.

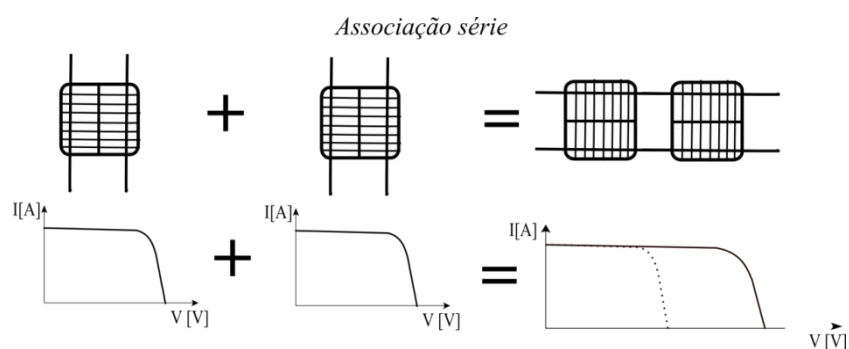
E_g – Gap de energia do dispositivo.

À partir desse modelo matemático torna-se possível a análise do comportamento de módulos e arranjos fotovoltaicos.

2.3 Módulos fotovoltaicos

Para análise de um módulo é possível fazer conexões do circuito equivalente da célula, obtendo assim um novo circuito capaz de representar o módulo. Existem três métodos de conexão para células, sendo eles série, paralelo e mista, todas estas com objetivo de elevar a potência de saída.

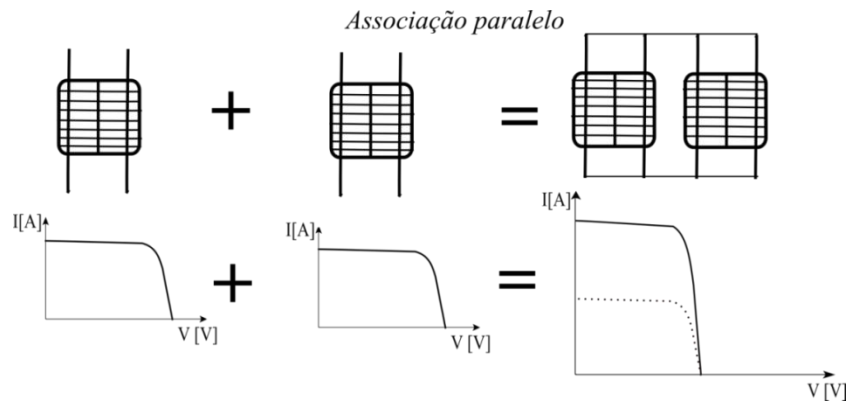
Na associação em série a corrente que circula pelas células é a mesma, sendo assim, resulta na soma das tensões dos terminais da célula, isso pode ser observado na Figura 2.3.



Fonte: [3]

Figura 2.3: Associação de células série.

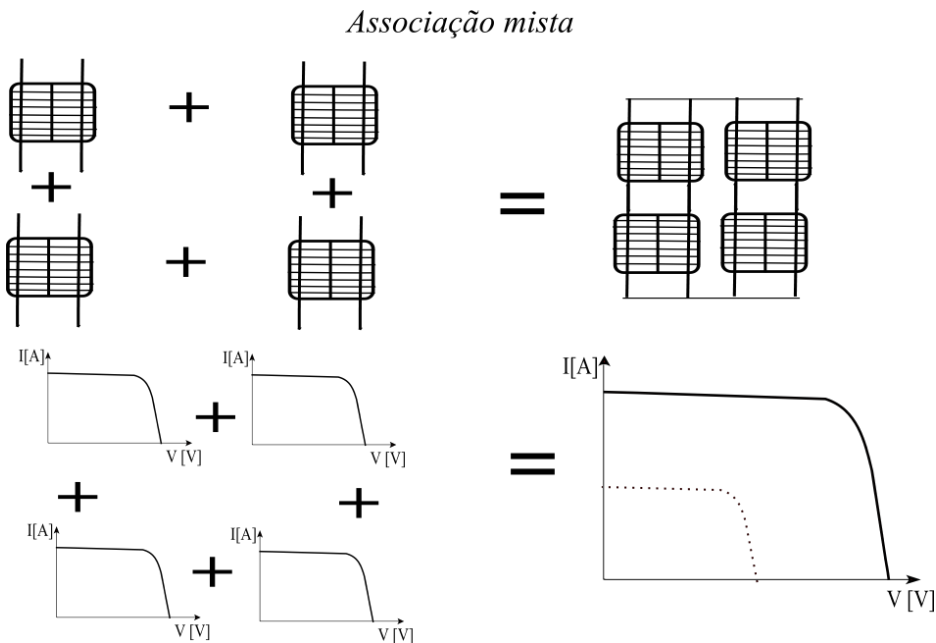
Por outro lado, para análise de uma associação paralela, as células estão sobre a mesma tensão, porém a corrente de cada uma deve ser somada. A Figura 2.4 representa a alteração na curva que essa conexão proporciona.



Fonte: [3]

Figura 2.4: Associação de células em paralelo.

Agregando células de maneira mista é possível elevar tanto a tensão quanto a corrente do módulo. Isso pode ser claramente compreendido na Figura 2.5.



Fonte: [3]

Figura 2.5: Associação de células mista.

Assim é possível fazer as conexões do circuito equivalente da célula, obtendo um novo circuito capaz de representar o módulo. Na Tabela 2.1 é possível perceber a mudança de parâmetros devido às conexões.

Tabela 2.1: Parâmetros obtidos por conexão de células.

Parâmetros	Módulo
Número de Células em paralelo	n_p
Número de células em série	n_s
Resistência série	$R_{s_{módulo}} = (n_s/n_p) \cdot R_s$
Resistência paralela	$R_{p_{módulo}} = (n_s/n_p) \cdot R_p$
Tensão de saída	$V_{módulo} = n_s \cdot V$
Corrente de saída	$I_{módulo} = n_p \cdot V$

Baseando-se nesses conceitos torna-se possível a reprodução do comportamento do módulo solar fotovoltaico KD245GH-4FB da Kyocera, para ser utilizado no trabalho. Na Tabela 2.2 são expostas algumas características elétricas do gerador.

Tabela 2.2: Características do módulo KD245GH-4FB.

Em condições de STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$ e $AM = 1,5$.)		
Grandeza	Representação	Valor
Ponto de máxima potência	P_{mp}	245 W
Tensão de máxima potência	V_{mpp}	29,8 V
Corrente de máxima potência	I_{mpp}	8,23 A
Corrente de curto-circuito	I_{sc}	8,91 A
Tensão de circuito aberto	V_{oc}	36,9 V

A Figura 2.6 demonstra a simulação das curvas de tensão versus corrente e a curva de potência versus tensão do gerador KD245GH-4FB. Os valores contemplam o STC (Standart Test Conditions) com $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$ e $AM = 1,5$.

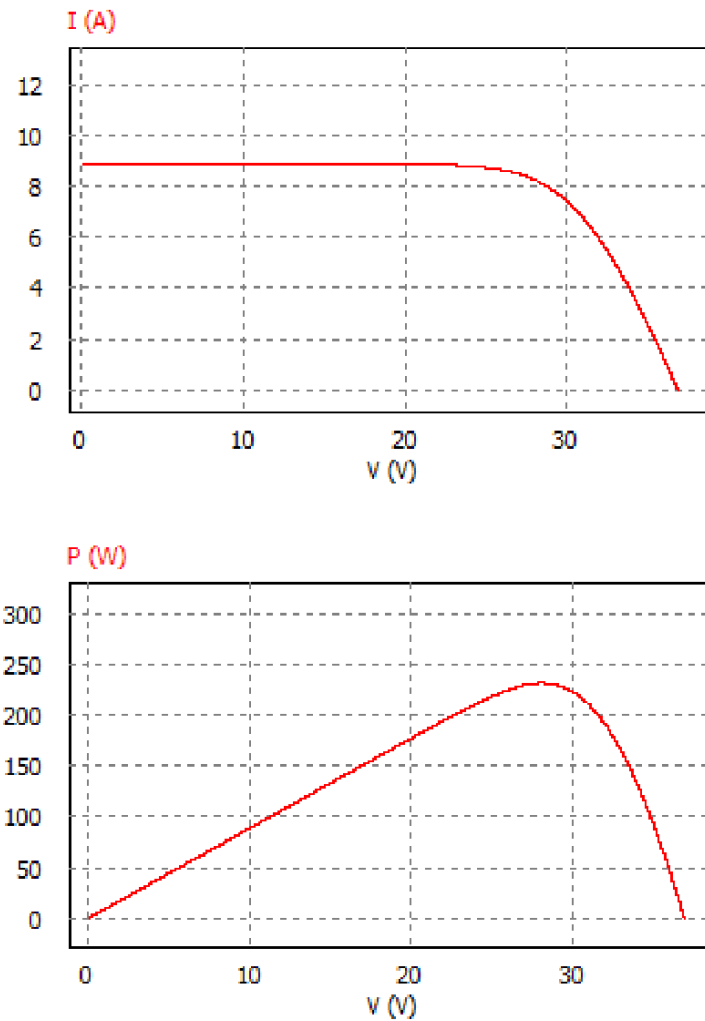


Figura 2.6: Curva de tensão versus corrente e a curva de potência versus tensão do gerador fotovoltaico KD245GH-4FB.

Os módulos são vendidos de forma fechada. Uma vez realizadas as conexões das células fotovoltaicas por parte do fabricante, não existe possibilidade de alteração. O tamanho do módulo é relacionado diretamente com a potência de pico que pode ser gerada [3].

2.4 Arranjos Fotovoltaicos

Os painéis ou arranjos fotovoltaicos são constituídos pela associação série e/ou paralela de vários módulos com o objetivo de obter sistemas com tensões e correntes de saída mais elevadas [6]. Esses geram desde alguns kW até potências mais expressivas, da ordem de MW .

O tipo de ligação entre os módulos irá ditar o nível de tensão, corrente e potência de saída do arranjo. A potência gerada tem proporção direta com a área de exposição à radiação solar [3].

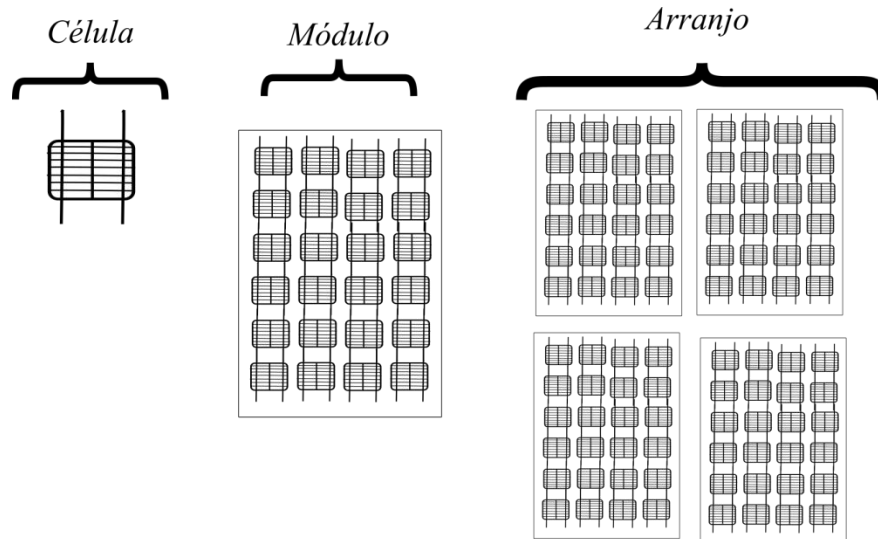


Figura 2.7: Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.

Obedecendo aos conceitos, a associação de módulos também agrega características elétricas aos arranjos. Sendo assim, também pode ser dividida em três tipos, conexão série, paralela e mista.

Na associação em série percebe-se que a corrente que circula pelos módulos é a mesma havendo assim um ganho de tensão. Esse fato pode ser percebido ao analisar as equações (2.4), (2.5) e (2.6).

$$P_{pm\text{Arranjo}} = n_{M\text{série}} P_{mp} \quad (2.4)$$

$$V_{mpp\text{Arranjo}} = n_{M\text{série}} \cdot V_{mpp} \quad (2.5)$$

$$V_{oc\text{Arranjo}} = n_{M\text{série}} \cdot V_{oc} \quad (2.6)$$

Onde:

$P_{mp\text{Arranjo}}$ - Ponto de máxima potência do arranjo.

$n_{M\text{série}}$ - Número de módulos série.

$V_{mpp_Arranjo}$ - Tensão de máxima potência do arranjo.

$V_{OC_Arranjo}$ - Tensão de circuito aberto do arranjo.

No entanto, ao conectá-los em paralelo, as correntes somam-se, assim como na conexão de células. O comportamento da potência, tensão e corrente são representados pelas equações (2.7), (2.8) e (2.9).

$$P_{mp_Arranjo} = n_{M_paralelo} P_{mp} \quad (2.7)$$

$$I_{mpp_Arranjo} = n_{M_paralelo} \cdot I_{mpp} \quad (2.8)$$

$$I_{SC_Arranjo} = n_{M_paralelo} \cdot I_{SC} \quad (2.9)$$

Onde:

$n_{M_paralelo}$ - Número de módulos em paralelo.

$I_{mpp_Arranjo}$ - Corrente de máxima potência do arranjo.

$I_{SC_Arranjo}$ - Corrente de curto-circuito do arranjo.

Para fins do desenvolvimento do projeto será apresentada a simulação de um arranjo montado a partir de associação série de dois módulos.

A Tabela 2.3 traz as especificações do arranjo fotovoltaico e a Figura 2.8 ilustra as curvas obtidas através da ferramenta computacional.

Tabela 2.3: Características do arranjo constituído por módulos KD245GH-4FB.

Em condições de STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$ e $AM = 1,5$.)	
Parâmetro	Valor
$P_{mpArranjo}$	490 W
$V_{mppArranjo}$	57,8 V
$I_{mppArranjo}$	8,23 A
$I_{SCArranjo}$	8,91 A
$V_{OCArranjo}$	73,8 V

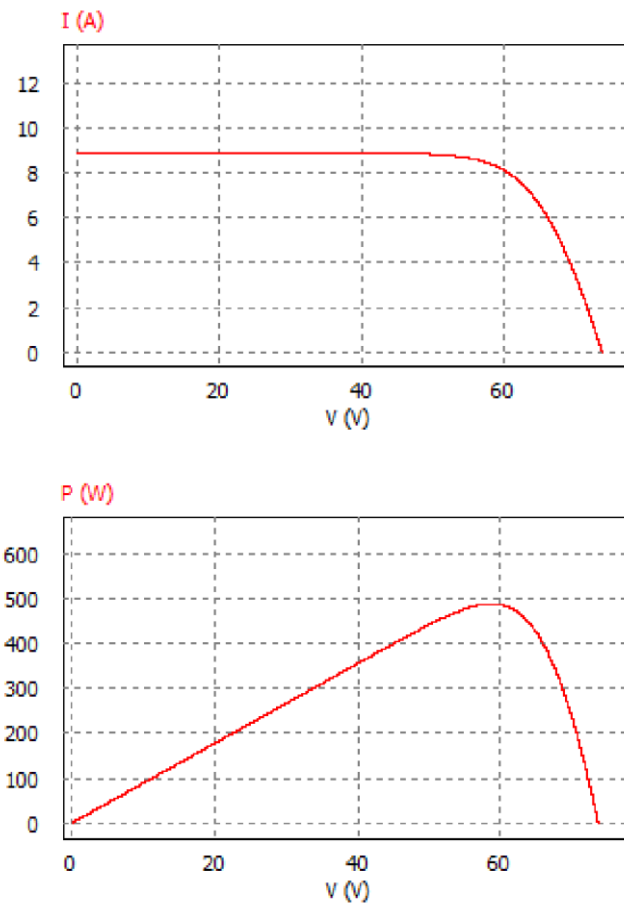


Figura 2.8: Curva I-V e P-V do arranjo obtidas por simulação.

Aferindo os valores apresentados nas curvas e comparando com os valores da Tabela 2.3 é possível verificar que os mesmos coincidem, provando assim a eficiência do modelo de simulação.

2.5 Processamento Parcial de Energia

As maiores considerações que se devem ter em um projeto de conversor para painel fotovoltaico são: a eficiência, complexidade de projeto, densidade de energia e o custo. O número de chaves eletrônicas utilizadas é um fator que afeta diretamente a eficiência e o custo do sistema. É essencial minimizar o número de chaves utilizadas [1].

O método do PPE tem como principal objetivo aumentar o rendimento do sistema. Isso se deve ao fato de que uma parte da potência é transferida de forma direta para a carga. essa parcela de energia não é processada pelo conversor assim não é afetada pelas perdas causadas por seus componentes [9].

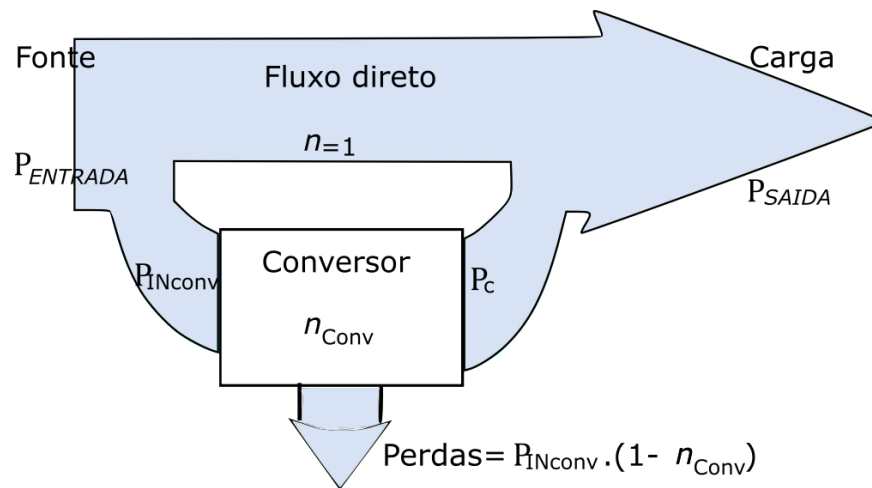


Figura 2.9: Fluxo de potência através de um sistema de processamento parcial.

A energia proveniente da fonte terá assim um caminho alternativo para chegar até a carga. A parcela de energia que flui de modo direto possui rendimento unitário não sofrendo perdas. No entanto, a parte processada pelo conversor sofre perdas [10]. A aplicação deste método em sistemas fotovoltaicos tem sido largamente discutida e tem dividido opiniões uma vez que os conceitos sobre ele ainda são confusos.

O fato de um conversor realizar o processamento parcial da potência não significa que o mesmo possui um alto rendimento ou uma densidade de potência melhor que um conversor convencional processando toda a potência ativa. Demonstra-se também que a eficiência de um conversor CC/CC não depende somente da potência ativa processada, mas também da potência não ativa que

circula por seus elementos adicionada a potência não ativa da entrada e da saída [10].

2.6 Perdas nos Semicondutores de Potência

Para definição de um conversor a ser utilizado em certa aplicação, é necessário a análise de alguns itens. Deve ser analisada a robustez, a densidade de potência, o rendimento e o custo [16].

Sabe-se que o valor das perdas nos semicondutores de potência está diretamente relacionado com o custo final do conversor. Porém, a determinação das perdas nos semicondutores não depende apenas da topologia, estando em função também da frequência de comutação, do tipo de dispositivo empregado e da modulação [17].

As perdas nos semicondutores são divididas em três partes: potência dissipada durante o bloqueio P_{dB} , potência dissipada durante a condução P_{dC} e potência dissipada durante a comutação P_{dsw} [18].

$$P_d = P_{dB} + P_{dC} + P_{dsw} \quad (2.10)$$

Onde P_d é a potência média dissipada; a potência de bloqueio é desprezada, assim a expressão (2.10) pode se reescrita na forma de (2.11).

$$P_d = P_{dC} + P_{dsw} \quad (2.11)$$

A potência média dissipada nos semicondutores é de grande importância para uma futura análise de rendimento.

2.7 Rastreamento de Máxima Potência

Os módulos fotovoltaicos apresentam, por si só, rendimentos não expressivos, na casa de 15% [3].

Devido ao ponto de operação do módulo estar associado às condições climáticas e à carga nele conectado, é preciso utilizar circuitos que maximizem a potência gerada, esses são chamados Rastreadores de Máxima Potência (MPPT –

Maximum Power Point Tracker), isso ocorre para que o rendimento de conversão não seja ainda mais reduzido [3].

Para solucionar este problema, se utilizam circuitos com o intuito de modificar o ponto de operação do sistema, estabelecendo a máxima transferência de potência sob qualquer condição. Os Rastreadores de Máxima Potência são posicionados na maioria das vezes, entre o módulo fotovoltaico e a carga de um conversor CC/CC, como pode ser visto na Figura 2.10.

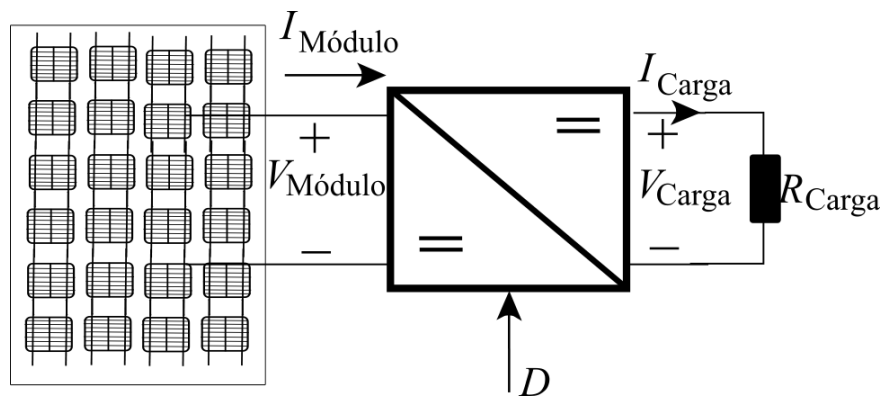


Figura 2.10: Módulo ligado à carga utilizando conversor CC/CC.

O rastreamento é feito por meio do conversor que adapta sua saída de acordo com as características do sistema para que assim possa trabalhar no joelho da curva e extrair a máxima potência. Isso é possível devido ao conversor possuir um ganho estático que está atrelado à sua razão cíclica.

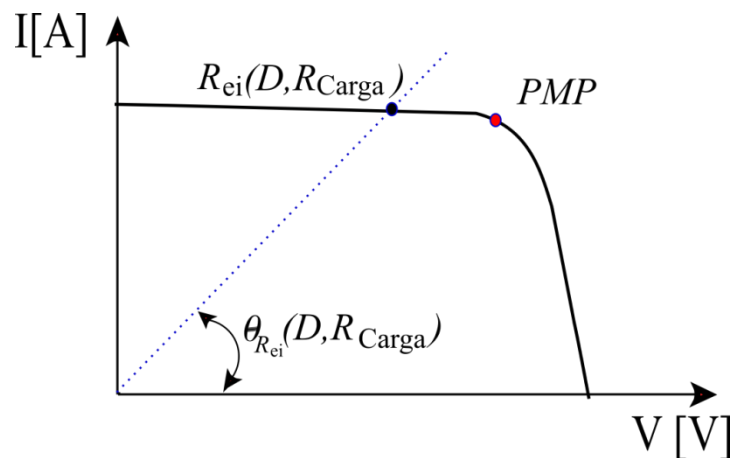


Figura 2.11: Curva de carga referente à resistência equivalente de entrada em função da razão cíclica e resistência de carga.

Como pode ser observado na Figura 2.11, pode-se andar pela curva alterando a razão cíclica do conversor para que assim a reta referente à resistência equivalente de entrada intercepte a curva do módulo no Ponto de Máxima Potência (PMP).

Nesses circuitos são implementadas técnicas de controle que sejam capazes de rastrear o ponto de máxima potência em condições adversas de irradiação e temperatura [11].

Segundo [12] dentre essas se destacam nove técnicas de MPPT amplamente difundidas na literatura, que são:

- Razão Cíclica Fixa;
- Tensão Constante;
- Perturbe e Observe (P&O);
- Perturbe e Observe (P&O) Modificado;
- Condutância Incremental;
- Condutância Incremental Modificada;
- Método Beta;
- Oscilação do Sistema;
- Correlação de Ripple.

Dentre esses métodos destacam-se dois considerados os mais eficientes quando comparados aos outros. Além disso, ainda possuem uma fácil implementação; são eles os métodos de Perturbe e Observe e o da Condutância Incremental. Devido a grande parte da bibliografia utilizar o método da perturbação e observação, o mesmo foi escolhido para o desenvolvimento do estudo.

2.7.1 Método Perturbe e Observe

Este método opera de forma periódica, incrementando ou decrementando a tensão de saída do painel fotovoltaico, e comparando a potência obtida no ciclo atual com a do ciclo anterior [11].

Caso a potência aumente, o sistema muda o ponto de operação naquela direção, caso contrário muda o ponto de operação na direção oposta. Além disso, a tensão gerada pelo painel é sempre alterada e quando o mesmo opera no Ponto de

Máxima Potência, ocorrem oscilações na potência de saída em torno de seu valor máximo, o que ocasiona perda de potência [11].

Os métodos de P&O mais difundidos são P&O clássico, otimizado e de três pontos [12].

A técnica clássica opera com perturbações fixas, em relação ao método otimizado, onde uma média das amostras de potência é usada para ajustar de modo dinâmico a magnitude da perturbação. No método P&O de três pontos, são usados três pontos diferentes da curva potência versus tensão, para que seja possível determinar a magnitude e a direção da perturbação seguinte [13].

A Figura 2.12, apresenta o fluxograma do algoritmo da técnica P&O.

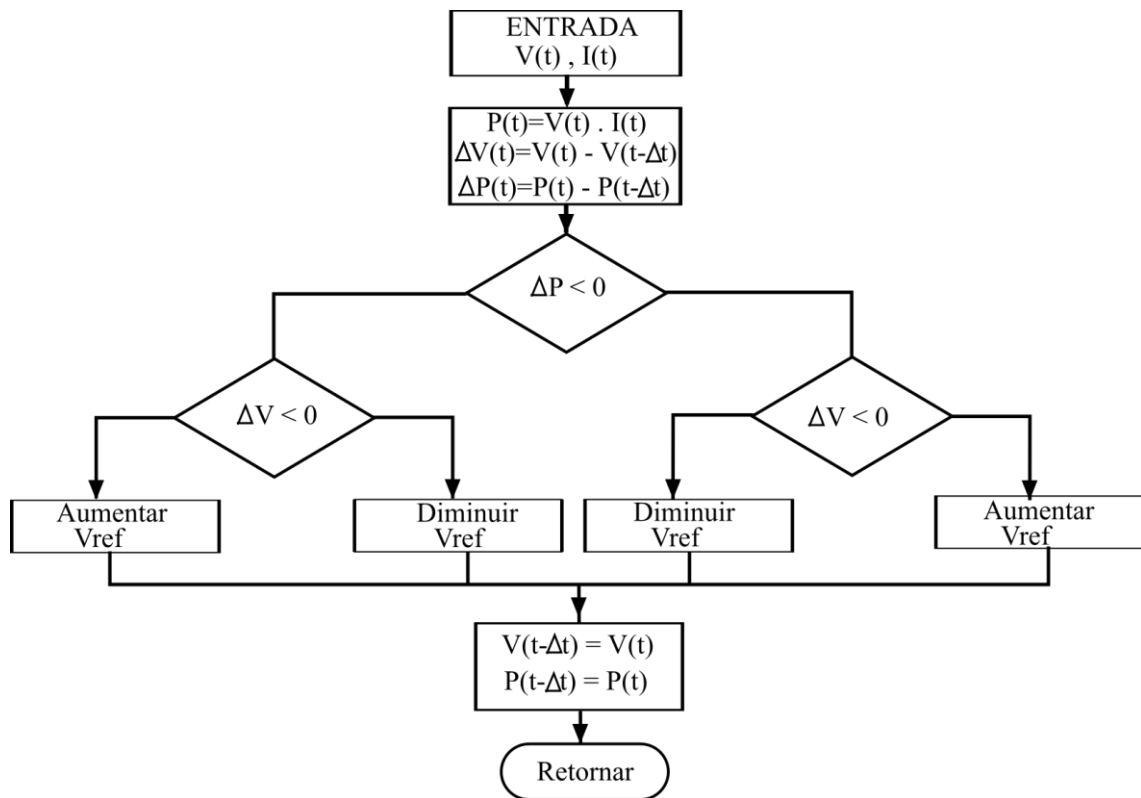


Figura 2.12: Fluxograma do algoritmo da técnica P&O clássica.

2.8 Conclusão

Este capítulo apresentou conceitos fundamentais ao seguimento do trabalho, foi introduzida a teoria de sistemas fotovoltaicos necessária para que seja possível realizar as simulações e análises do modelo proposto.

Primeiramente foi analisado o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica e seu circuito elétrico. A partir desse foi possível desenvolver o conhecimento sobre módulo e arranjo.

Logo após se fixaram os conceitos e princípios do processamento parcial, abordando o fluxo das potências e os caminhos pelos quais podem fluir, rendimento e densidade de potência.

Por fim, abordou-se o rastreamento de máxima potência, principais métodos e sucintamente seu princípio de funcionamento. Com posse do conhecimento adquirido nesse capítulo é possível dar início o estudo do conversor com PPE.

3 CONVERSOR FLYBACK COM PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA

3.1 Introdução

Toda teoria do capítulo anterior tem como objetivo embasar o estudo desse sistema para que se possa projetar o conversor e aplicá-lo em sua finalidade que é processamento da energia do gerador fotovoltaico.

Sendo assim esse capítulo será dividido em quatro partes sendo elas, análise do rendimento do sistema, projeto do conversor com processamento parcial, comparação do rendimento e da potencia ativa entre um conversor flyback e um conversor flyback com processamento parcial.

O principal objetivo desse capítulo é simular, averiguar e validar as afirmações sobre esse método de processamento.

3.2 Análises do rendimento do sistema

A forma com que será ligado o conversor é em série desse modo sua saída estará em série com a carga [1].

Sendo assim a tensão de saída do conversor é a diferença entre a tensão de saída do sistema e tensão de entrada. Por este motivo esse modelo de conexão é denominado conexão série. Na Figura 3.1 É possível observar de forma mais clara a ligação do conversor.

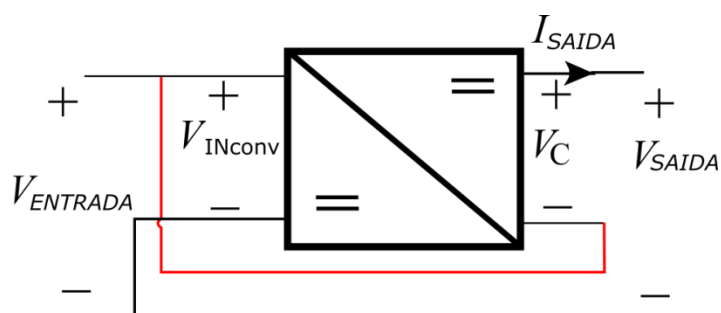


Figura 3.1: Conversor com processamento parcial de energia.

Esse se mostra bastante apropriado para utilização junto aos sistemas fotovoltaicos [1]. Sendo assim, o mesmo também pode ser utilizado como circuito rastreador de máxima potência.

Para realizar uma análise tanto de rendimento, quanto para fins de conhecimento do circuito, é necessário aplicar determinados conceitos ao conversor.

É possível fazer uma análise de malhas no circuito e assim extrair equações necessárias.

$$V_{Saida} = V_{Entrada} + V_C \quad (3.1)$$

$$P_{Saida} = V_{Saida} \cdot I_{Saida} \quad (3.2)$$

$$P_C = V_C \cdot I_{Saida} \quad (3.3)$$

Utilizando as expressões é possível saber a parcela de energia que é processada pelo conversor; essa é a razão entre a potência ativa processada e a potência ativa de saída [10]. Substituindo a equação (3.1) em (3.2).

$$P_{Saida} = (V_{Entrada} + V_C) \cdot I_{Saida} \quad (3.4)$$

$$\frac{P_C}{P_{Saida}} = \frac{V_C}{V_{Entrada} + V_C} \quad (3.5)$$

Após encontrar a expressão que define a porção de energia processada pelo conversor, o próximo passo é determinar o rendimento do sistema. Para isso se utilizará a equação do rendimento.

$$n = \frac{P_{Saida}}{P_{Entrada}} \approx 1 - \frac{P_{PERDAS}}{P_{Saida} + P_{PERDAS}} \approx 1 - \frac{P_{PERDAS}}{P_{Saida}} \quad (3.6)$$

Sabendo que só ocorrerão perdas consideráveis na potência que flui pelo conversor é possível chegar a seguinte conclusão:

$$P_{PERDAS} = (1 - n_{Conv}) \cdot P_{in_{Conv}} \quad (3.7)$$

Substituindo (3.7) em (3.6) se obtém:

$$n = 1 - \frac{P_{in_{Conv}}}{P_{Saída}} (1 - n_{Conv}) \quad (3.8)$$

No entanto essa equação pode induzir a uma análise equivocada, levando a considerar que quanto menor a potência ativa processada pelo conversor maior o rendimento do sistema [10]. O erro está em observar apenas a potência ativa e desconsiderar a não ativa.

3.3 Conversor Flyback

O conversor flyback é baseado em um conversor buck-boost, porém a indutância do circuito é substituída por um transformador que isola o circuito primário do secundário. Outro fato que o diferencia é a polaridade invertida do diodo, resolvendo assim o importuno fato da polaridade inversa da tensão de saída do buck-boost [14].

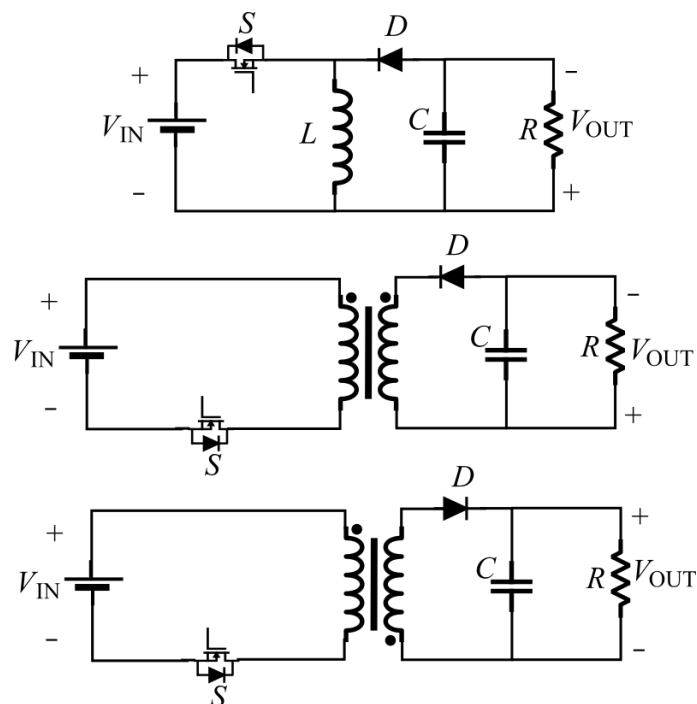


Figura 3.2: Obtenção do conversor Flyback.

Para poder realizar uma análise do circuito é necessário considerar a energia armazenada no núcleo magnético. Essa energia armazenada pode ser representada pela inserção de uma indutância de magnetização [14].

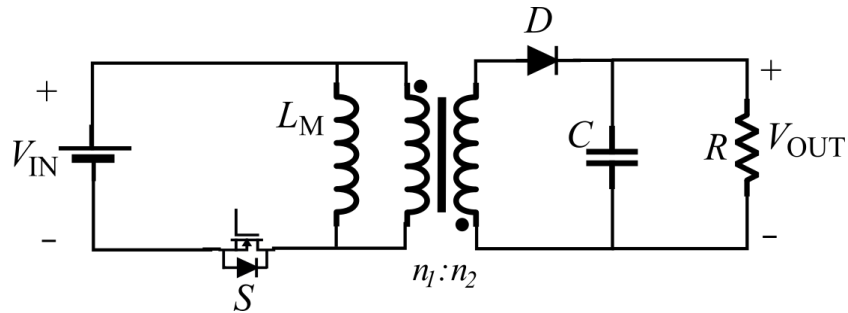


Figura 3.3: Conversor Flyback considerando indutância de magnetização.

A indutância de magnetização terá nesse circuito o mesmo papel da indutância presente no conversor buck-boost, sendo assim todas as análises de equilíbrio de energia serão feitas centrando-se nela.

Assim como a maioria dos conversores o conversor flyback também pode operar em dois modos: Modo de Condução Contínua (MCC) e o Modo de Condução Descontínua (MCD).

3.3.1 Análise no Modo de Condução Contínua

A análise em MCC será realizada tendo como ponto central a energia armazenada na indutância de magnetização, levando em consideração a corrente e a tensão sobre a mesma. Essa será dividida em duas partes, a primeira parte consiste em observar o comportamento do circuito com a chave fechada e a segunda em uma análise com a chave aberta [15].

1° Etapa de Funcionamento: Na primeira etapa a chave S encontra-se fechada e a energia proveniente da fonte é acumulada na indutância magnetizante fazendo assim com que sua corrente cresça linearmente. O diodo D encontra-se bloqueado, a corrente no transformador é nula. Assim a carga é alimentada pelo capacitor. Esta etapa termina quando a chave S é aberta no tempo $D \cdot T_s$ (Figura 3.4).

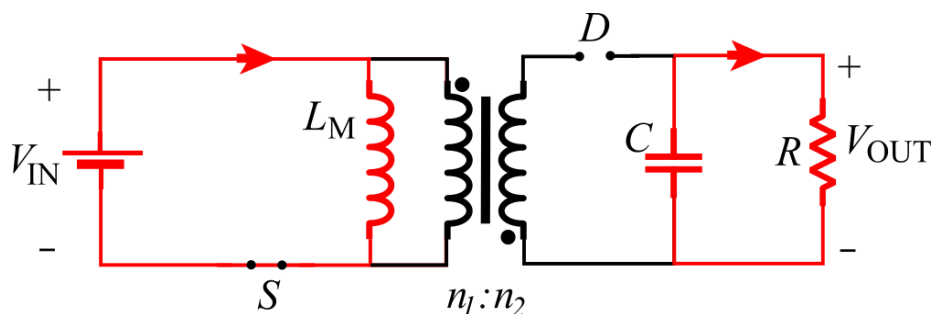


Figura 3.4: Primeira etapa de funcionamento do conversor Flyback.

Ao observar o circuito referente à primeira etapa de funcionamento é possível obter algumas equações que demonstram o comportamento de seus componentes durante esse período. Sabendo que quando o transistor S conduz, o diodo D está reversamente polarizado.

$$V_D = -V_{OUT} - V_{IN} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.9)$$

Outro fato que pode ser constatado é que a indutância de magnetização está sobre a tensão de entrada.

$$V_{LM} = V_{IN} \quad (3.10)$$

$$V_{IN} = L_M \cdot \frac{\partial I_{LM}(t)}{\partial t} \quad (3.11)$$

Ao aplicar essa tensão sobre a indutância de magnetização, sua corrente irá crescer linearmente. Abaixo pode ser vista a dedução da expressão que descreve esse comportamento

$$\partial I_{LM}(t) = \frac{V_{IN}}{L_M} \cdot \partial t \quad (3.12)$$

$$I_{LM}(t) = \int_0^t \frac{V_{IN}}{L_M} \partial t \quad (3.13)$$

$$I_{LM}(t) = \frac{V_{IN}}{L_M} \cdot t + I_{LM}(0) \quad (3.14)$$

2° Etapa de Funcionamento: Com a abertura da chave S, o diodo D é polarizado diretamente, entrando em condução. A partir deste momento a energia acumulada na indutância de magnetização é direcionada para o transformador, a corrente no seu secundário alimenta a carga e carrega o capacitor (Figura 3.5).

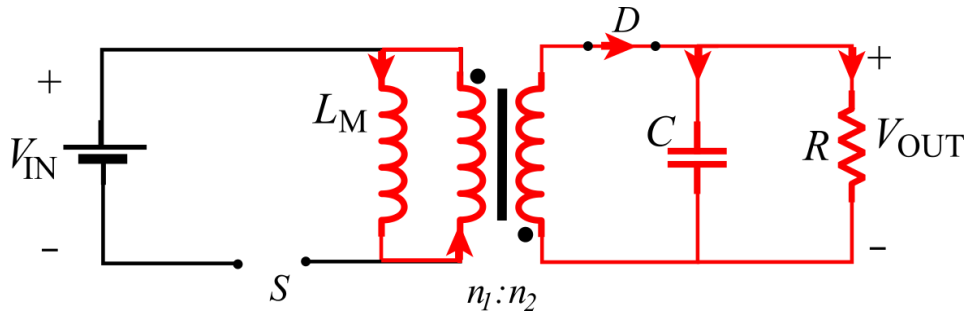


Figura 3.5: Segunda etapa de funcionamento do conversor Flyback.

Com a abertura da chave S, a energia armazenada no núcleo passa a circular, assim polarizando diretamente o diodo D. Fazendo com que a tensão sobre indutância de magnetização seja expressa pelas equações (3.15) e (3.16).

$$V_{LM} = -V_{OUT} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (3.15)$$

$$-V_{OUT} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) = L_M \cdot \frac{\partial I_{LM}(t)}{\partial t} \quad (3.16)$$

Ao aplicar essa tensão sobre a indutância percebe-se que sua corrente decresce linearmente.

$$\partial I_{LM}(t) = \frac{-V_{OUT}}{L_M} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \partial t \quad (3.17)$$

$$I_{LM}(t) = \int_{D.Ts}^t -\frac{V_{OUT}}{L_M} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \partial t \quad (3.18)$$

$$I_{LM}(t) = -\frac{V_{OUT}}{L_M} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) (t - D.Ts) + I_{LM}(D.Ts) \quad (3.19)$$

Sabe-se que em regime permanente o fluxo magnético no indutor de magnetização, durante um período de funcionamento, deve se manter constante. Sendo assim, a integral da tensão sobre esta indutância durante o intervalo em que a chave S está fechada deve ser igual a integral desta mesma tensão durante o período em que a chave S permanece aberta. Obedecendo esta condição de

equilíbrio é possível chegar a expressão que define o ganho estático do conversor [14].

$$\int_0^{D.Ts} V_{LM} \cdot \partial t = \int_{D.Ts}^{Ts} V_{LM} \cdot \partial t \quad (3.20)$$

$$\int_0^{D.Ts} V_{IN} \cdot \partial t = \int_{D.Ts}^{Ts} -V_{OUT} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \cdot \partial t \quad (3.21)$$

$$V_{IN} \cdot (D \cdot Ts - 0) = -V_{OUT} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) (Ts - D \cdot Ts) \quad (3.22)$$

Resolvendo:

$$G = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{D}{(1-D)} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.23)$$

Analisando a expressão (3.23) fica evidente que o sistema é controlado por sua razão cíclica.

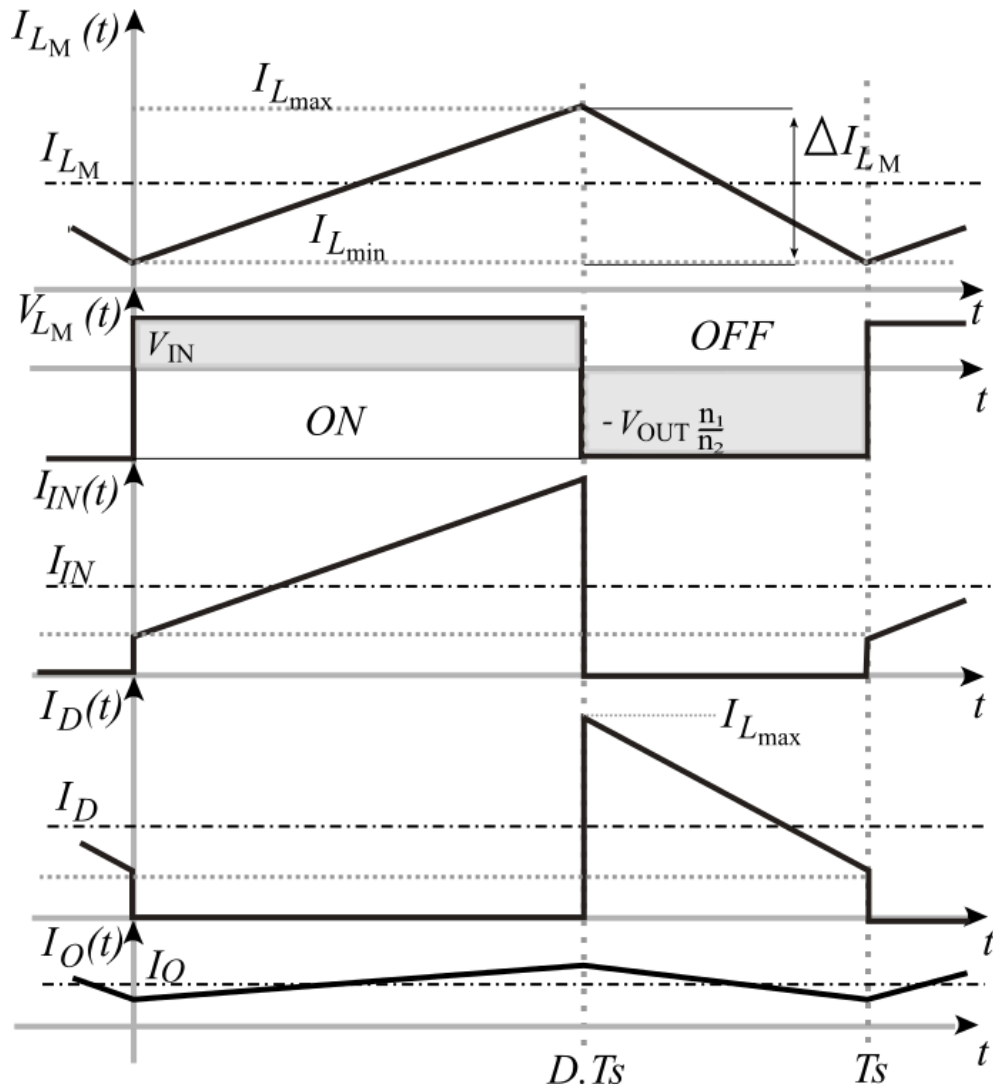


Figura 3.6: Principais formas de onda do conversor flyback operando em MCC.

Para encontrar o valor da indutância magnetizante deste basta analisar a ondulação de corrente do mesmo.

$$\Delta I_{LM} = I_{L_{max}} - I_{L_{min}} \quad (3.24)$$

Utilizando a equação (3.6) no período $D \cdot T_s$.

$$I_{LM}(D \cdot T_s) = \frac{V_{IN}}{L_M} \cdot D \cdot T_s + I_{LM}(0) \quad (3.25)$$

Sabendo que T_s é definido por (3.26).

$$T_s = \frac{1}{f} \quad (3.26)$$

Substituindo (3.26) em (3.25) e escrevendo da forma de (3.24):

$$\Delta I_{LM} = I_{LM}(D \cdot T_s) - I_{LM}(0) = \frac{V_{IN}}{L_M \cdot f} \cdot D \quad (3.27)$$

Isolando assim a indutância magnetizante, se obtém:

$$L_M = \frac{V_{IN}}{\Delta I_{LM} \cdot f} \cdot D \quad (3.28)$$

Durante a primeira etapa de condução, o capacitor fornece energia para carga. A corrente média durante o tempo $D \cdot T_s$ é a própria corrente média na carga [16]. Portanto a ondulação de tensão no capacitor pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int_0^{D \cdot T_s} I_c \cdot \partial t \quad (3.29)$$

Para situações onde ondulação de tensão sobre capacitor é especificada, calcula-se o valor da capacitância pela equação (3.30).

$$C = \frac{D \cdot I_c}{\Delta V_c \cdot f} \quad (3.30)$$

Assim encerra-se análise do conversor flyback em MCC.

3.4 Conversor Flyback com Processamento Parcial de Energia

O objetivo de aplicar o conceito de processamento parcial de energia em um conversor é justamente aumentar o seu rendimento, diminuindo assim suas perdas [1].

Baseando-se em conceitos já existentes sobre o conversor em questão e em estudos realizados sobre o processamento parcial, esse busca estudar e obter um

maior entendimento sobre os estágios de operação desse sistema em MCC. Assim como o estudo feito anteriormente, o ponto central desta análise estará na energia armazenada pela indutância de magnetização do conversor.

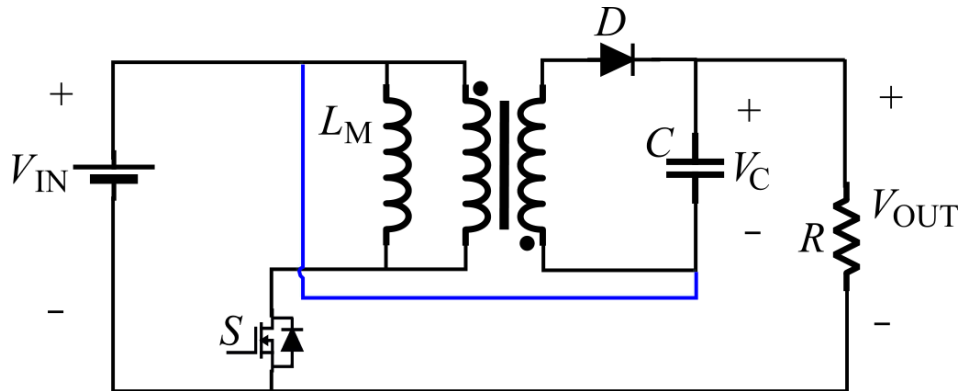


Figura 3.7: Conversor Flyback com Processamento parcial.

O modelo apresentado na Figura 3.6 será utilizado para o estudo do modo de condução contínua. Percebesse que o curto que liga a entrada com a saída do conversor faz com que o mesmo perca suas características de isolamento.

3.4.1 Análise no Modo de Condução Contínua

Analogamente ao estudo feito anteriormente, a análise no modo MCC será feita em duas etapas, baseando-se na energia armazenada na indutância magnetizante do núcleo e na posição da chave S. A primeira etapa considera a chave conduzindo e a segunda em posição de bloqueio.

1° Etapa de Funcionamento: Nesta etapa a chave S encontra-se em condução. No entanto o diodo está em polarização reversa. Dessa maneira a energia da fonte é transferida para a indutância magnetizante. A fonte se encontra em série com a tensão de saída e juntamente com o capacitor fornece energia para a carga (Figura 3.8).

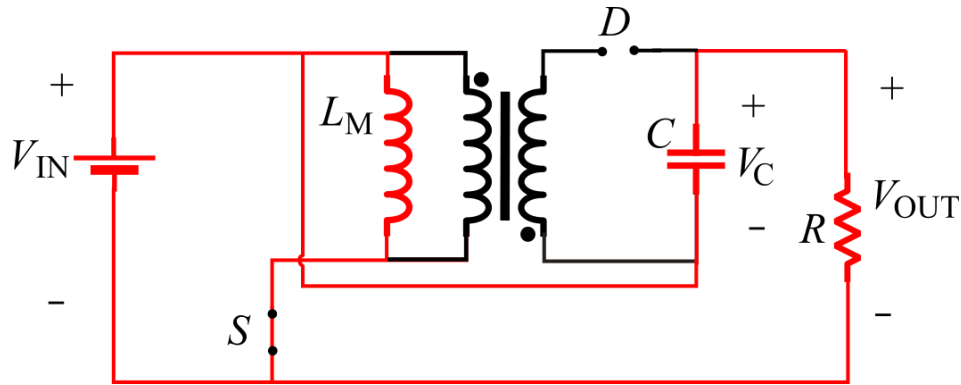


Figura 3.8: Primeira etapa de funcionamento do conversor Flyback com Processamento parcial.

Ao observar o circuito é possível fazer algumas afirmações, percebe-se que durante a primeira etapa o diodo está reversamente polarizado, a tensão sobre ele pode ser expressa pela equação (3.31).

$$V_D = -V_C - V_{IN} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.31)$$

A tensão na indutância pode ser representada por duas equações que retratam o mesmo comportamento são elas (3.32) e (3.33).

$$V_{LM} = V_{IN} \quad (3.32)$$

$$V_{LM} = V_{OUT} - V_C \quad (3.33)$$

Ao aplicar esta tensão sobre L_M a corrente sobre ela irá se comportar como uma reta crescente, apresentando semelhança com ao que acontece em (3.13)

$$\partial I_{LM(t)} = \frac{V_{IN}}{L_M} \cdot \partial t \quad (3.34)$$

$$I_{LM(t)} = \frac{V_{IN}}{L_M} \cdot t + I_{LM}(0) \quad (3.35)$$

2° Etapa de Funcionamento: Com a abertura da chave S, o diodo D entra em condução. A energia acumulada na indutância de magnetização é transferida

para o transformado, a corrente no seu secundário juntamente com a entrada alimenta a carga e carrega o capacitor (Figura 3.9).

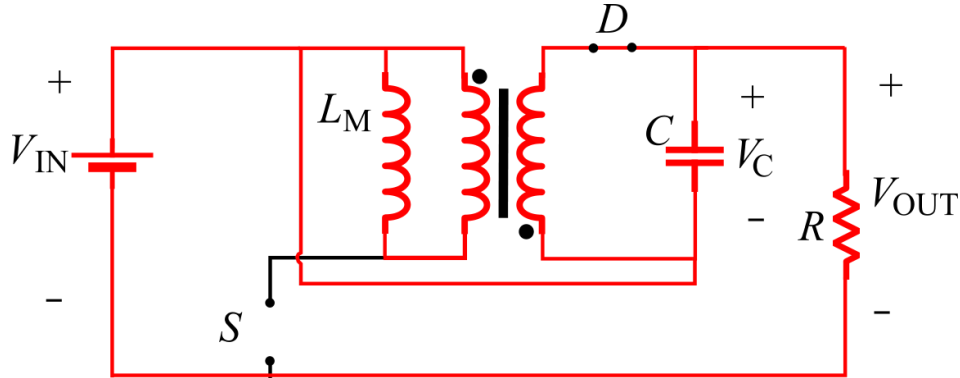


Figura 3.9: Segunda etapa de funcionamento do conversor Flyback com Processamento parcial.

Com a chave aberta, a energia armazenada passa a circular. Dessa maneira, o diodo é diretamente polarizado fazendo com que, a tensão sobre a indutância de magnetização seja expressa pela equação (3.36)

$$V_{LM} = -V_C \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (3.36)$$

$$-V_C \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) = L_M \cdot \frac{\partial I_{LM}(t)}{\partial t} \quad (3.37)$$

O comportamento da corrente I_{LM} é o de uma reta decrescente e é expresso por (3.38).

$$\partial I_{LM}(t) = \frac{-V_C}{L_M} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \cdot \partial t \quad (3.38)$$

$$I_{LM}(t) = -\frac{V_C}{L_M} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) (t - D \cdot Ts) + I_{LM}(D \cdot Ts) \quad (3.39)$$

Obedecendo esta condição de equilíbrio, a integral da tensão com S fechada deve ser igual a integral com S aberta [14]. Com base nesse conceito torna-se possível encontrar o ganho estático do conversor.

$$\int_0^{D.T_s} V_{IN} \cdot \partial t = \int_{D.T_s}^{T_s} -V_C \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \cdot \partial t \quad (3.40)$$

Resolvendo a expressão (3.40).

$$G = \frac{V_C}{V_{IN}} = \frac{D}{(1-D)} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.41)$$

Porém ao analisar o circuito se obtém:

$$V_C = V_{OUT} - V_{IN} \quad (3.42)$$

Substituindo (3.42) em (3.41).

$$G = \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{V_{IN}} = \frac{D}{(1-D)} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.43)$$

Ao comparar a equação (3.23) com (3.43), percebe-se que existe diferença no ganho estático das topologias.

Na Figura 3.10 se pode observar as curvas teóricas de tensão e corrente na indutância de magnetização.

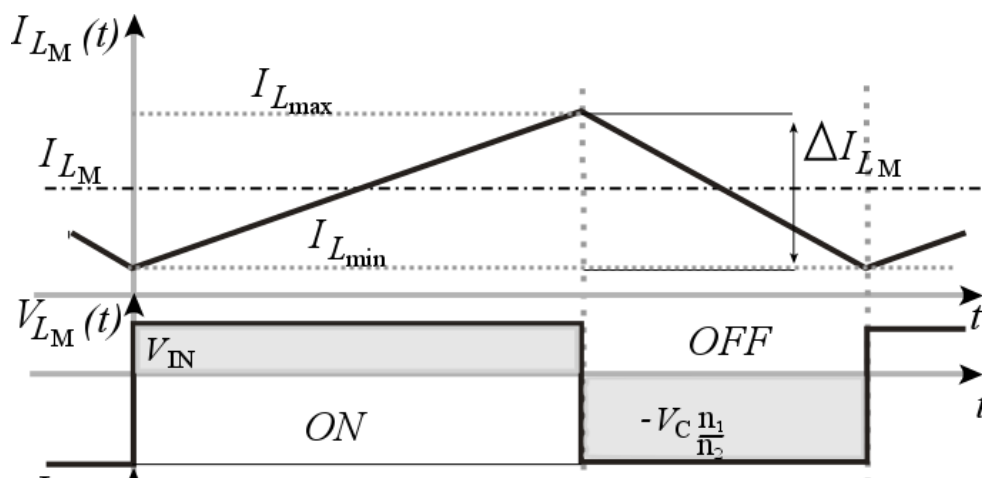


Figura 3.10: Principais formas de onda do conversor flyback com processamento parcial de energia operando em MCC.

Quanto ao cálculo da indutância magnetizante e do capacitor de saída permanecem os mesmos, porém deve-se observar a equação (3.42).

Para verificar a veracidade da modelagem matemática apresentada, se utilizará um exemplo simulado no *software* PSIM.

Na tabela 3.1 podem ser observadas as especificações do conversor utilizado na simulação.

Tabela 3.1: Características de projeto conversor flyback PPE em MCC.

Grandeza	Representação	Valor
Potência de entrada	P_{IN} [W]	400
Tensão de entrada	V_{IN} [V]	100
Tensão de saída	V_{OUT} [V]	200
Frequência de comutação	f_s [kHz]	5
Máxima ondulação de tensão no capacitor	ΔV_C [V]	1
Máxima ondulação de corrente no indutor	ΔI_{LM} [A]	0,4

A análise do circuito não contemplará perdas, e o dimensionamento dos parâmetros seguirá as equações mostradas anteriormente. Considerando a relação de transformação do núcleo unitária.

Determinação da razão cíclica:

$$\frac{200 - 100}{100} = \frac{D}{(1 - D)} \cdot \left(\frac{1}{1}\right) \quad (3.44)$$

Isolando a razão cíclica e resolvendo (3.44).

$$D = 0,5 \quad (3.45)$$

Determinação da indutância de magnetização:

$$L_M = \frac{V_{IN}}{\Delta I_{LM} \cdot f} \cdot D = \frac{100 \cdot 0,5}{5000 \cdot 0,4} = 25 \text{ mH} \quad (3.46)$$

Determinação da capacitância:

$$C = \frac{D \cdot I_C}{\Delta V_C \cdot f} = \frac{0.5}{1.5000} \cdot \left(\frac{200}{100}\right) = 200 \mu F \quad (3.47)$$

Em posse desses parâmetros, torna-se possível realizar a simulação por meio de *software* do sistema e assim comparar as curvas obtidas através de modelagem matemática, com as obtidas por meio da ferramenta computacional. Na Figura 3.11 é possível observar esquemático do conversor simulado no PSIM.

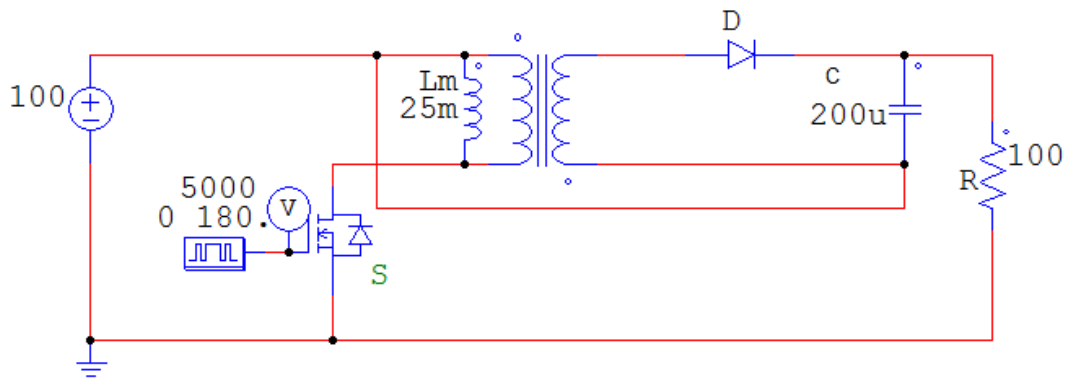


Figura 3.11: Conversor com processamento parcial proposto para simulação sem análise de perda.

A seguir, serão apresentadas as formas de onda que validam o modelo matemático do conversor flyback com processamento parcial apresentado neste. As escalas sofreram ajustes para que fosse possível uma melhor observação, começando de um período de tempo onde o circuito já está trabalhando em regime. As comparações entre a análise feita e a simulação podem ser efetuadas visualmente.

Ao estudar a tensão sobre a chave S do conversor, se obtém a forma de onda apresentada na Figura 3.12.

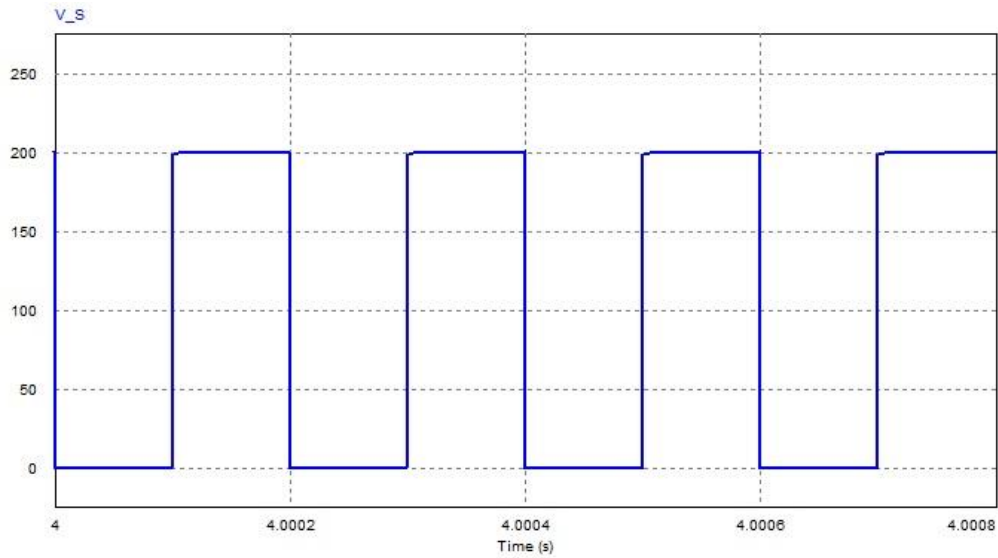


Figura 3.12: Tensão na chave S do circuito.

Observado a Figura 3.12 constata-se que a chave conduz durante a primeira etapa, e está aberta durante a segunda.

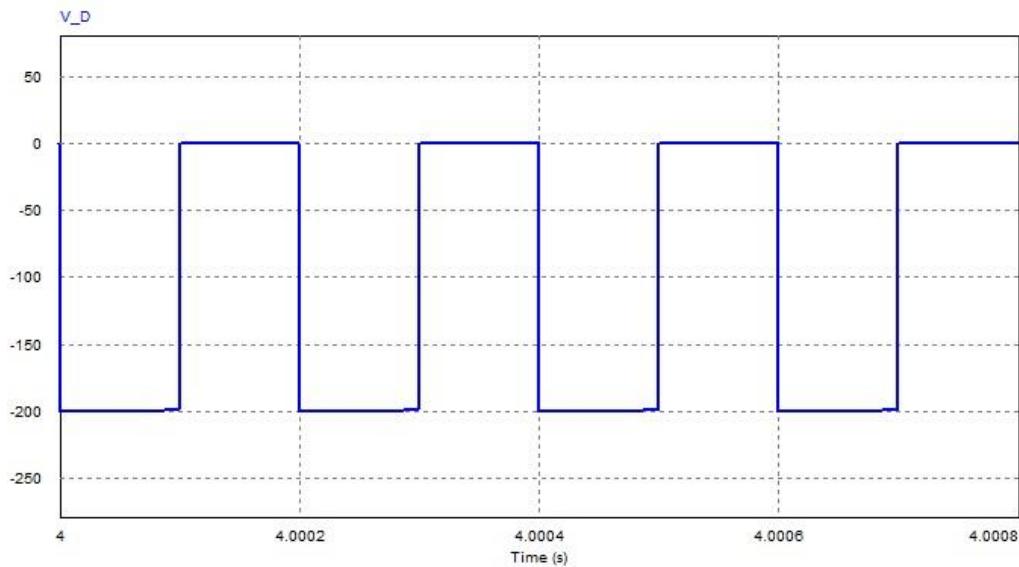


Figura 3.13: Tensão no diodo D.

O comportamento da tensão no diodo na Figura 3.13, quando está reversamente polarizado, é o mesmo expresso pela equação (3.31).

$$V_D = -V_C - V_{IN} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right) = -(200 - 100) - 100 \left(\frac{1}{1}\right) = -200V \quad (3.48)$$

Agora basta aferir as formas de onda referentes a tensão e corrente da indutância de magnetização do circuito.

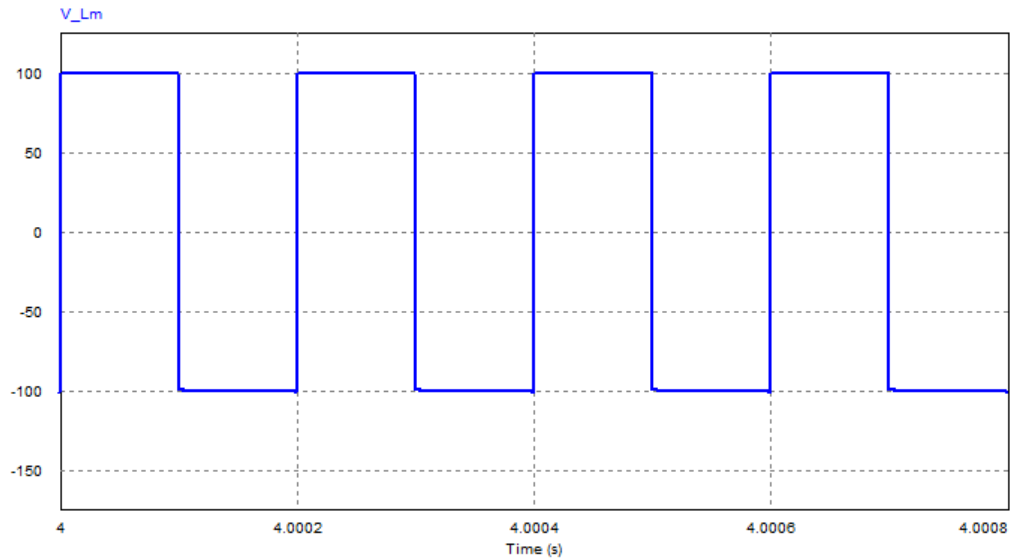


Figura 3.14: Tensão na indutância na magnetização.

A tensão sobre a indutância de magnetização satisfaz ambas as equações que a descrevem. Na primeira etapa a tensão é expressa por (3.32).

$$V_{LM} = V_{IN} = 100 \text{ V.} \quad (3.49)$$

Na segunda etapa a tensão sobre a indutância é descrita pela equação (3.36).

$$V_{LM} = -V_C \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) = -100 \cdot (1) = -100 \text{ V} \quad (3.50)$$

Sendo assim (3.32) e (3.36) são equações válidas.

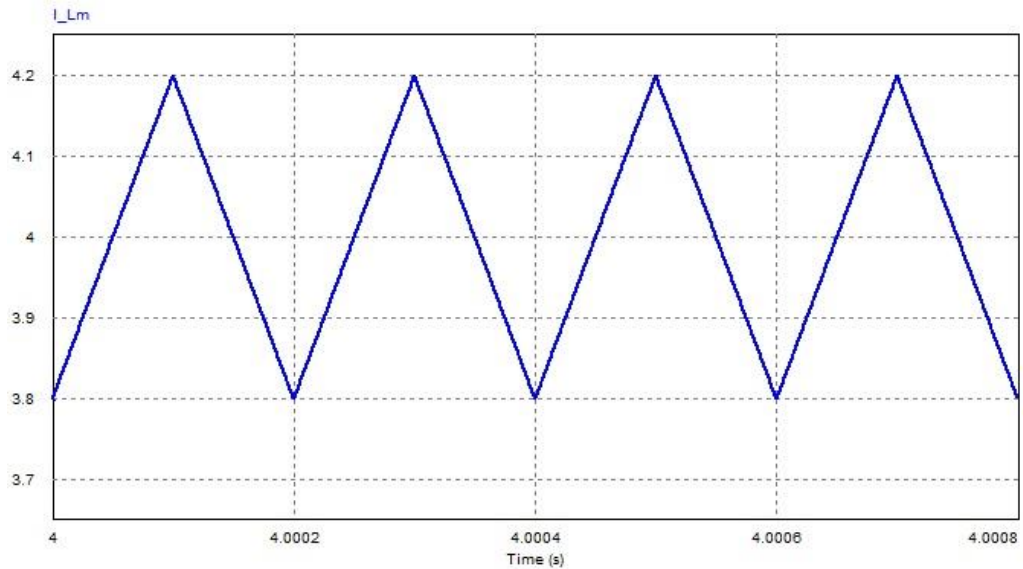


Figura 3.15: Corrente na indutância de magnetização.

Ao estudar a Figura 3.15, pode-se notar que a corrente da indutância magnetizante comporta-se como descrito em (3.35) e (3.39), obedecendo inclusive à ondulação máxima de corrente imposta pelo projeto, com visto em (3.51).

$$\Delta I_{LM} = 4,2 - 3,8 = 0,4 \text{ A} \quad (3.51)$$

A tensão sobre o capacitor do circuito é apresentada na Figura 3.16.

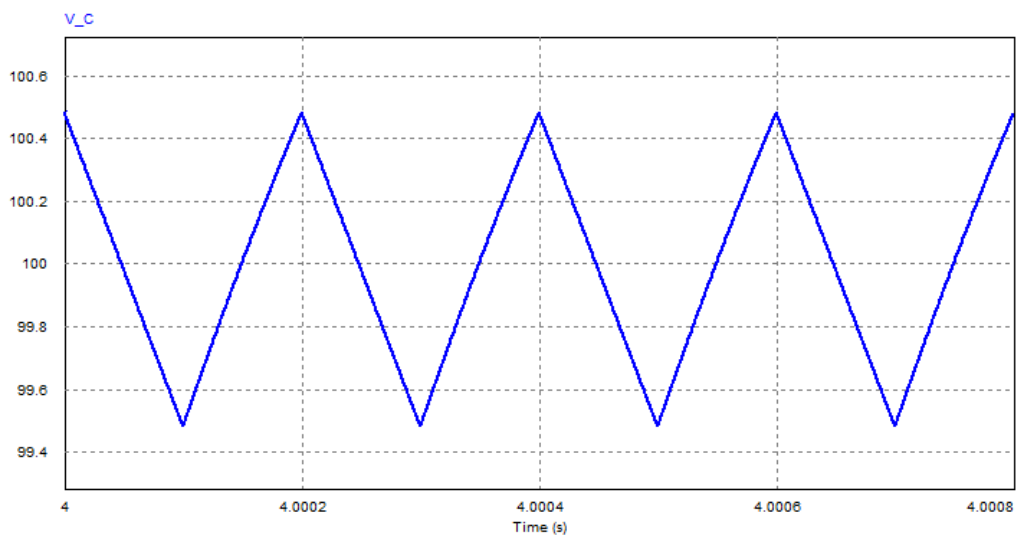


Figura 3.16: Tensão no capacitor.

A tensão no capacitor também apresenta o comportamento esperado, atendendo a máxima ondulação de tensão sobre ele.

$$\Delta V_C = 100,5 - 99,5 = 1 V \quad (3.52)$$

Encerrando a análise do exemplo apresentado. A Figura 3.17 analisa a tensão de saída do conversor e a Figura 3.18 a corrente de saída.

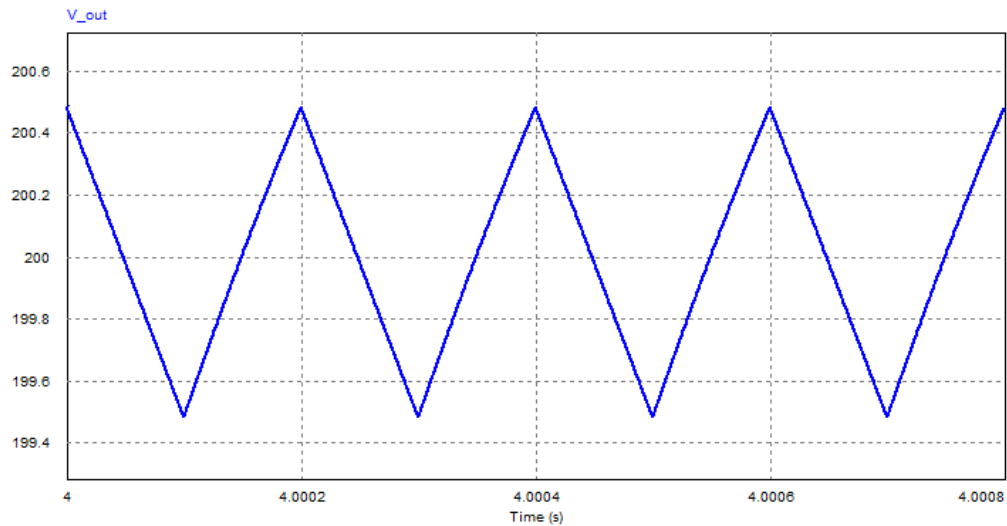


Figura 3.17: Tensão de saída do conversor.

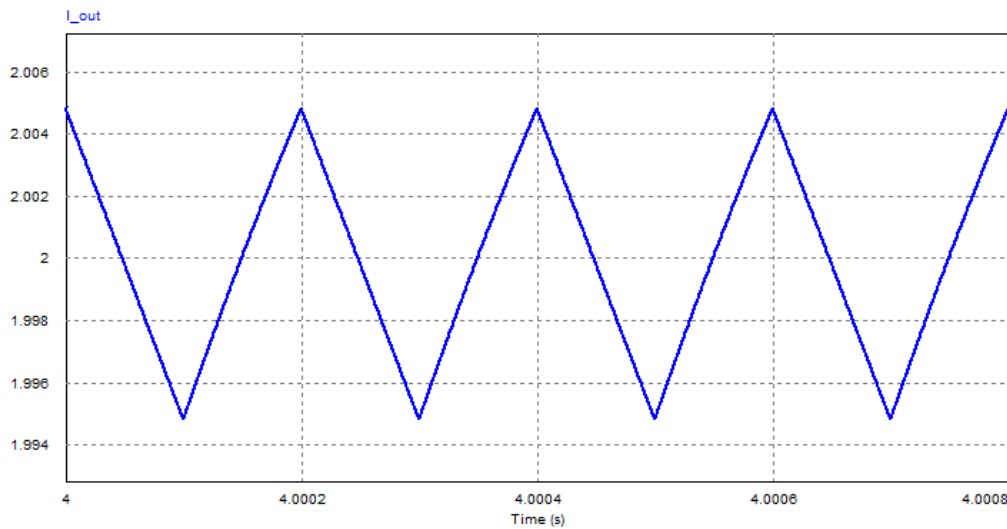


Figura 3.18: Corrente de saída do conversor.

A comparação entre os resultados obtidos através de simulação e os modelados matematicamente mostram total conformidade. Este fato é de grande importância, de modo que as equações desenvolvidas neste tornaram-se base para o prosseguimento do estudo.

3.5 Conclusão

Este Capítulo aborda o conversor flyback com processamento parcial, tendo uma visão do conceito e depois de seu funcionamento em MCC, para que ocorra um melhor entendimento sobre o circuito. Demonstrou-se o embasamento teórico em torno da eficiência da estrutura, propondo que as perdas de processamento ocorram somente na parcela de potência que flui pelo conversor.

Estudaram-se também os princípios do conversor flyback, seus modos de condução e suas etapas de funcionamento no modo de condução contínua. Assim desenvolveram-se as equações que dimensionam os parâmetros dos circuitos e as formas de onda sobre os mesmos.

Por fim, realizou-se a análise do conversor flyback com processamento parcial de energia. Essa se baseou no conversor flyback com processamento integral, assim se desenvolveram as equações que regem o funcionamento do conversor flyback com PPE e as formas de onda sobre cada componente do circuito. As formas de ondas e equações foram comparadas as obtidas através do modelo simulado, para assim verificar sua consistência.

4 CONVERSOR FLYBACK COM PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA APLICADO À SISTEMAS FOTOLTAICOS

4.1 Introdução

Toda teoria apresentada nos capítulos anteriores teve como objetivo introduzir os conceitos necessários para obtenção do rastreamento de máxima potência, que somente é possibilitado com a utilização de conversores CC/CC.

Neste capítulo será desenvolvido o projeto de um conversor flyback com processamento parcial operando no modo de condução contínua proposto a fazer uma interpretação sobre as perdas causadas por seus componentes semicondutores.

Também irá descrever, o projeto de um conversor flyback com PPE e de um conversor flyback convencional, esses terão como objetivo servir como interface entre o painel fotovoltaico e a carga, tendo como função rastrear a máxima potência do painel e também entregar a potência rastreada a carga.

Todas as análises serão feitas por meio de simulação computacional e tem como objetivo encontrar a eficiência do conversor, do rastreamento e ao final realizar um estudo do rendimento global do sistema, isto possibilitará uma interpretação correta sobre a eficiência do método.

4.2 Análises com perdas nos semicondutores

Esse estudo irá analisar as perdas referentes aos semicondutores de potência operando em altas frequências. Supondo que se deseja projetar um conversor. No entanto, existem duas possibilidades, o conversor flyback com processamento integral e conversor flyback com processamento parcial. Porém, é difícil escolher entre as duas topologias e reconhecer qual possui o maior rendimento. Sendo assim, é necessário estimar as perdas e desenvolver um modelo de simulação para cada uma das estruturas.

Tabela 4.1: Características de projeto dos conversores.

Parâmetro	Conversor	
	Flyback PPE	Flyback
$P_{OUT}[W]$	400	400
$V_{IN}[V]$	100	100
$V_{OUT}[V]$	200	200
D	0,5	0,667
$f_S[kHz]$	5	5
$\Delta V_C[V]$	1	1
$\Delta I_{LM}[A]$	0,4	0,4

Através das equações expressas anteriormente torne-se possível dimensionar os componentes do conversor para que assim seja possível a análise.

É válido lembrar que para esta análise a relação de transformação é considerada unitária. A determinação dos componentes do conversor flyback com processamento parcial já foi realizada no capítulo anterior, as expressões que dimensionam a capacitância e a indutância são (3.46) e (3.47) respectivamente.

Entretanto, ainda é necessário fazer o dimensionamento por parte do conversor flyback.

Determinação da indutância de magnetização conversor:

$$L_M = \frac{100 \cdot 0,667}{0,4 \cdot 5000} = 33,33 \text{ mH} \quad (4.1)$$

Determinação da capacitância do conversor:

$$C = \frac{0,667 \cdot 2}{1 \cdot 5000} = 266,80 \text{ uF} \quad (4.2)$$

A próxima etapa é dimensionar os semicondutores do circuito. No entanto, para isso se torna necessário saber os esforços de tensão e corrente suportados pelos mesmos. Dessa maneira, utilizando os componentes dos circuitos já projetados, se pode realizar esse estudo. Sendo assim, utilizou-se o *software* Psim

para efetuar uma simulação sem considerar as perdas e obter as correntes e tensões sobre o diodo e o MOSFET.

A Figura 4.1 representa o modelo utilizado para obter as correntes e tensões no diodo e MOSFET do conversor flyback com PPE, esse apresenta os componentes do circuito e os amperímetros e voltímetros utilizados para obter os valores correspondentes.

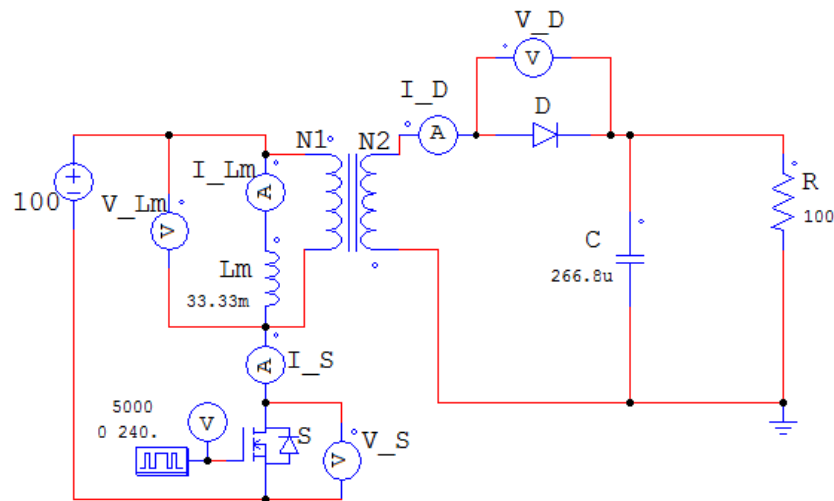


Figura 4.1: Diagrama de simulação do conversor flyback.

Para saber as magnitudes de tensão e corrente que circulam através dos semicondutores do flyback com PPE, também é montado um diagrama similar ao da Figura 4.1, que conta com amperímetros e voltímetros. Esse esquemático é representado pela Figura 4.2.

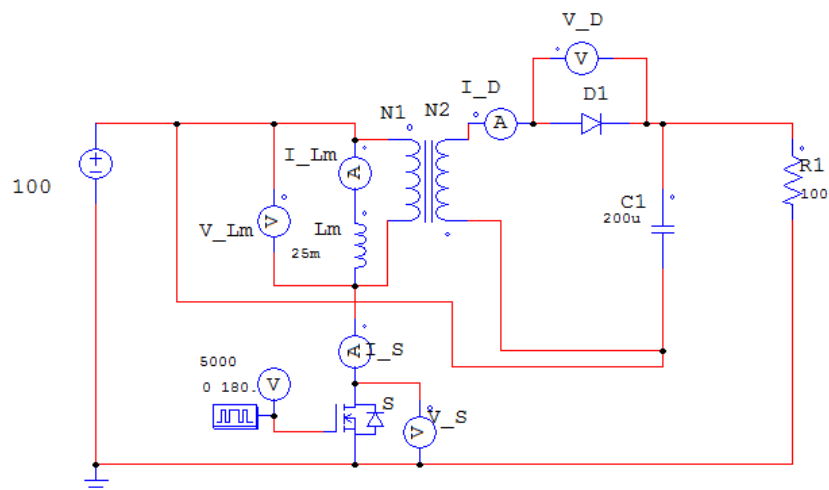


Figura 4.2: Diagrama de simulação do conversor flyback com PPE.

Após a realização das simulações, se obtém os valores dos parâmetros necessários para que se possam dimensionar os componentes semicondutores nos circuitos. A tabela 4.2 apresenta os esforços suportados pelas chaves.

Tabela 4.2: Esforço nas chaves semicondutoras.

Parâmetro	Conversor	
	Flyback PPE	Flyback
Corrente média no MOSFET	2 A	3,885 A
Corrente eficaz no MOSFET	2,842A	4,833 A
Corrente máxima no MOSFET	3,842 A	6,194 A
Tensão reversa no MOSFET	200 V	300 V
Corrente média no diodo	2 A	2,114 A
Corrente eficaz no diodo	2,814 A	3,555 A
Corrente máxima no diodo	4,162A	6,164 A
Tensão reversa no diodo	200V	300 V

Observando a tabela naturalmente já se espera que as perdas por condução sejam maiores no conversor flyback que possui processamento integral, pois se sabe que o transistor e o diodo possuem uma resistência quando se encontram em funcionamento, esta é associada às perdas por condução. Como as correntes que circulam nos semicondutores deste conversor são maiores do que as que circulam no modelo de processamento parcial, o esperado é que dissipe mais potência no MOSFET e no diodo.

Sabendo as tensões e correntes que circulam por cada elemento semicondutor, pode se fazer a escolha das chaves semicondutoras mais apropriadas para o circuito. Assim o transistor escolhido foi um MOSFET IRF744, já o diodo é do modelo STTA206S. A análise de perdas deve ser justa, logo os dois conversores devem utilizar os mesmo semicondutores.

Os modelos desenvolvidos para estudo do rendimento e de perdas foram efetuados por meio do *software* Psim, utilizando os elementos encontrados na aba *thermal module*, que consiste na análise das perdas nos semicondutores baseando-se no *datasheet* dos mesmos. Este módulo apresenta tanto as perdas por condução quanto às perdas por comutação, basta escolher a chave desejada.

Os componentes presentes no *thermal module* possuem saídas extras que servem para a conexão de amperímetros, por estes fluem as potências dissipadas pelo semicondutor, seja ela de comutação ou condução. O diodo tem duas saídas extras, uma para cada tipo de potência dissipada. O MOSFET possui quatro saídas extras, pois além do transistor possui um diodo em antiparalelo. Sendo assim, duas saídas pertencem ao diodo e duas ao transistor. A potência aferida pelo bloco é dada em Watts.

A Figura 4.3 apresenta o modelo utilizado para simular o conversor flyback considerando as perdas.

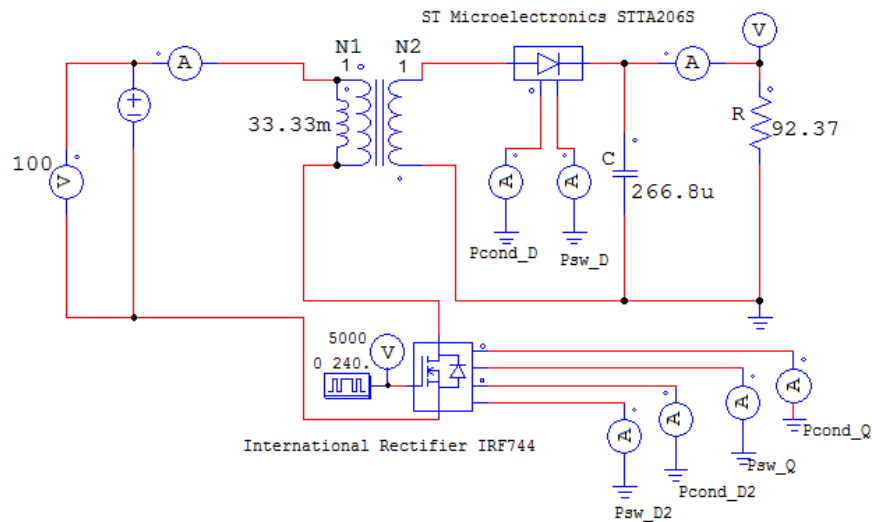


Figura 4.3: Diagrama de simulação do conversor flyback contemplando perdas nos semicondutores.

A resistência de carga foi alterada para compensar o rendimento do conversor e garantir a potência de saída do mesmo. A partir do diagrama apresentado na Figura 4.3, torna-se possível a obtenção dos valores das potências dissipadas pelos semicondutores.

Na Tabela 4.4 são apresentadas as potências de entrada, de saída e dissipadas. Essa tabela despreza a potência dissipada pelo diodo do MOSFET, por apresentar um valor desprezível.

Tabela 4.3: Potências e perdas referentes ao conversor flyback.

Grandeza	Representação	Valor
Potência de Entrada	$P_{IN}[W]$	417,888
Potência de Saída	$P_{OUT}[W]$	400,671
Potência dissipada por comutação no Diodo	$P_{SW_D}[W]$	127,700 m
Potência dissipada por comutação no MOSFET	$P_{SW_Q}[W]$	326,300 m
Potência dissipada por condução no Diodo	$P_{Cond_D}[W]$	4,330
Potência dissipada por condução no MOSFET	$P_{Cond_Q}[W]$	11,534
Rendimento do conversor	η	0,959

Para que seja realizada uma comparação entre as duas topologias, realizou-se também a simulação do conversor flyback com processamento parcial. Essa é representada pela Figura 4.4.

Assim como no caso anterior, a resistência de carga também foi alterada para garantir a potência de saída.

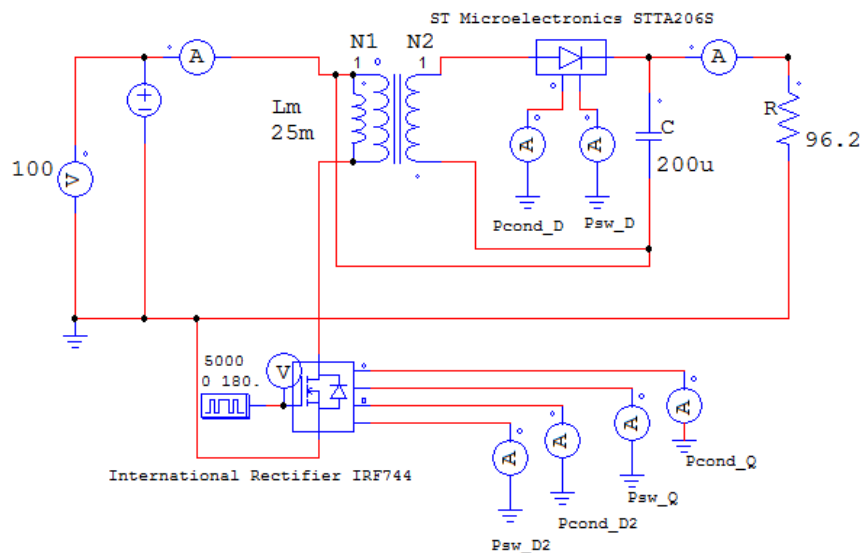


Figura 4.4: Diagrama de simulação do conversor flyback com processamento parcial de energia contemplando perdas nos semicondutores.

Baseando-se no esquemático apresentado na Figura 4.4, foi possível obter as potências dissipadas por cada componente semicondutor. Na tabela 4.4 são apresentadas as potências de entrada, saída e dissipadas pelo sistema.

Tabela 4.4: Potências e perdas referentes ao conversor flyback com processamento parcial de energia.

Grandeza	Representação	Valor
Potência de Entrada	$P_{IN}[W]$	408,051
Potência de Saída	$P_{OUT}[W]$	400,259
Potência dissipada por comutação no Diodo	$P_{SW_D}[W]$	55,230 m
Potência dissipada por comutação no MOSFET	$P_{SW_Q}[W]$	96,040 m
Potência dissipada por condução no Diodo	$P_{Cond_D}[W]$	4,000
Potência dissipada por condução no MOSFET	$P_{Cond_Q}[W]$	3,679
Rendimento do conversor	η	0,979

Utilizando os dados das Tabelas 4.3 e 4.4, desenvolveram-se os gráficos apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6.

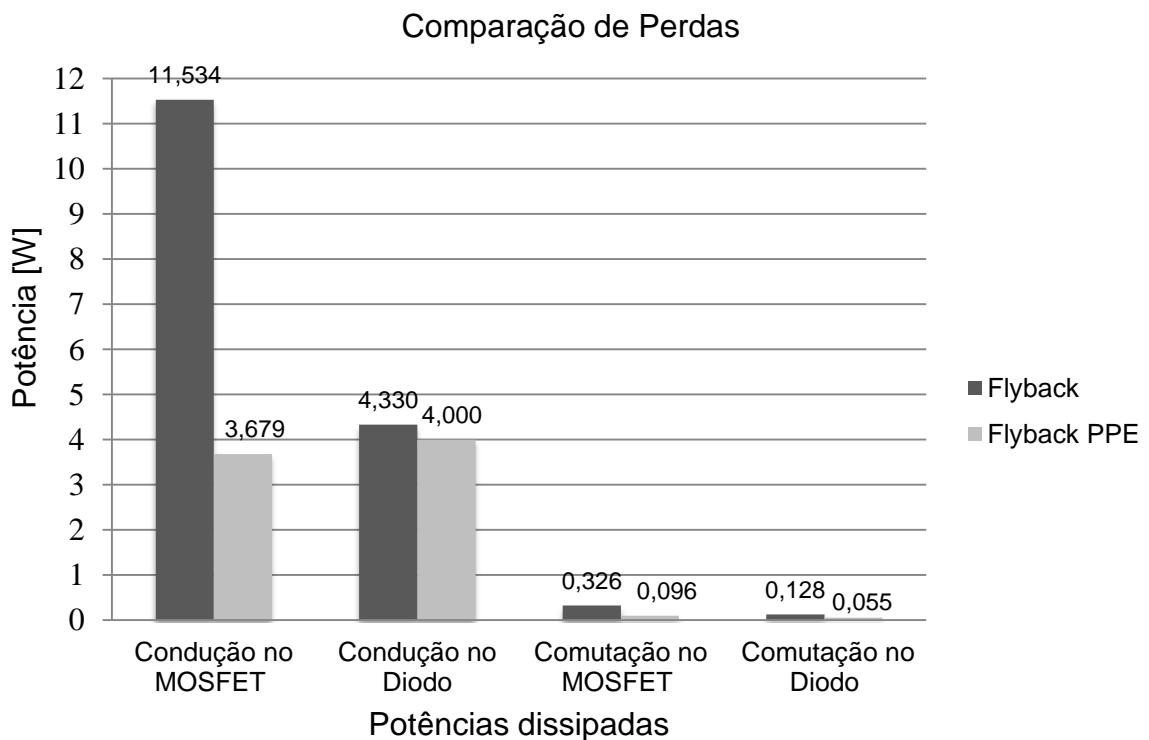


Figura 4.5: Comparação das potências dissipadas pelos semicondutores.

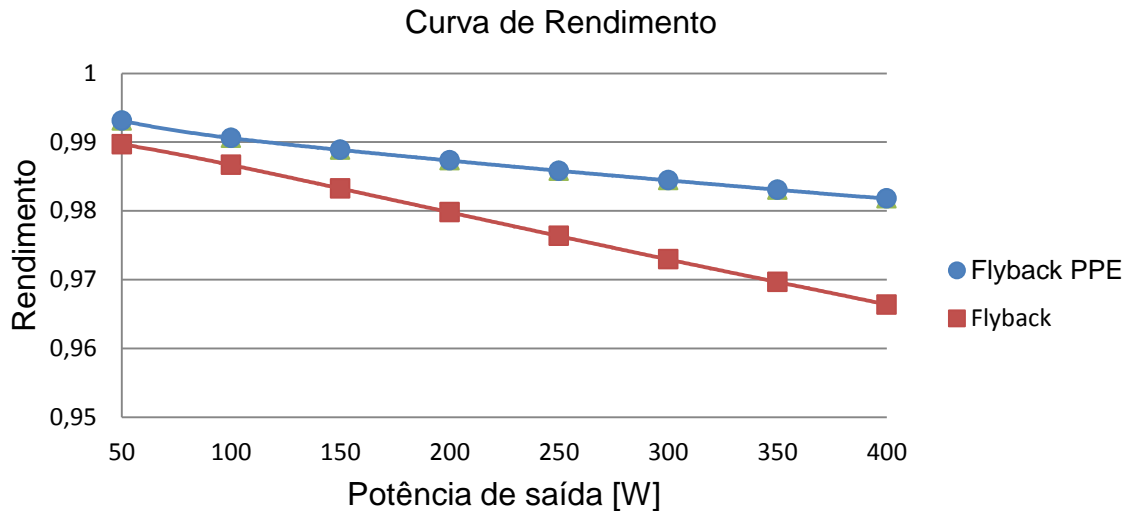


Figura 4.6: Curva de rendimento para determinados níveis de potências.

Assim, analisando a Figura 4.5 e observando o rendimento teórico dos conversores supracitados constata-se que o conversor flyback com processamento parcial de energia é a topologia que apresenta melhor desempenho, pois possui menos perdas em suas chaves semicondutoras. Este resultado é o esperado, pois como visto na Tabela 4.2 essa apresenta os menores esforços de corrente e tensão no MOSFET e no diodo.

4.3 Rastreamento de Máxima Potência.

Para fins de simulação, utilizou-se nesse trabalho a plataforma computacional Psim. Este programa possui diversos recursos muito eficientes para implementação de módulos fotovoltaicos, possibilitando a utilização de um modelo físico do módulo, através da ferramenta *Solar module*, que realiza a simulação de módulos com características reais fornecidas pelo fabricante, apresentando resultados condizentes com a realidade.

A utilização da ferramenta *solar module* é bastante simples, consiste em inserir as informações do datasheet do módulo no programa. Logo as simulações referentes ao rastreamento de máxima potência utilizarão o modelo físico do painel.

O método escolhido para obter o rastreamento de máxima potência é o Perturbe e Observe (P&O). Esse é de fácil implementação, além de ser uma das técnicas mais utilizadas para obtenção do PMP. A simulação do MPPT ocorrerá utilizando a ferramenta "C_BLOCK", nela é possível inserir um algoritmo, baseando-

se nas instruções desse o bloco irá realizar o rastreamento, podendo-se inserir diversas técnicas além da de perturbação e observação.

Um fato que deve se considerar é que quando um conversor CC/CC é aplicado ao MPPT, o controle de sua razão cíclica não é feito para manter a tensão na carga e sim, para permitir a máxima transferência de potência para sua saída. Neste contexto as variáveis de interesse, do ponto de vista do rastreamento de máxima potência são a tensão de entrada e a corrente de entrada.

O estudo será feito de maneira comparativa, observando o comportamento de ambas às topologias, considerando a eficácia do emprego destes conversores em dois níveis de radiação solar.

Para determinar os parâmetros dos conversores a serem utilizados é necessário especificar alguns parâmetros de projeto. Vale ressaltar que as especificações de entrada são equivalentes aos respectivos valores a um arranjo formado por módulos fotovoltaicos KD245GH-4FB apresentado pela Figura 2.8. As especificações do projeto estão disponibilizadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Especificações de projeto dos conversores aplicados ao MPPT.

Parâmetros	Conversor	
	Flyback PPE	Flyback
$P_{IN}[W]$	490	490
$V_{IN}[V]$	59,6	59,6
$I_{IN}[V]$	8,23	8,23
$V_{OUT}[V]$	120	120
$f_s[KHz]$	5	5
$\Delta V_C[V]$	1	1
$\Delta I_{LM}[A]$	0,4	0,4

Baseado nos conceitos apresentados, desenvolveu-se a determinação dos componentes do conversor flyback com PPE:

Determinação da razão cíclica:

$$D = \frac{(n_1) \cdot (V_{OUT} - V_{IN})}{(n_2) \cdot V_{IN} + (n_1) \cdot (V_{OUT} - V_{IN})} = \frac{(1) \cdot (120 - 59,6)}{(1) \cdot 59,6 + (1) \cdot (120 - 59,6)} = 0,503 \quad (4.3)$$

Determinação da indutância de conversor:

$$L_M = \frac{59,6 \cdot 0,503}{0,4 \cdot 5000} = 14,99 \text{ mH} \quad (4.4)$$

Determinação da capacitância do conversor:

$$C = \frac{0,503 \cdot (4,08)}{1 \cdot 5000} = 410,45 \text{ uF} \quad (4.5)$$

O conversor flyback também deve ter seus parâmetros calculados.

Determinação da razão cíclica:

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} + V_{OUT}} = \frac{120}{59,6 + 120} = 0,668 \quad (4.6)$$

Determinação da indutância de conversor:

$$L_M = \frac{59,6 \cdot 0,668}{0,4 \cdot 5000} = 19,91 \text{ mH} \quad (4.7)$$

Determinação da capacitância do conversor:

$$C = \frac{0,668 \cdot (4,08)}{1 \cdot 5000} = 545,09 \text{ uF} \quad (4.8)$$

Em posse desses parâmetros, torna-se possível a realização do modelo computacional, para que sejam efetuadas as análises em ambas as topologias.

Os modelos de simulação utilizarão a técnica de perturbação e observação executando uma variação na irradiação solar com $G = 1000 \text{ W/m}^2$ e $G = 200 \text{ W/m}^2$, essa será implementada computacionalmente na forma de uma função degrau.

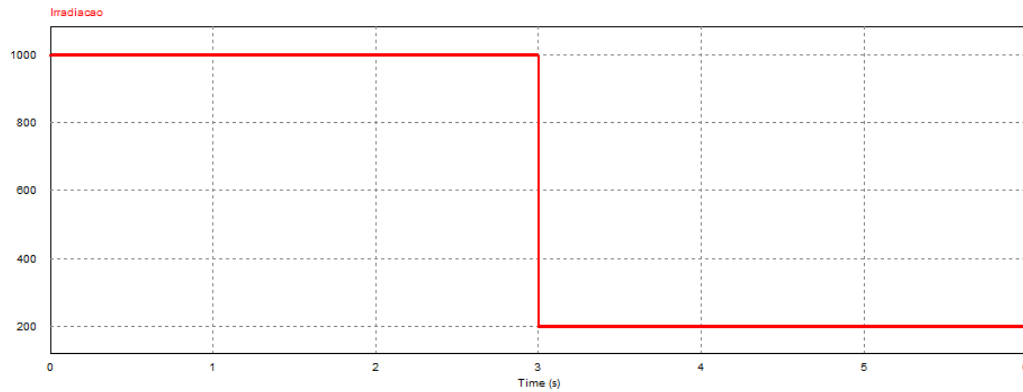


Figura 4.7: Degrau na radiação solar.

Embora esse não seja o modo como as reações ocorrem na prática, uma resposta adequada do sistema a este tipo de oscilação, garante o seu funcionamento também sobre perturbações mais lentas, como rampas.

Na Figura 4.8 é apresentado o esquemático que permite a operação do conversor flyback com processamento de energia aplicado ao rastreador de máxima potência.

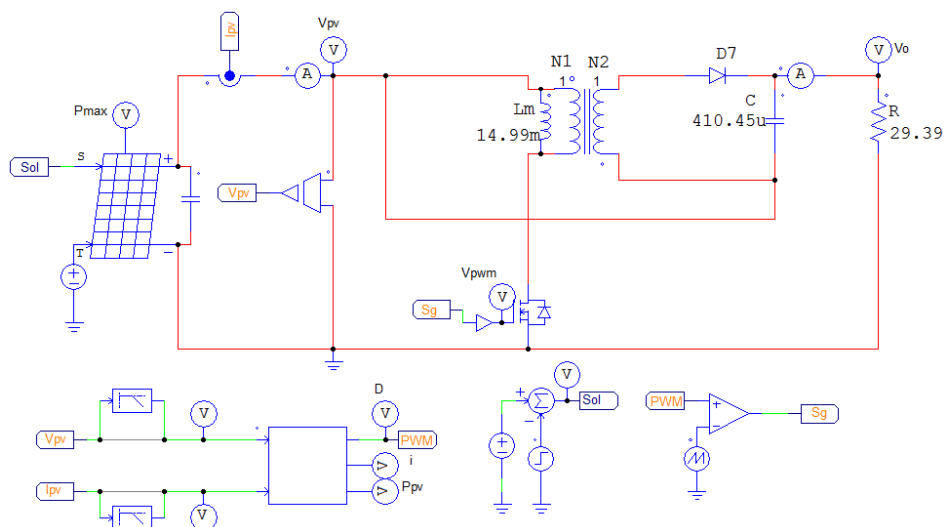


Figura 4.8: Diagrama de simulação do conversor flyback com processamento parcial aplicado ao MPPT.

A fim de se verificar o ponto de máxima potência do modelo diante das variações de radiação solar, são apresentados na Figura 4.9 os sinais de potência máxima (P_{max}), potência gerada pelo painel (P_{pv}) e tensão em seus terminais.

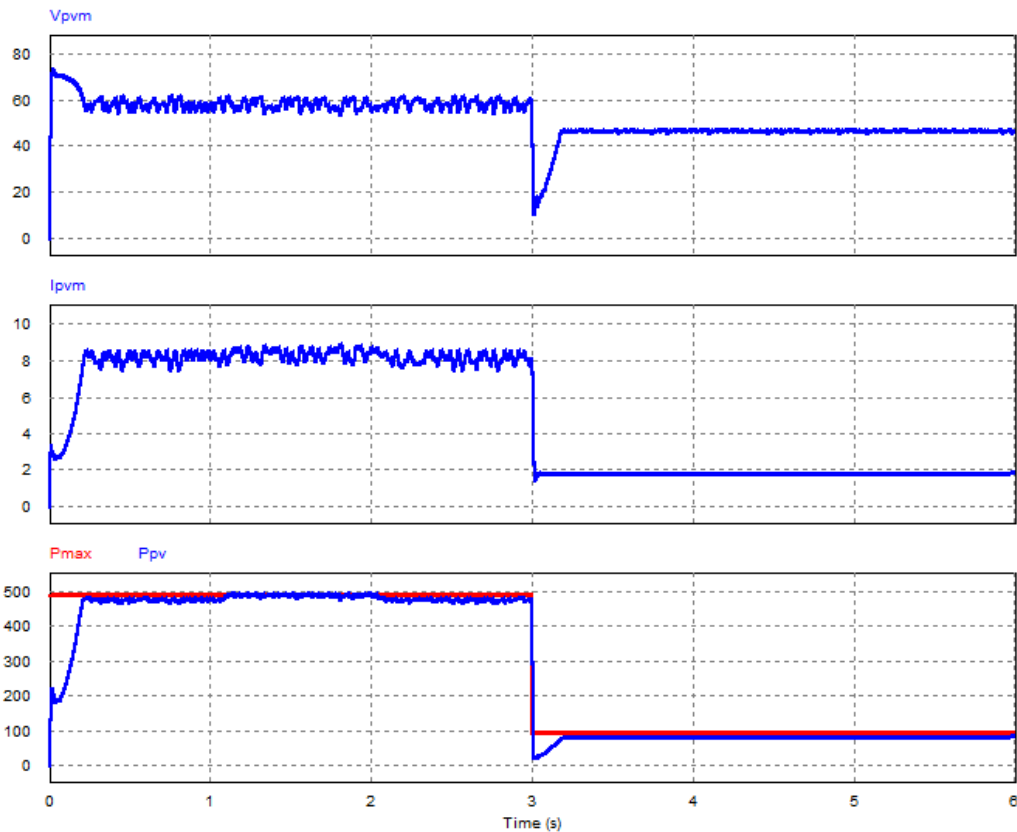


Figura 4.9: Formas de onda de tensão, corrente e potências obtidas pela simulação do conversor flyback com PPE atuando como rastreador de máxima potência.

Após analisar as curvas geradas, é possível concluir que a técnica de MPPT utilizada neste, promove uma boa eficiência na extração da máxima potência nas duas condições de radiação solar analisadas.

Para realizar uma análise justa, quanto ao rastreamento de máxima potência, todos os blocos utilizados na modelagem computacional do conversor flyback com processamento parcial, serão utilizados para realizar a simulação do conversor flyback com processamento integral, utilizando-se inclusive a mesma técnica de rastreamento. Na Figura 4.10 é apresentado o diagrama implementado para realizar a simulação do conversor flyback aplicado como circuito rastreador de máxima potência.

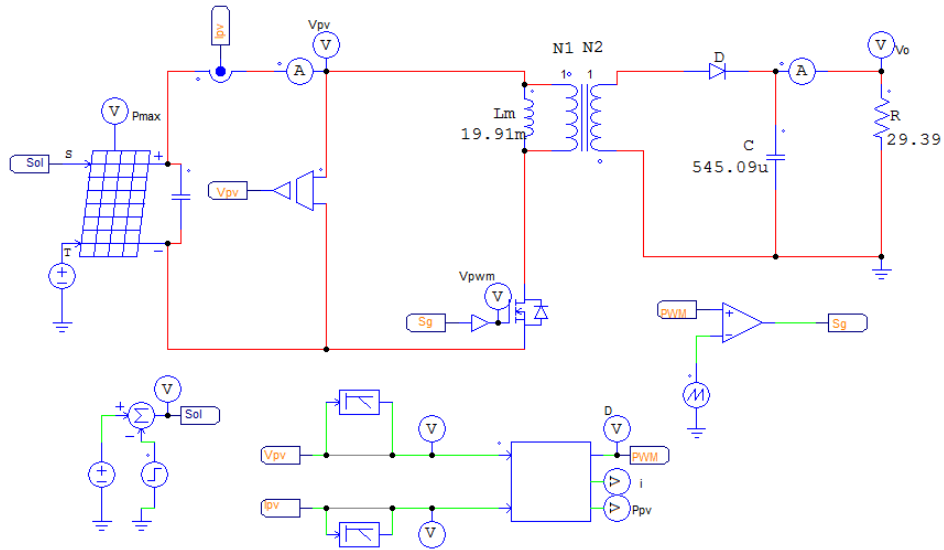


Figura 4.10: Diagrama de simulação do conversor flyback aplicado ao MPPT.

Para realizar a comparação entre os dois casos abordados são necessário plotar as curvas obtidas através da simulação do circuito apresentado pela Figura 4.10.

Na Figura 4.11 é possível observar as curvas referentes à potência máxima, potência gerada pelo painel, tensão e corrente.

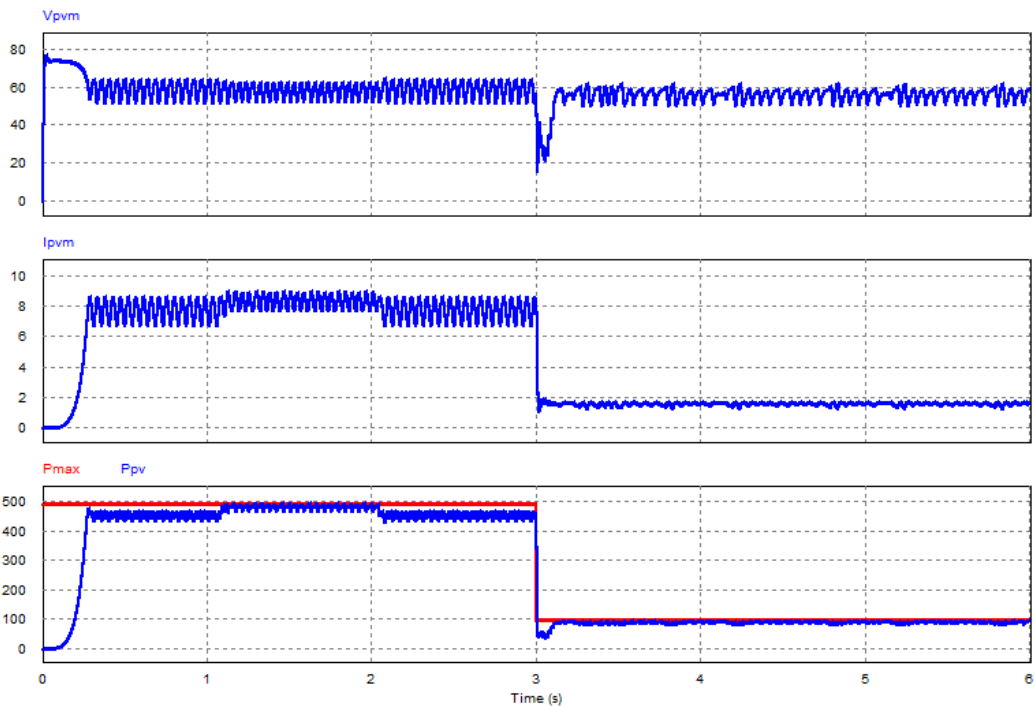


Figura 4.11: Formas de onda de tensão, corrente e potências obtidas pela simulação do conversor flyback atuando como rastreador de máxima potência.

Ao examinar as curvas representadas pelas Figuras 4.11 e 4.9 é possível constatar que ambos os modelos rastreiam de maneira adequada o ponto de máxima potência no painel. Pode-se observar uma variação entre os dois conversores utilizados para obter o MPPT. Nota-se que o conversor flyback com PPE não apresenta melhor o desempenho para todos os casos de radiação solar. Pode-se observar que o seu rendimento para o rastreamento com uma radiação de 1000 W/m^2 apresenta uma grande diferença ao comparado com o de 200 W/m^2 .

4.3.1 Estudo do rendimento global do sistema

Este estudo se dedica não somente ao rendimento do rastreamento do MPPT, mas também considera a potência entregue à carga do sistema. Deste modo não é apenas o rendimento do rastreamento que é de interesse, mas também o rendimento do conversor aplicado como circuito rastreador. Logo, será feita uma análise levando em consideração não somente o rendimento do rastreamento, como também o rendimento do conversor, assim obtendo o rendimento global do sistema. As perdas consideradas no circuito serão as perdas causadas pelos semicondutores existentes nele.

É válido ressaltar que as características de simulação e de projeto dos conversores serão as mesmas utilizadas para simular os circuitos da Figura 4.8 e 4.10. A Tabela 4.6 apresenta os níveis de corrente e tensão ao quais estão expostos os circuitos.

Tabela 4.6: Esforço nas chaves semicondutoras utilizadas no conversor aplicado como MPPT (1000 W/m²).

Parâmetro	Conversor	
	Flyback PP	Flyback
Corrente média no MOSFET	4,109A	7,952 A
Corrente eficaz no MOSFET	5,811A	9,891 A
Corrente máxima no MOSFET	8,361 A	12,479 A
Tensão reversa no MOSFET	120 V	179,6 V
Corrente média no diodo	4,090A	4,297 A
Corrente eficaz no diodo	5,785 A	7,264 A
Corrente máxima no diodo	8,334 A	12,459 A
Tensão reversa no diodo	120 V	179,6 V

Com base nos dados apresentados e na biblioteca existente no *software*, o diodo escolhido foi o Fairchild ISL9R3060G2, já o MOSFET é o do tipo IRFP460. As chaves semicondutoras escolhidas foram utilizadas em ambos os circuitos. Logo, o próximo passo é realizar a análise computacional dos rastreadores de máxima potência. A Figura 4.12 mostra o diagrama utilizado para realizar a simulação do conversor flyback com PPE, contemplando as perdas nos semicondutores do circuito.

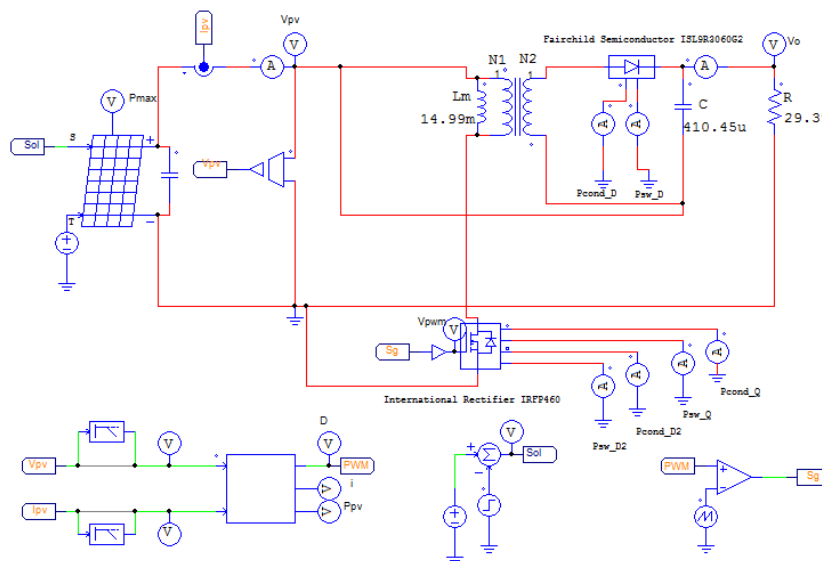


Figura 4.12: Diagrama de simulação do conversor flyback com PPE considerando perdas e atuando como MPPT.

Através desse diagrama é possível obter as curvas referentes à potência gerada pelo painel, a potência na carga e a máxima potência que pode ser gerada.

Na Figura 4.13 é possível observar as curvas referentes às potências do painel.

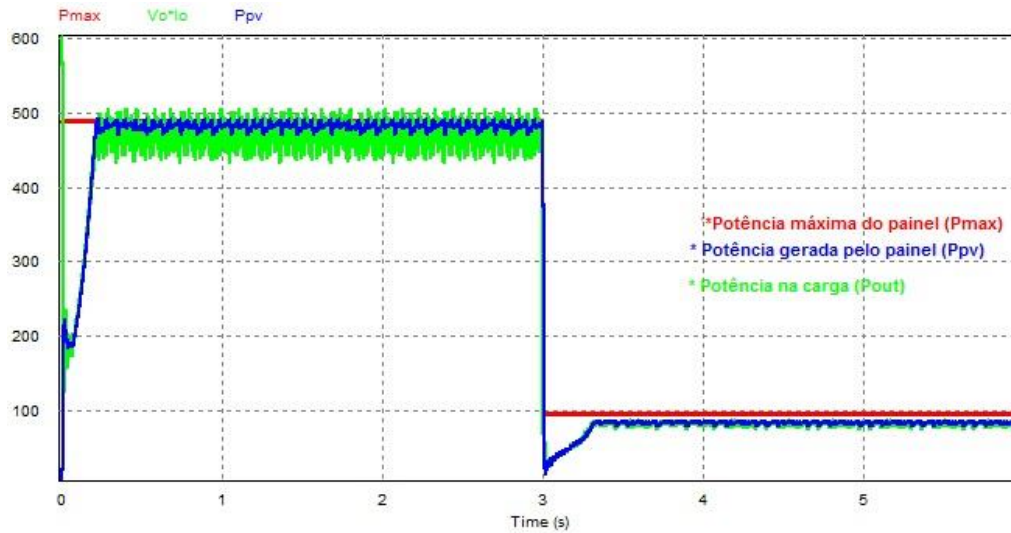


Figura 4.13: Curvas de potência do painel fotovoltaico, utilizando um conversor flyback com PPE como MPPT.

Para fins de comparação, realizou-se também um modelo computacional para simular o conversor flyback considerando as perdas e atuando como circuito rastreador de máxima potência. Esse diagrama pode ser visto na Figura 4.14.

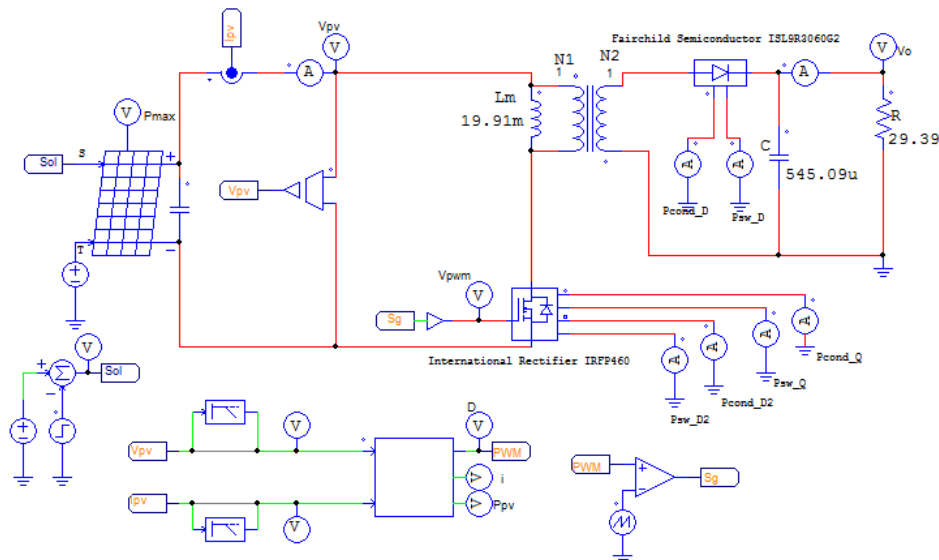


Figura 4.14: Diagrama de simulação do conversor flyback considerando perdas e atuando como MPPT.

Este modelo permitiu à obtenção das características de potência do circuito para que assim pudesse realizar seu estudo. A Figura 4.15 apresenta os gráficos referentes à potência máxima, potência gerada pelo painel e potência de saída do conversor.

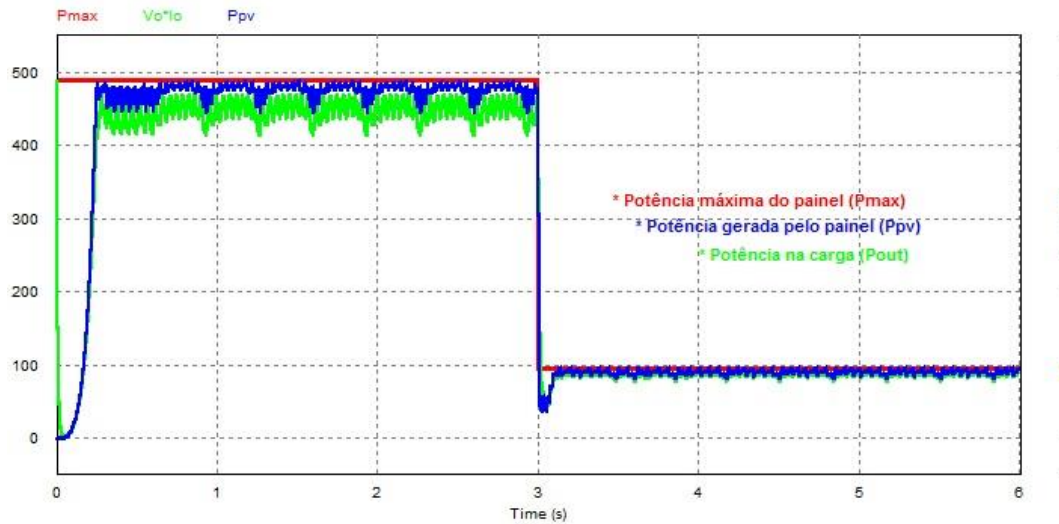


Figura 4.15: Curvas de potência do painel fotovoltaico, utilizando um conversor flyback como MPPT.

Observando as curvas obtidas através da simulação de ambos os conversores aplicados como circuito rastreador de máxima potência, é visível a diferença entre o rendimento global dos sistemas.

No entanto, para elucidar onde ocorrem as perdas no modelo de simulação são apresentadas as Figuras 4.16 e 4.17, que comparam as perdas nos semicondutores em ambos os métodos de processamento, para os dois casos de radiação solar.

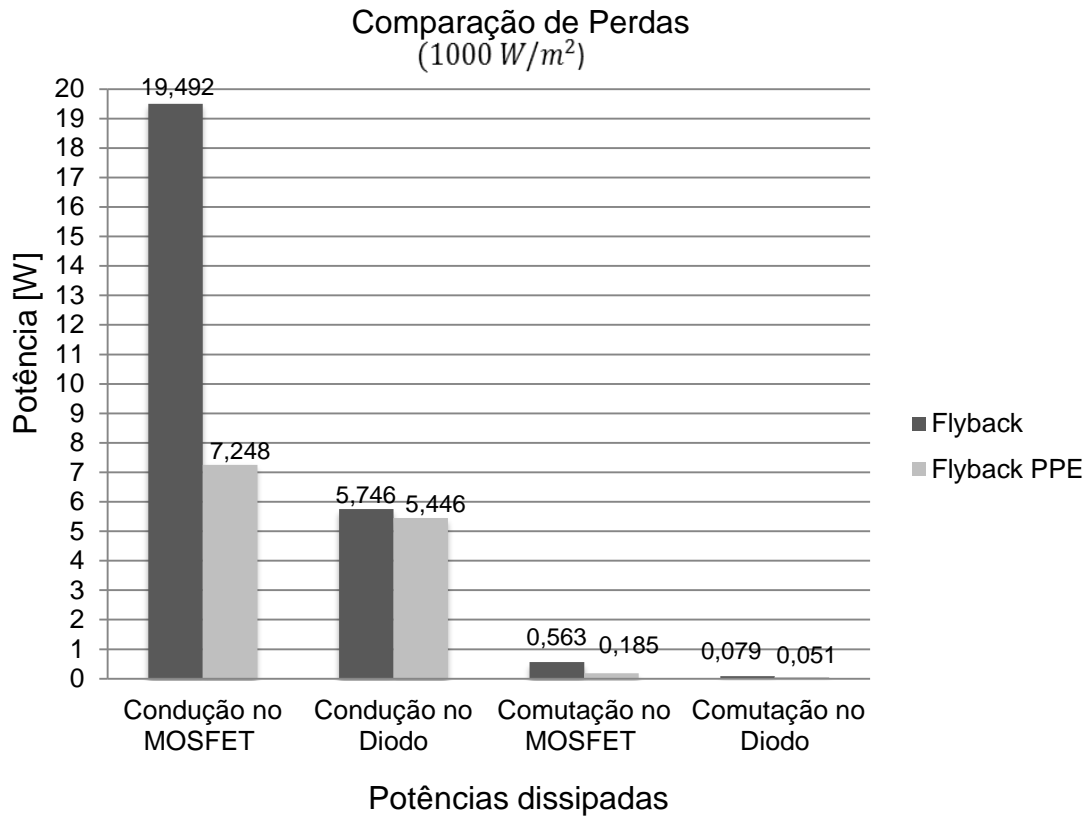


Figura 4.16: Potências dissipadas pelos semicondutores com irradiação de 1000 W/m².

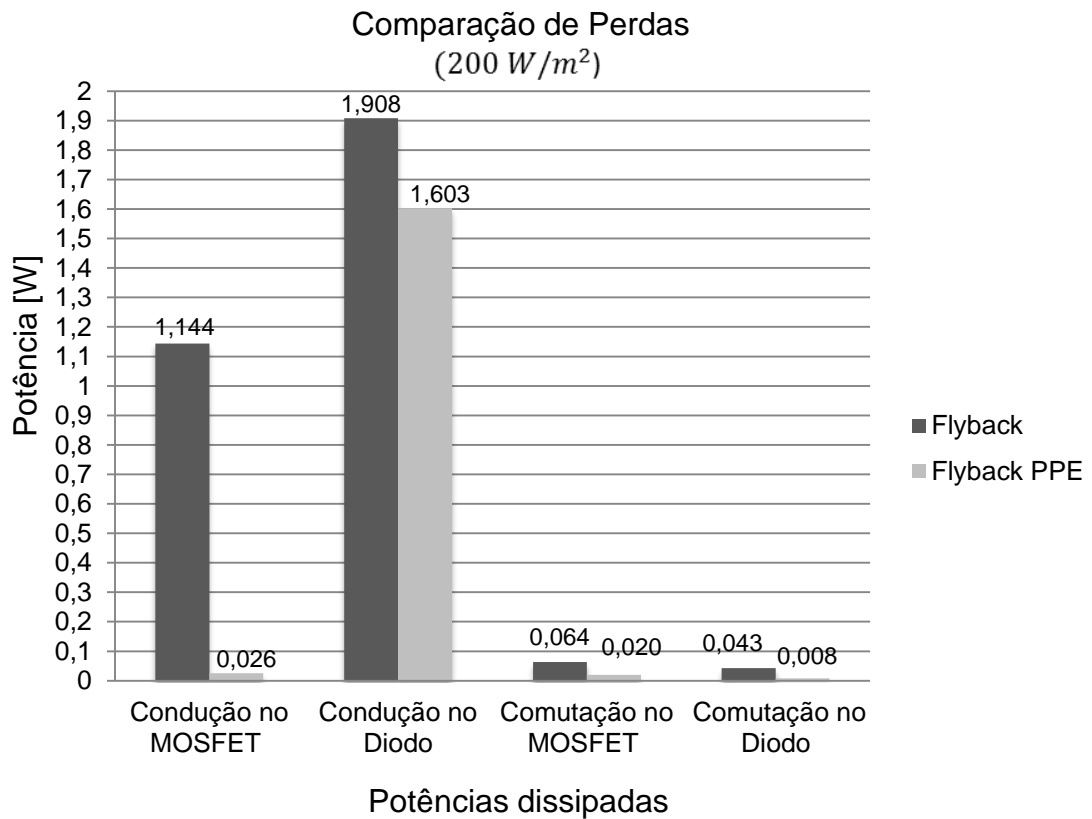


Figura 4.17: Potências dissipadas pelos semicondutores com irradiação de 200 W/m².

Para obter um resultado mais aprofundado é necessário ter a dimensão da eficiência do sistema, desta maneira a Tabela 4.7 apresenta os valores do rendimento global de ambos os conversores. A partir desta pode-se ter uma melhor observação e assim construir uma parecer mais contundente sobre o desempenho dos métodos.

Tabela 4.7: Eficiência global dos conversores aplicados ao MPPT.

Conversor	Radiação Solar	
	1000 W/m ²	200 W/m ²
Flyback PPE	97,37%	98,06%
Flyback	94,42%	936,63%

Os valores apresentados pela Tabela 4.7, encontram-se dentro da faixa esperada. Tendo em consideração os valores de rendimento de rastreamento e a eficiência de cada conversor.

Assim, se pode considerar que a utilização de um conversor flyback com processamento parcial de energia é uma excelente alternativa tanto para extração de máxima potência do sistema fotovoltaico, quanto para transferir a potência rastreada para a carga.

4.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados conceitos importantes, como as perdas decorrentes dos semicondutores do conversor e o desenvolvimento do projeto de rastreamento de máxima potência do arranjo, para isso utilizaram-se simulações por meio da plataforma Psim.

O funcionamento do rastreamento de máxima potência determina os ganhos relacionados ao rendimento do circuito. No entanto, o conversor também apresenta uma eficiência que depende de seus parâmetros, sendo eles capacitores, indutores, diodos e transistores. Assim se realizou um estudo considerando as perdas causadas pelos semicondutores de potência, acrescentando também na análise a potência entregue à carga. Desse modo se pode ter uma visão da eficiência global do sistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi o estudo e projeto de um do conversor flyback com processamento parcial de energia atuando no modo MCC, com a finalidade de se obter um elevado rendimento no processamento de energia gerada em um arranjo solar fotovoltaico em que este estivesse inserido.

Entre as diversas possibilidades de desenvolvimento de conversores para sistemas fotovoltaicos, a estrutura de processamento parcial é interessante, pois sugere que a saída do conversor seja conectada em série com sua entrada [1]. Assim, a potência de entrada terá um caminho alternativo para que possa fluir. Esse caminho possui rendimento unitário não apresentando perdas, permitindo que a potência passe diretamente para a saída sem que seja processada pelo conversor estático, assim não sofrendo perdas causadas por seus componentes [10].

A revisão bibliográfica existente ainda apresenta-se bastante confusa quanto a este método de processamento. Então, se optou por fazer uma comparação entre o um conversor utilizando este conceito e o mesmo conversor com um processamento integral. Isso possibilitou uma análise comparativa, para se ter parâmetros ao avaliar os dados obtidos durante as simulações.

O estudo do conversor flyback com processamento parcial foi feito baseando-se nos conhecimentos sobre o conversor flyback. Através desse foi possível dimensionar os componentes utilizados para montagem do modelo de simulação.

Tanto as análises considerando as perdas nos semicondutores, quanto o MPPT foram realizados utilizando ferramentas disponíveis no *software* Psim. Essas ferramentas foram de grande importância para tornar possível a análise do circuito e a realização do trabalho.

Ao observar as perdas no conversor flyback com PPE, pode-se constatar por meio de simulação que o mesmo apresenta menos potência dissipada em suas chaves semicondutoras. Ao estudar seu rastreamento de máxima potência, este também apresentou uma excelente eficiência, para altos valores de radiação solar. Esse bom resultado se repetiu ao avaliar o rendimento global do sistema considerando a potência na carga.

Apesar de o PPE apresentar-se uma topologia adequada, o fato de ser aplicado em um conversor isolado como neste estudo, faz com que o conversor perca sua característica de isolamento.

A monografia alcançou os objetivos propostos e a pesquisa foi importante para investigar as estruturas de conversores eletrônicos de potência voltados para o processamento de energia solar fotovoltaica mais eficiente.

REFERÊNCIAS

- [1] AGAMY, M.S.; et. al. "An Efficient Partial Power Processing DC/DC Converter for Distributed PV Architectures," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.29, no.2, pg.674,686, Fev. 2014
- [2] SOBREIRA, A. P. Conversor CC-CC boost entrelaçado aplicado no processamento de energia de arranjo solar fotovoltaico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.
- [3] COELHO, R. F. Estudo dos Conversores buck boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência em Sistemas Solares Fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Instituto de Eletrônica de Potência, Florianópolis, 2008.
- [4] ROSEMBACK, R. H. Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004.
- [5] RESERVAS atuais de petróleo devem se esgotar em 40 anos. *Revista Em Discussão*, Abril 2010. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/revista-em-discussao-edicao-abril-2010/noticias/reservas-atuais-de-petroleo-devem-se-esgotar-em-40-anos-p3.aspx>>. Acesso em: 9 Outubro 2014.
- [6] MACHADO, A. P. Modelagem e controle de conversores estáticos fontes de tensão utilizados em sistemas de geração fotovoltaicos conectados a rede elétrica de distribuição. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.
- [7] PATEL, M. R. *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press - New York, 1999.; BAILONA, Baltazar Agenor et al. *Análise de tensões em tubulações industriais: para engenheiros e projetistas*. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- [8] CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. *Eletrônica de Potência*, v.13, Agosto 2008.
- [9] Huimin Zhou; Junjian Zhao; Yehui Han, "PV Balancers: Concept, Architectures, and Realization," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.30, no.7, July 2015.
- [10] Zientarski, J. R.; Hey, H. L. Uma discussão sobre o processamento parcial de potência em conversores CC-CC. In: *Seminário de Eletrônica de Potência Controle*, IX. Santa Maria, 2014, *anais...* Santa Maria, UFSM, 2014.
- [11] D. R. Carrijo, R. S. Ferreira, S. C. Guimarães Jr., J. R. Camacho. "Uma Proposta de Técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de um Painel Fotovoltaico". XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito-MS. Setembro de 2010.

- [12] Spaduto, R. R.; Freitas, L. C. Estudo de técnicas de MPPT em sistemas fotovoltaicos. . In: Conferência de Estudo em Engenharia Elétrica, XI. Uberlândia, 2013, *anais...* Uberlândia: UFU, 2013.
- [13] HUSSEIN, K. H.; HOSHINO, T. OSAKADA, M. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. IEE Generation, Transmission and Distribution, United Kingdom, v. 142, n. 1, p. 59-64, 1995.
- [14] ERICKSON, R. W. Fundamentals of Power Eletronics. University of Colorado Boulder, Co.
- [15] BARBI, I. Eletrônica de Potência. Projetos de Fontes Chaveadas. 4. ed. Florianópolis: Edição do autor. 2001.
- [16] BARBI, I. Eletrônica de Potência. Conversores CC-CC Básicos não Isolados. 2. ed. Florianópolis: Edição do autor. 2006. 377 p.
- [17] Tofoli, F. L.; et. al. Utilização de um critério simples para comparação de desempenho de conversores estáticos de potência estudados em cursos de graduação em engenharia elétrica. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia,XLI., 2014, Juiz de Fora, *anais...* Juiz de Fora: ABENGE, 2014.
- [18] Lirio, L. A. Contribuições para Análise de Perdas em Conversores de Potência com MOSFET. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.