

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CAMPUS CURITIBA**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA – ÊNFASE ELETROTÉCNICA**

**JORGE BRANCALIONE DA SILVA**  
**LUIS GUSTAVO DUARTE**

**APLICAÇÃO DE UM CONVERSOR SEPIC MODIFICADO EM  
SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA DE BAIXA POTÊNCIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2015**

**JORGE BRANCALIONE DA SILVA**  
**LUIS GUSTAVO DUARTE**

**APLICAÇÃO DE UM CONVERSOR SEPIC MODIFICADO EM  
SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA DE BAIXA POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica - Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Roger Gules, Dr. Eng.

**CURITIBA**

**2015**

**JORGE BRANCALIONE DA SILVA**

**LUIS GUSTAVO DUARTE**

## Aplicação de um Conversor SEPIC Modificado em Sistema de Geração Eólica de Baixa Potência

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 12 de fevereiro de 2015.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.

Coordenador de Curso

Engenharia Industrial Elétrica Ênfase Eletrotécnica

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre

Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso

de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase Eletrotécnica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Roger Gules, Dr.

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Alceu André Badin, Dr.

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Eduardo Felix Ribeiro Romaneli, Dr.

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Roger Gules, Dr.

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## RESUMO

DA SILVA, Jorge B.; DUARTE, Luis G. **Aplicação de um Conversor SEPIC Modificado em Sistema de Geração Eólica de Baixa Potência**. 2015. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo principal desenvolver um estudo do comportamento de um conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético alterado aplicado a um gerador eólico de pequeno porte. Para tanto, estudou-se meios de obter maior aproveitamento da energia gerada, através do uso de conversores. Em busca de resultados como alto ganho estático com valores reduzidos de razão cíclica e tensão na chave baixa em relação a tensão de saída. O estudo partiu das topologias usuais de conversores CC-CC, assim como do conversor SEPIC em sua forma original, até chegar na topologia utilizada. Como forma de análise qualitativa, foram feitas simulações do circuito e posteriormente deu-se início à fase de projeto, para então seguir com a implementação do circuito. No decorrer dos testes experimentais, as formas de onda dos componentes do circuito foram capturadas em diversas situações e apresentadas como forma de resultados. Finalmente, foi desenvolvido um estudo comparativo entre os resultados obtidos e o estudo teórico da topologia proposta, concluindo-se que o conversor comportou-se conforme o esperado, apresentando um alto ganho estático com baixas tensões, porém, o rendimento foi inferior a 90% para potências próximas de 100 W.

Palavras-chave: Sistema eólico de pequeno porte, conversor, conversor CC-CC, SEPIC modificado, alto ganho estático, baixa razão cíclica.

## ABSTRACT

DA SILVA, Jorge B.; DUARTE, Luis G. **Application of a modified SEPIC converter on low power wind generation systems**. 2015. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

This final course paper has the objective of develop studies about the behavior of a modified SEPIC converter with an altered magnetic coupling used with a small wind power system. To that end, it was studied means of getting a higher performance of energy gain, through the use of converters. Looking for results such as high static gain with reduced values of duty cycle and a low voltage value on the key compared to the output voltage. The study started on the usual topologies for DC-DC converters, as well as the SEPIC converter on its original topology and went on until it reached the proposed topology. For a qualitative analysis, simulations of the circuit were performed, and after that took place the circuit design phase, followed by the practical implementation of the circuit. During the experimental tests, the waveforms over several circuit components were captured in a variety of situations, and were presented on the results section. Finally, it was developed a comparative study between the results obtained on the experimental tests against the theoretical study of the proposed topology, concluding that the converter behaved as expected, with a high static gain for low voltages, but the efficiency was less than 90% for potencies clos to 100 W.

Keywords: Small Wind Power System, converter, DC-DC Converter, modified SEPIC, high static gain, low duty-cycle.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade instalada total.....	11
Figura 2 - Distribuição geográfica das fazendas eólicas em operação e construção até o final de 2013.....	12
Figura 3 - Esquema de ligação do gerador à rede .....	16
Figura 4 - Conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético e elevado ganho estático.....	17
Figura 5 - Variação da potência disponível em relação à velocidade do vento .....	23
Figura 6 - Alguns componentes de um AGPP.....	24
Figura 7 - Gerador excitado através de ímã permanente.....	25
Figura 8 - Ilustração das forças atuantes e do ângulo de incidência.....	26
Figura 9 - Fluxo de vento através de uma turbina eólica.....	27
Figura 10 - Potência do vento e máxima potência possível de ser extraída de uma turbina eólica.....	28
Figura 11 - Curva do coeficiente de potência $C_p$ em função da velocidade do vento .....	29
Figura 12 - Curva de potência de uma turbina eólica.....	30
Figura 13 - Representação da potência disponível no vento, da máxima potência teoricamente extraível por uma turbina eólica e a potência real produzida por uma turbina eólica comercial.....	31
Figura 14 - Potência elétrica de saída típica e característica de rotação de um aerogerador com velocidade constante .....	32
Figura 15 - Curva de potência e velocidade rotacional de um aerogerador de velocidade variável.....	33
Figura 16 - Diagrama da interligação do AGPP com a rede elétrica.....	34
Figura 17 - Principais funções dos conversores estáticos.....	35
Figura 18 - Ponte de Graetz com fonte de corrente .....	37
Figura 19 - Formas de onda ponte de Graetz .....	37
Figura 20 - Modelo simplificado do circuito final.....	38
Figura 21 - Representação simplificada de um conversor CC-CC.....	39
Figura 22 - Possíveis casos de potência em um aerogerador .....	43
Figura 23 - Fluxograma simplificado do método HCS .....	44
Figura 24 - Circuito equivalente do conversor SEPIC .....	46
Figura 25 - Modificação do conversor SEPIC .....	47
Figura 26 - 1ª Etapa de funcionamento do conversor SEPIC modificado .....	48
Figura 27 - 2ª Etapa de funcionamento do conversor SEPIC modificado .....	48
Figura 28 - Ganho estático x razão cíclica .....	49
Figura 29 - Conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético.....	50
Figura 30 - Conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético e multiplicador de tensão.. .....	50
Figura 31 - Primeira etapa de operação.....	51
Figura 32 - Segunda etapa de operação.....	52
Figura 33 - Terceira etapa de operação .....	52
Figura 34 - Quarta etapa de operação .....	53
Figura 35 - Quinta etapa de operação.....	53
Figura 36 - Formas de onda condução contínua.....	54
Figura 37 - Curva de ganho estático em função da razão cíclica.....	55

Figura 38 - Nova configuração de conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético.....	56
Figura 39 - 1ª Etapa de funcionamento da nova configuração.....	57
Figura 40 - 2ª Etapa de funcionamento.....	57
Figura 41 - 3ª Etapa de funcionamento.....	58
Figura 42 - 4ª Etapa de funcionamento.....	59
Figura 43 - 5ª Etapa de funcionamento.....	59
Figura 44 - Etapa de potência da topologia proposta.....	61
Figura 45 - Circuito de comando em malha aberta.....	61
Figura 46 - Correntes e tensões nas três fases do gerador (corrente multiplicada por 2).....	62
Figura 47 - Formas de onda de $V_i$ , $V_o$ e $V_s$ em malha aberta.....	62
Figura 48 - Formas de onda $V_s$ e $I_s$ em malha aberta.....	62
Figura 49 - Espectro harmônico do sistema.....	63
Figura 50 - Circuito de comando em malha de corrente.....	63
Figura 51 - Correntes e tensões nas três fases do gerador (corrente multiplicada por 5).....	64
Figura 52 - Formas de onda $V_i$ , $V_o$ e $V_s$ com malha de corrente.....	64
Figura 53 - Espectro harmônico do sistema com malha de corrente.....	64
Figura 54 - Formas de onda $V_s$ e $I_s$ com malha de corrente.....	65
Figura 55 - Conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético e circuito <i>snubber</i> .....	72
Figura 56 - Tensão (CH1) e corrente (CH4) de entrada e tensão de saída (CH2)...	73
Figura 57 - Tensão (CH1) e corrente (CH4) na chave e tensão de saída (CH3).....	73
Figura 58 - Tensão (CH2) e corrente (CH4) na chave no início da condução.....	74
Figura 59 - Corrente zero no início da condução.....	74
Figura 60 - Tensão (CH2) e corrente (CH4) na chave no término da condução.....	75
Figura 61 - Corrente em $DM2$ (CH2) e $D_o$ (CH4) e tensão de saída (CH3).....	75
Figura 62 - Corrente em $L1$ (CH2) e $CS1$ (CH4) e tensão de saída (CH3).....	76
Figura 63 - Corrente em $L2S$ (CH2) e $L2P$ (CH4) e tensão de saída (CH3).....	76
Figura 64 - Tensão em $CM$ (CH2), $CS1$ (CH3) e $CS2$ (CH4).....	77
Figura 65 - Curva ganho estático x razão cíclica.....	78
Figura 66 - Tensão (CH4) e corrente (CH2) na entrada, corrente na saída (CH1) e tensão na chave (CH3).....	79
Figura 67 - Tensão (CH4) e corrente (CH2) na entrada, corrente na saída (CH1) e tensão na chave (CH3).....	80
Figura 68 - Fator de potência com variac monofásico.....	80
Figura 69 - Fator de potência com variac trifásico (sem capacitor na entrada).....	81
Figura 70 - Fator de potência com variac trifásico (com capacitor na entrada).....	81
Figura 71 - Resposta transitória.....	82
Figura 72 - Resposta transitória com escala de tempo menor.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consolidado dos leilões .....	12
Tabela 2 - Estatísticas dos leilões .....	13
Tabela 3 - Conversores CC-CC não isolados .....	45
Tabela 4 - Parâmetros do SEPIC modificado com acoplamento magnético alterado .....	70
Tabela 5 - Componentes do SEPIC modificado com acoplamento magnético alterado .....	71
Tabela 6 - Valores obtidos de tensão entrada e saída e calculados .....	77
Tabela 7 - Leituras do rendimento .....	78



## LISTA DE SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
AGPP	Aerogerador de pequeno porte
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena central hidrelétrica
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PWM	<i>Pulse-width Modulation</i>
UHE	Usina hidrelétrica de energia

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
LER	Leilão de Energia Reserva
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
REIDI	Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura
SEPIC	<i>Single-ended primary-inductor converter</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1.	TEMA .....	14
1.1.1.	Delimitação do tema .....	15
1.2.	PROBLEMA E PREMISSAS .....	17
1.3.	OBJETIVOS .....	18
1.3.1.	Objetivo geral .....	18
1.3.2.	Objetivos específicos .....	18
1.4.	JUSTIFICATIVA .....	19
1.5.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	20
1.6.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
2	ENERGIA EÓLICA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	22
2.1.	POTÊNCIA DISPONÍVEL NO VENTO .....	22
2.2.	AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE (AGPP) .....	24
2.2.1.	Gerador .....	24
2.2.2.	Pás .....	25
2.2.3.	Rotor .....	26
2.3.	POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO POR UMA TURBINA EÓLICA X POTÊNCIA DISPONÍVEL NO VENTO .....	27
2.4.	VELOCIDADE CONSTANTE X VELOCIDADE VARIÁVEL .....	31
2.5.	GERAÇÃO PADRONIZADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE CONVERSORES ESTÁTICOS .....	33
3	CONVERSORES .....	35
3.1.	INTRODUÇÃO .....	35
3.2.	CIRCUITO RETIFICADOR .....	36
3.3.	CONVERSORES CC-CC .....	39
3.3.1.	Revisão Controle Conversores .....	40
3.3.2.	Classificação dos conversores CC-CC quanto à topologia e ao ganho estático. ....	45
3.3.3.	Conversor CC-CC SEPIC .....	46
3.3.4.	Conversor CC-CC SEPIC modificado sem acoplamento magnético ....	47
3.3.5.	Conversor CC-CC SEPIC modificado com acoplamento magnético ....	49
4	APRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR UTILIZADO .	56
4.1.	ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DA CONFIGURAÇÃO .....	56
5	ESTUDO QUALITATIVO DO CONVERSOR EM OPERAÇÃO .....	61
5.1.	SIMULAÇÕES OPERANDO EM MALHA ABERTA .....	61
5.2.	SIMULAÇÕES OPERANDO COM MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE .....	63
6	PROJETO .....	66
6.1.	CÁLCULO DOS COMPONENTES .....	66
7	EXPERIMENTAÇÕES .....	66
7.1.	TESTES OPERANDO EM MALHA ABERTA. <b>Erro! Indicador não definido.</b>	

7.2.	TESTES COM MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE	<b>Erro!</b>	<b>Indicador</b>
	<b>não definido.</b>		
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....		83
	REFERÊNCIAS.....		85

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização da força dos ventos como fonte de energia comercial, se acentuou apenas na década de 1970, quando a Crise do Petróleo atingia seu ápice e o mundo se deu conta da limitação dos combustíveis fósseis. Países europeus e os EUA se interessaram no investimento de fontes alternativas para a produção de energia elétrica em substituição ao petróleo e ao carvão, com o intuito de diminuir a dependência destes recursos. Em 1976, na Dinamarca, ocorreu a integração da primeira turbina eólica comercial à uma rede pública (ENERCOM, 2013).

No Brasil o primeiro indício de energia eólica ocorreu em 1992 com o início da operação comercial do primeiro aerogerador instalado no Brasil, de 225kW de potência. Parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) com financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês Folkcenter, esta foi a primeira turbina a entrar em operação comercial na América do Sul (ABEEólica, 2013).

No entanto, no Brasil, só houve preocupação com fontes alternativas de energia no país após o racionamento de energia ocorrido em 2001, aumentando os investimentos governamentais para pesquisa na área de geração alternativa (OLIVEIRA, 2010). Em 2001, na tentativa de incentivar a contratação de empreendimentos de geração de energia eólica no país, foi criado o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA), com o objetivo de contratação de 1050MW de projetos eólicos até dezembro de 2003. Sem resultados o PROEÓLICA foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA.

O uso do vento como fonte para produção de energia elétrica teve grande impulso nos anos noventa, através de vários programas executados em diversos países, que motivaram investimentos e pesquisas. Isso resultou num significativo desenvolvimento tecnológico de métodos e equipamentos. Um número expressivo de fabricantes de turbinas eólicas surgiu no mercado e, rapidamente, melhorou o desempenho e diminuíram os custos das turbinas eólicas (CUSTÓDIO, 2009).

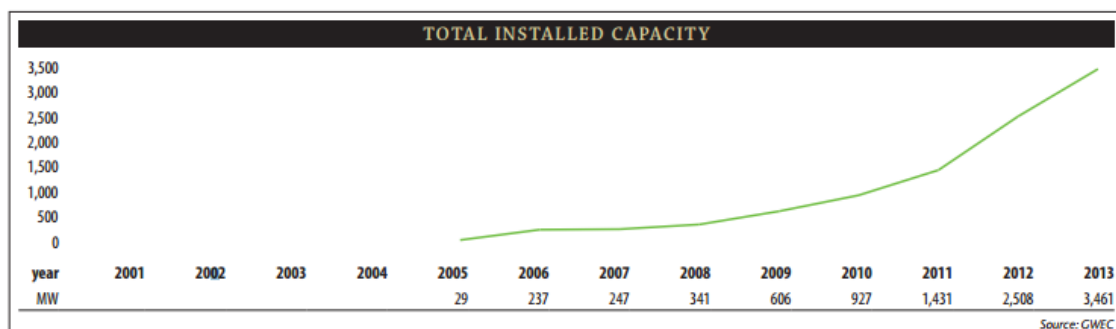
Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a energia eólica teve um grande crescimento com a virada do Século XXI, ao final de 2011 a capacidade instalada no mundo era de 238GW, no final de 2000 a capacidade instalada era de

18GW. Somente em 2011 aproximadamente 41GW foram adicionados. Nos últimos anos o centro de crescimento de energia eólica se moveu da Europa e América do Norte para a Ásia, que emergiu como o líder global.

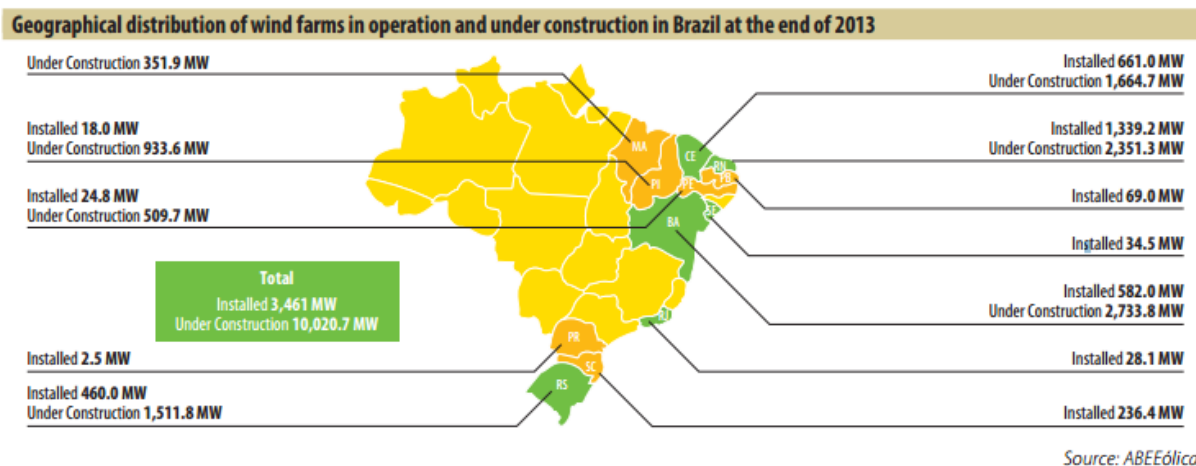
A China se tornou o líder em capacidade total instalada em muito pouco tempo, passando a frente dos EUA em 2010. Algumas medidas políticas e programas recentes surgiram em apoio ao mercado de energia eólica, além de muitos desenvolvimentos de novas políticas sobre geração *off-shore*. Dez países europeus concordaram em desenvolver uma rede de eletricidade *off-shore* no Mar do Norte para permitir o desenvolvimento da energia eólica (IEA, 2014).

Ao final de 2013, o Brasil possuía 3,5GW de capacidade eólica instalada, suficiente para alimentar 8 milhões de casas, correspondendo a 3% do consumo nacional de eletricidade. Só em 2013, 34 novos parques eólicos foram conectados, adicionando 953MW de capacidade para a rede brasileira. A indústria eólica está se firmando no Brasil e nove fabricantes internacionais abriram fabricas no país. O PDE 2022 (Plano Decenal de Expansão de Energia) coloca a meta de 17GW de capacidade eólica instalada até 2022, referente a 9,5% do consumo nacional de eletricidade (GWEC, 2014).

Aproximadamente metade da capacidade instalada em 2013 é proveniente de 3 novos complexos eólicos: 160MW do complexo Asa Branca constituído por 5 parques eólicos, 150MW do complexo Calango também constituído por 5 parques eólicos e 120MW do complexo Renascença constituído por 4 parques eólicos (GWEC, 2014).



**Figura 1 - Capacidade instalada total**  
**Fonte: GWEC (2014).**



**Figura 2 - Distribuição geográfica das fazendas eólicas em operação e construção até o final de 2013**  
 Fonte: ABEEólica (2014).

Em 2013 no Brasil a geração eólica (*on-shore*) ganhou novamente a maioria da capacidade disputada em leilões para geração em longo prazo. Ao todo foram realizados 4 leilões de energia proveniente de novos empreendimentos, com participação da fonte eólica em 3 deles. O Leilão de Energia Reserva 2013 (LER), exclusivo para a fonte eólica, atingiu 75,26% da meta anual, de 2GW de potência contratada, com a contratação de 1502,2MW. O leilão A-3 2013, em novembro, previa contratar fontes biomassa, gás natural, solar, eólica, pequena central hidrelétrica (PCH) e usina hidrelétrica de energia (UHE), mas finalizou sua negociação e teve toda sua demanda, 867,7MW, contratados apenas em energia eólica. No segundo leilão A-5 de 2013, a energia eólica terminou com aproximadamente 67% do total contratado, equivalente a contratação 2337,8MW, finalizando o ano com 4,7GW contratados, superando o recorde de 2011 com 2905,3MW (ABEEólica, 2014).

**Tabela 1 - Consolidado dos leilões**  
 Fonte: ABEEólica (2014).

Leilão	Cadastrado (MW)	Habilitado (MW)	Contratado (MW)	Preço-Teto (R\$/MWh)	Preço Médio (R\$/MWh)
LER 2013	16.040,0	8.999,0	1.505,2	117,00	110,51
A-3 2013	15.042,0	9.191,0	867,6	126,00	124,43
2° A-5 2013	16.420,0	13.287,0	2.337,8	122,00	119,03
<b>Total</b>	<b>47.502,0</b>	<b>31.477,0</b>	<b>4.710,6</b>	--	--
<b>Média</b>	<b>15.834,0</b>	<b>10.492,3</b>	--	<b>121,67</b>	<b>117,99</b>

**Tabela 2 - Estatísticas dos leilões**

Fonte: ABEEólica (2014).

Leilão	Investimento (em R\$ bilhões)	Empregos Gerados	Casas Abastecidas (em milhões)	Emissões de CO2
				Evitadas (Toneladas/ano)
<b>LER 2013</b>	6,77	22.578	2,7	1.294.294
<b>A-3 2013</b>	3,90	13.014	1,8	746.033
<b>2° A-5 2013</b>	10,52	35.067	4,2	2.010.231
<b>Total</b>	<b>21,20</b>	<b>70.659</b>	<b>8,5</b>	<b>4.050.558</b>

Três novas regulações que impactam o desenvolvimento eólico começaram a vigorar em 2013:

**Resolução No. 391/2009:** Estabelece os requisitos necessários, junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para a outorga de Autorização para exploração de usinas eólicas e registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida. Esta resolução também permite a companhia solicitar informações sobre distribuidores interessados e sobre o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

**Portaria MME No. 274/2013:** Apresenta os procedimentos necessários aos interessados em aderir ao Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI), para enquadramento do projeto à ANEEL para implantação de infraestrutura de geração e transmissão de energia elétrica.

**Portaria MME No. 310/2013:** Define os procedimentos para classificação de projetos de geração e transmissão de energia elétrica no Ambiente de Contratação Livre (ACL), interessados em aderir ao REIDI.

O Brasil possui um dos maiores sistemas elétricos interligados do mundo. A necessidade do desenvolvimento do Sistema Interligado Nacional (SIN) surgiu devido à extensão do território brasileiro e a sazonalidade dos períodos de chuvas entre as regiões. O SIN possibilita que as regiões que estejam no período de estiagem recebam energia proveniente das regiões onde há sobra de energia armazenada (VIEIRA, 2007).

Em 2004 o PROINFA do Ministério de Minas e Energia (MME) surge para aumentar a participação da energia elétrica proveniente de fontes alternativas como



eólica, biomassa e PCH no SIN. O PROINFA promove a diversificação da Matriz Energética Brasileira buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento ao mesmo tempo em que desenvolve características e potencialidades regionais e locais.

O PROINFA, baseado em um modelo de financiamentos e políticas regionais, subsidiou os preços de contratação de energia eólica. Tais políticas elevaram o Brasil atualmente a um patamar em que se contratam energias renováveis não convencionais sem a necessidade de subsídios (ABEEólica, 2013).

Elaborado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro mostra um potencial total de 143,5GW, sendo o maior potencial identificado na região litoral do Nordeste com potencial anual de energia de cerca de 144,29TWh/ano, seguido pelo potencial de 54,93TWh/ano para a região Sudeste e 41,11TWh/ano para a região Sul (Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2014).

Em relação a evolução da tecnologia, o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro não apresenta avaliações quanto ao potencial energético dos ventos na plataforma off-shore, que além de vasto conta com o desenvolvimento tecnológico em função do desenvolvimento e capacitação para prospecção e produção de petróleo e gás natural, estes projetos apresentam um maior volume específico de energia devido a constância dos regimes do vento no oceano (MMA, 2014).

## **1.1.TEMA**

A energia eólica é obtida pela energia cinética do vento, que aciona um rotor, que pode ter várias formas – hélice, multipás, tipo holandês, Savonius, Darrieus etc. –, e que, por meio de um sistema mecânico de transmissão, aciona um conversor (gerador elétrico). Ao conjunto dá-se o nome de aerogerador. Os conjuntos menores, muito empregados em zonas rurais para atendimento de fazendas, unidades residenciais e pequenas comunidades, normalmente, em função da variação do regime de ventos, usam um sistema de armazenamento da energia elétrica, composto de baterias, também denominadas de acumuladores. Já os maiores, que formam as chamadas “fazendas eólicas” ou “parques eólicos”, podem até dispensar o armazenamento, conectando-se diretamente ao sistema elétrico

regional, em complementação a outros tipos de fontes e tendo suas variações compensadas por fontes mais constantes, como as termelétricas e as hidrelétricas (HUGO, 2007).

Um sistema eólico pode ser utilizado em três tipos distintos de aplicações: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede elétrica, cada um dos diferentes sistemas obedece a uma configuração padrão, e necessitam de diferentes dispositivos para seu funcionamento (MACHADO et. al., 2007).

Os sistemas isolados são sistemas que se encontram desconectados do sistema elétrico proveniente da rede pública de energia, logo, essa energia pode ser diretamente utilizada, ou pode ser armazenada em baterias com o objetivo da utilização de aparelhos elétricos.

Os sistemas híbridos são aqueles que utilizam duas ou mais fontes de energia renováveis em conjunto para proporcionar maior eficiência para o sistema.

Os sistemas interligados a rede são sistemas onde toda a energia produzida é inserida na rede de distribuição de energia, logo, não necessitam de sistemas de armazenamento. Para tal, se faz necessário a utilização de uma etapa de potência no sistema que adeque a energia gerada à energia da rede. Esta etapa é realizada através de componentes eletrônicos de potência, como retificadores e inversores.

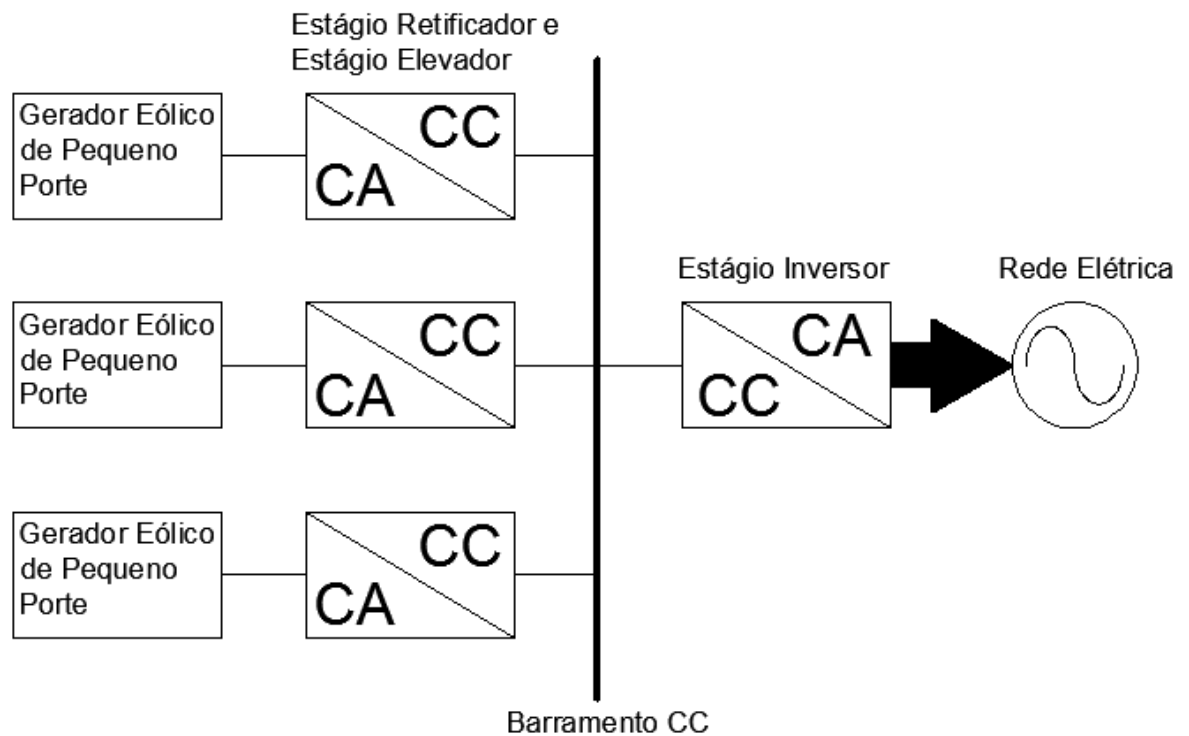
Em sistemas de geração eólica de pequeno porte, a energia gerada pela turbina, geralmente, é bem aquém da energia da rede. Por isso quanto mais eficiente for o sistema de retificação, menores serão as perdas e maior será o aproveitamento da energia gerada, mesmo sob variações do regime de ventos.

No decorrer deste trabalho, será estudado e desenvolvido um sistema para aplicação de energia na rede, porém, com características do retificador que vão além das convencionais.

#### 1.1.1. Delimitação do tema

Neste trabalho será desenvolvido um sistema de geração eólica de pequeno porte conectado à rede de distribuição. Devido à geração intermitente e variável da energia eólica é necessária a utilização de uma etapa de conversão de energia que pode ser realizado com a utilização de conversores estáticos. Uma estrutura usual é

apresentada na figura 3, onde existe uma série de conversores CA-CC conectados a um barramento CC e este a um estágio inversor conectado à rede.

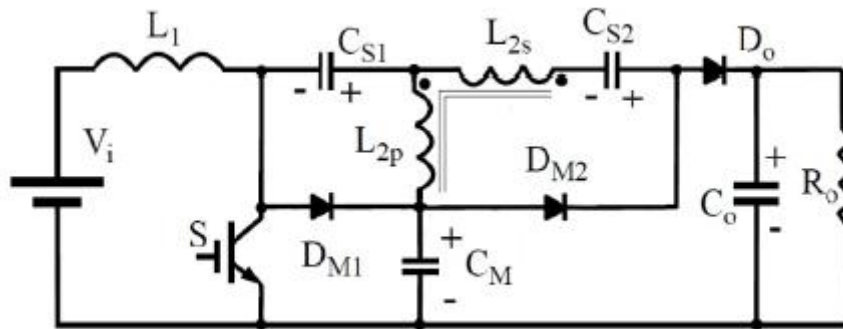


**Figura 3 - Esquema de ligação do gerador à rede**

Barbi (2006) define os conversores como responsáveis por realizar “o tratamento eletrônico da energia elétrica e são empregados no controle do fluxo de energia elétrica entre dois ou mais sistemas elétricos”. No caso de geradores eólicos de pequeno porte, que geram uma tensão de saída relativamente baixa, se faz necessário a utilização de um conversor elevador de tensão para alimentar o inversor e modular a tensão desejada.

A solução clássica para esta aplicação é um retificador trifásico associado a um conversor elevador tipo *boost*. Na teoria estes conversores do tipo *boost* são capazes de atingir um alto ganho estático, porém, este ganho é limitado em função de restrições estáticas e dinâmicas na operação com razão cíclica muito elevada, além da necessidade do uso de componentes que suportem as altas tensões presentes nos circuitos deste conversor, o que gera maiores perdas. Logo, na prática o ganho é limitado pelas perdas existentes no circuito, diminuindo sua eficiência à medida que a razão cíclica se aproxima de 1.

Neste contexto propõem-se uma nova aplicação para uma recente topologia de conversor CC-CC com elevado ganho estático, possibilitando uma melhor operação do sistema, principalmente em regimes de vento com menor velocidade onde a rotação da turbina eólica e conseqüentemente as tensões geradas são mais baixas. O conversor apresentado na figura 4 apresenta um elevado ganho estático com reduzida tensão nos interruptores.



**Figura 4 - Conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético e elevado ganho estático**

Fonte: ROCHA (2013).

O conversor CC-CC apresentado na figura 4 será integrado a um retificador trifásico de seis pulsos a diodo, compondo o estágio CA/CC do sistema de geração eólica. Entre as principais funções do retificador, este deverá: operar com fator de potência elevado, superior a 0,95; retificar a tensão do gerador de baixa tensão e eleva-la para a tensão do barramento CC compatível com as necessidades do estágio inversor; controlar o fluxo de potência entre o gerador e o barramento para permitir a implementação de um controle que busque o ponto de máxima potência (MPP).

O estágio inversor não será estudado neste trabalho, pois será realizada a investigação apenas da operação do conversor SEPIC modificado nesta aplicação, sendo que esta topologia ainda não foi empregada em um sistema de geração eólico.

## 1.2. PROBLEMA E PREMISSAS

Tendo em vista o acelerado crescimento da demanda energética nacional nota-se a necessidade da aplicação de sistemas energéticos descentralizados,

gerando acesso a uma produção própria de energia, e também, promovendo uma grande oportunidade para desenvolvimento e aplicação de tecnologias que envolvem a área de energias renováveis.

Com o crescente uso das fontes renováveis de energia, tais como painéis fotovoltaicos, células a combustível e sistemas de conversão de energia eólica, surgem novos desafios para os profissionais que trabalham com eletrônica de potência.

As usinas de energia eólica precisam de certo conhecimento que ainda não foi disseminado, por isso os projetos são normalmente desenvolvidos por grandes empresas do setor energético. No entanto a microgeração de energia eólica pode ser uma opção viável em relação ao uso de painéis solares que possuem um alto custo no Brasil.

Atualmente, consumidores de pequeno porte já podem tornar-se vendedores de energia excedente. Desta forma, a otimização da eficiência, volume e custo dos conversores que irão realizar essa função são alguns dos fatores para a viabilização desta tecnologia.

Assim, neste trabalho será proposto a aplicação de uma nova topologia de conversores estáticos com alto ganho estático para a geração eólica de pequeno porte, procurando otimizar a operação desses sistemas na operação com baixa rotação, ou seja, com baixa tensão de saída no gerador.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### 1.3.1. Objetivo geral

Desenvolver um estudo do comportamento de um sistema de geração eólica de pequeno porte utilizando uma nova configuração do conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Estudar sistemas eólicos de pequeno porte interligados à rede de distribuição de energia;

- Estudar etapa de potência, CA/CC (retificador) e CC-CC (conversor elevador), com foco em conversores estáticos de alto ganho, etapa de conversão de energia entre o gerador eólico e o inversor;
- Estudar o comportamento teórico do conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético alterado;
- Desenvolver metodologia de projeto do conversor proposto para aplicação a um sistema eólico de pequeno porte;
- Desenvolver um protótipo do conversor proposto;
- Desenvolver um sistema de controle analógico;
- Efetuar testes do protótipo operando em malha aberta e malha fechada;
- Identificar vantagens e desvantagem da proposta.

#### **1.4. JUSTIFICATIVA**

Apesar de todo o potencial disponível, o Brasil não possui tecnologia nacional comercialmente acessível para o aproveitamento da energia eólica. Deste modo, iniciativas no sentido de desenvolver tecnologias nacionais para o aproveitamento eólico são de grande relevância para o desenvolvimento econômico nacional, além de ser uma oportunidade única para pesquisadores e novos empreendedores (OLIVEIRA, 2010).

O desenvolvimento de conversores CC-CC de elevado ganho estático é uma importante área de pesquisa devido à crescente demanda dessa tecnologia para diversas aplicações alimentadas por fontes geradoras CC com baixas tensões de saída (GULES et al., 2014).

Este trabalho tem como objetivo a utilização de uma nova topologia de conversor estático, com foco em um ganho na elevação da tensão que possibilite a ligação de sistemas eólicos de pequeno porte com baixa tensão de saída, geralmente algo em torno de 12 V e 24 V, na rede elétrica. O estudo abordará uma otimização na utilização de conversores com acoplamento magnéticos. Os conversores com elevado ganho de tensão empregam alguns tipos de técnicas com valores menores de razão cíclica. Cada uma dessas técnicas apresenta vantagens e desvantagens que podem ser exploradas em diferentes aplicações (DREHER, 2012).

O conversor *boost* é o conversor elevador não isolado clássico e normalmente pode operar com um bom desempenho estático e dinâmico com uma razão cíclica máxima próxima de  $D=0,8$  resultando em uma tensão de saída próxima a cinco vezes a tensão de entrada.

Na geração eólica, que depende da intermitência dos ventos, deseja-se que o conversor elevador CC-CC possua alto ganho estático e alta eficiência. A solução clássica com o conversor *boost* necessita de componentes que suportem as tensões elevadas presentes no circuito.

A topologia que será apresentada neste trabalho é uma nova configuração do conversor SEPIC modificado, no qual deseja-se obter algumas características de operação, como por exemplo, ganho estático maior que  $q=20$ , baixa perda de comutação e fator de potência igual a 0,95. A solução proposta é obtida através da utilização do acoplamento magnético para elevar o ganho estático. Na montagem proposta, os componentes são submetidos a uma fração da tensão de saída. Essas tensões, por serem mais baixas, permitem utilização de componentes de menor custo e chaves semicondutoras com resistência ôhmica mais baixa quando ligadas, elevando a eficiência do sistema (ROCHA, 2013).

Assim sendo, será estudada a operação do conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético e os resultados obtidos serão discutidos com a finalidade de demonstrar as vantagens da topologia estudada em relação aos métodos utilizados atualmente.

## **1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

O trabalho consistirá de uma pesquisa literária, através de dissertações, artigos, teses de mestrados e doutorado que objetivem o uso de conversores estáticos de alto ganho para aplicação em fontes de energias renováveis, tendo em vista que a aplicação do método de utilização do conversor SEPIC modificado para aerogeradores de pequeno porte ligados a rede foi pouco utilizada. Este trabalho visa o estudo da viabilidade e aplicabilidade desta aplicação tendo como foco a utilização de fontes geradoras independentes no sistema elétrico nacional.

A equipe utilizará um conjunto motor-gerador para testes em bancada. O estudo será focado na comparação entre o método proposto em relação aos

métodos utilizados atualmente, para assim, concluir se a utilização desse método será viável.

## 1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O proposto trabalho será segmentado conforme as disciplinas relacionadas ao TCC:

**Capítulo 1: Introdução:** Este capítulo contém a apresentação do trabalho, tema, delimitação do tema, problemas, premissas, objetivos, justificativas e os procedimentos metodológicos.

**Capítulo 2: Energia eólica para produção de energia elétrica:** Será realizada uma revisão bibliográfica do funcionamento da conversão de energia eólica em energia elétrica.

**Capítulo 3: Conversores:** Neste capítulo serão abordadas as características e definições do processo de otimização eletrônica presente nos conversores estáticos de alto ganho.

**Capítulo 4: Apresentação do funcionamento do conversor utilizado:** Será feito uma análise do funcionamento da nova topologia de conversor utilizado e a demonstração da simulação teórica do mesmo.

**Capítulo 5: Estudo qualitativo do conversor em operação:** Nesta etapa será apresentado uma simulação do circuito proposto, operando tanto em malha aberta quanto em malha fechada.

**Capítulo 6: Projeto:** Neste capítulo contém o detalhamento da metodologia de projeto do conversor a ser implementado.

**Capítulo 7: Experimentações:** O circuito implementado foi posto em operação e os resultados obtidos apresentados.

**Capítulo 8: Considerações finais:** Este capítulo apresenta as conclusões finais dos resultados obtidos com a topologia de conversor proposta, bem como as dificuldades encontradas no decorrer deste estudo.



## 2 ENERGIA EÓLICA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

### 2.1.POTÊNCIA DISPONÍVEL NO VENTO

O vento varia constantemente, tanto na velocidade de escoamento quanto na direção do seu deslocamento. Para o seu aproveitamento energético, há necessidade de estudar o seu comportamento espacial e temporal (CUSTÓDIO, 2009).

O aquecimento desigual da atmosfera provoca gradientes de pressão atmosférica que são responsáveis por movimentos de massa de ar. À energia adquirida por um corpo em movimento, dá-se o nome de energia cinética. Este tipo de energia é uma grandeza escalar que depende da massa e do módulo da velocidade do corpo em questão. Portanto, a equação que caracteriza a energia cinética é dada por:

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

Logo, a energia eólica é a energia cinética do ar em movimento.

Para uma boa análise da energia eólica, necessita-se conhecer melhor a potência disponível no vento, esta é definida como a derivada da energia cinética no tempo:

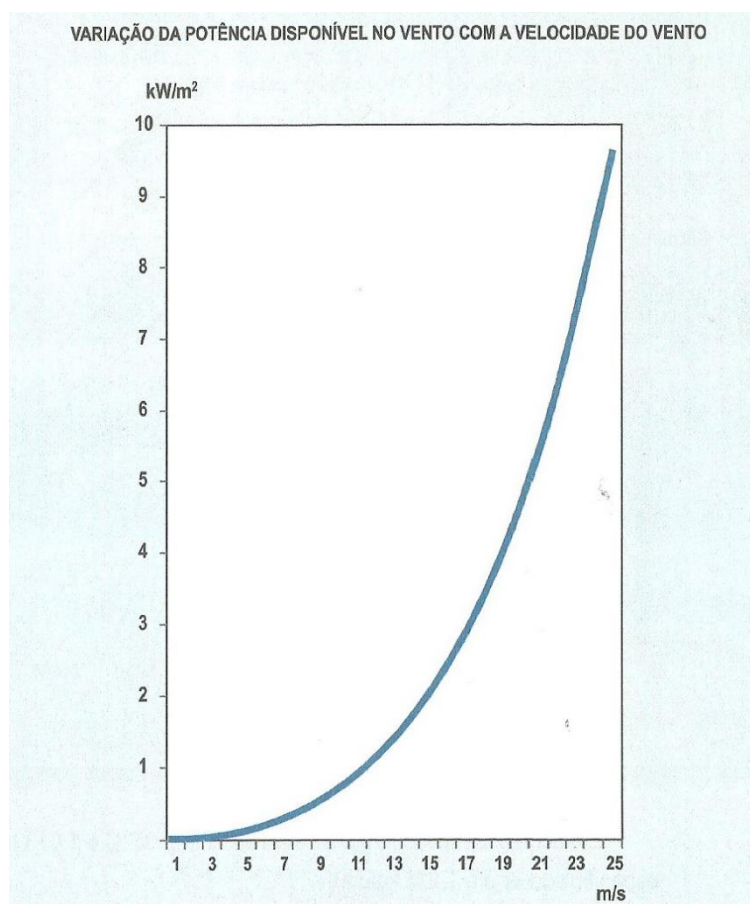
$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (2)$$

Da equação (2) sabe-se que  $\rho$  é a massa específica do ar, que por sua vez, de acordo com a lei de estado dos gases perfeitos, varia com a temperatura (inversamente proporcional à  $\rho$ ) e com a pressão atmosférica (diretamente proporcional a  $\rho$ ), e  $A$  é a área de uma seção transversal ao fluxo de ar. Pode-se omitir esta área escrevendo a potência disponível no vento por unidade de área definido, desta forma surgirá a densidade de potência, dada por:

$$DP = \frac{\rho \cdot v^3}{2} [W/m^2]. \quad (3)$$

Através da equação (3), pode-se perceber que a variação da potência disponível no vento é uma função da velocidade do vento que cresce de forma

exponencial, ou seja, um acréscimo de 10% na velocidade do vento, representa 33% mais potência disponível, desde que mantidas as demais condições. Na grande maioria dos casos (em torno de 90%) pode haver uma variação de até 10% entre o valor médio anual e a média de longo prazo da velocidade do vento (CUSTÓDIO, 2009). Isto demonstra a importância da determinação das características do vento no local onde pretende-se fazer o uso da energia eólica. Na figura 5, o gráfico que representa a variação na potência disponível no vento com a velocidade do vento.



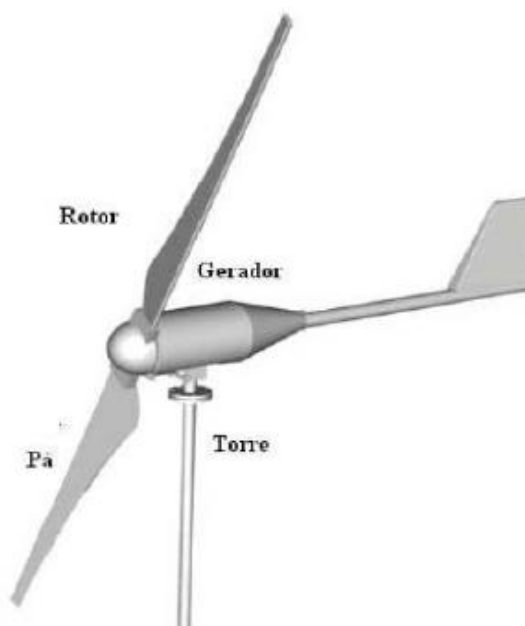
**Figura 5 - Variação da potência disponível em relação à velocidade do vento**  
Fonte: Custódio (2009).

Outra importante variação do comportamento do vento a se determinar é a direção do mesmo, isso se faz através da representação gráfica de uma rosa dos ventos, a qual normalmente é dividida em setores de 30°. Portanto, para o estudo da produção de energia mecânica através da energia cinética do vento, além da análise das características da velocidade, deve-se analisar o comportamento do vento em cada um destes setores identificando os predominantes.

## 2.2. AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE (AGPP)

As turbinas eólicas são conhecidas também por “cata vento” ou “moinho de vento” e seu uso remonta a muitos séculos. Os primeiros registros de uso no acionamento de máquinas foram em torno de 300 A.C. na China, e de 200 A.C. na antiga Pérsia (CUSTÓDIO, 2009).

O aproveitamento de energia eólica é feito através de máquinas desenvolvidas para converter potência do vento em energia mecânica, tal máquina é denominada turbina eólica. Esta por sua vez, está conecta através de um eixo, a uma máquina responsável por transformar energia mecânica em energia elétrica, esta máquina é conhecida por gerador elétrico. Este sistema, além de diversos outros componentes, é parte fundamental que compõe os chamados aerogeradores. Na figura 6 está uma representação de um típico aerogerador de pequeno porte e alguns dos seus componentes.



**Figura 6 - Alguns componentes de um AGPP**  
Fonte: Azevedo (2012).

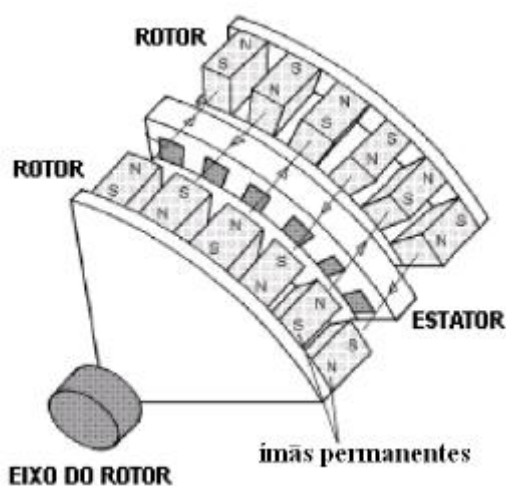
### 2.2.1. Gerador

Após converter a energia cinética do vento em energia mecânica, a turbina movimentada o eixo, o qual aciona um gerador elétrico fixo no mesmo eixo que, por

sua vez, converte esta energia em energia elétrica através de conversão eletromagnética. Os geradores de energia elétrica, também chamados de alternadores, são de dois tipos, síncronos e assíncronos, ambos podem ser utilizados nos aerogeradores, ligados diretamente à rede ou por meio de conversores. A escolha do tipo de gerador a ser usado dependerá da potência e das condições de uso. Porém, diferentemente do gerador assíncrono, o gerador síncrono é capaz de controlar, através da excitação, a tensão e a potência reativa gerada.

Os geradores síncronos com enrolamentos de excitação permitem um número maior de polos, mas com perdas associadas a estes enrolamentos, além de utilizarem escovas, que exigem uma periodicidade maior de manutenção. Com o desenvolvimento e a redução do custo dos materiais magnéticos, os ímãs permanentes têm sido utilizados para a excitação dos geradores síncronos. Com isso, pode-se utilizar um maior número de polos, obtendo-se máquinas projetadas para operar na faixa de 20 a 200 rpm (OLIVEIRA, 2010).

Na figura 7, é possível visualizar a ilustração de um gerador de pequeno porte excitado através de ímã permanente.



**Figura 7 - Gerador excitado através de ímã permanente**  
Fonte: adaptado de Azevedo (2012).

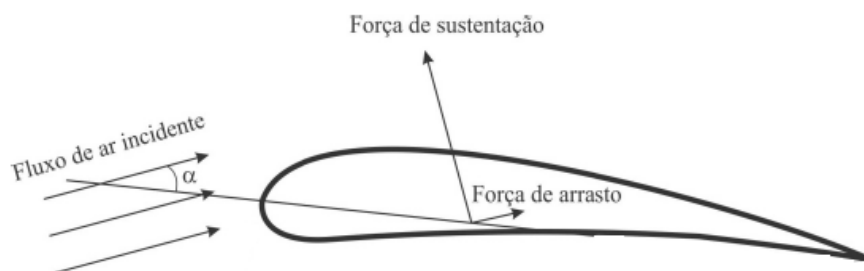
### 2.2.2. Pás

As turbinas eólicas utilizadas para produção de energia elétrica normalmente são turbinas de sustentação, estas usam aerofólios como pás. O vento incide nestas

pás com um ângulo em relação ao eixo da mesma, devido a isto o fluxo de ar incidente tem sua direção e velocidade alterada, o que, pela segunda lei de Newton, implica no surgimento de duas parcelas de força de empuxo, são elas: força de sustentação  $F_s$ , responsável pela sustentação aerodinâmica da pá e é dada pela equação (4).

$$F_s = \frac{\rho \cdot A \cdot v^2}{2} \cdot C_s \quad (4)$$

Onde,  $C_s$  é o coeficiente de sustentação e depende das dimensões e características aerodinâmicas da seção da pá e  $F_a$  é a força de arrasto, provocada pela pressão do vento sobre a superfície das pás, fazendo com que estas se movimentem e conseqüentemente o rotor gire. A figura 8 ilustra o ângulo de incidência e ambas as forças que atuam sobre a pá.



**Figura 8 - Ilustração das forças atuantes e do ângulo de incidência**  
 Fonte: adaptado de Azevedo (2012).

### 2.2.3. Rotor

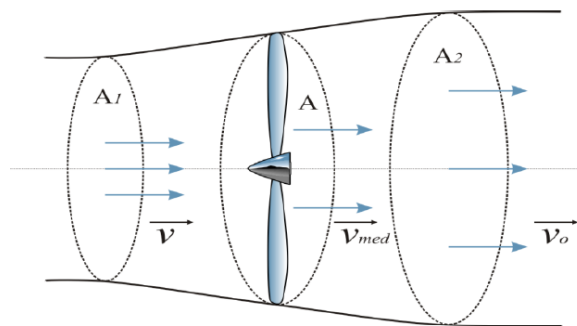
Entende-se por rotor, a parte girante da turbina eólica. Este giro pode acontecer em dois sentidos, horizontal e vertical, dependendo da forma como a turbina foi construída. Atualmente, o uso de turbinas com rotores de eixo horizontal (perpendiculares à direção do vento) é mais recorrente no que diz respeito à produção de energia elétrica, especialmente nas instalações de maior potência, onde o gerador (máquina responsável pela conversão de energia mecânica em elétrica) é instalado junto à turbina. Desta forma a máxima energia mecânica extraída pela turbina é transferida através do eixo, ou rotor, para o acionamento do gerador.

### 2.3.POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO POR UMA TURBINA EÓLICA X POTÊNCIA DISPONÍVEL NO VENTO

Quando o vento incide em uma turbina eólica, sua velocidade é reduzida na saída do rotor, o que resulta no aumento do diâmetro do tubo de vazões (seção de ar que atravessa a turbina), de acordo com a expressão da continuidade de Bernoulli, ou seja:

$$Q = A \cdot v \quad (5)$$

onde  $Q$  é a vazão de ar que atravessa a turbina eólica (dentro do tubo de vazões),  $A$  é a área da seção transversal do tubo de vazão do ar e  $v$  é a velocidade do vento na seção do tubo de vazão.  $A$  e  $v$  podem ser antes da turbina, onde o vento é livre, na entrada do rotor da turbina ou na saída do rotor da turbina. A figura 9 é uma representação do tubo de vazões, e representa as diferentes velocidades em seu interior.



**Figura 9 - Fluxo de vento através de uma turbina eólica**  
Fonte: Tibola (2009).

A resultante da diferença entre a potência do vento que entra no rotor eólico e a potência do vento que sai do mesmo, é a potência extraída pela turbina eólica. Para assegurar que o vento atrás do rotor atravessasse-o, a energia extraída pelo rotor deve ser limitada em  $2/3$  da energia disponível no vento livre antes de entrar no rotor eólico, ou seja:

$$v_o = \frac{2 \cdot v}{3} \quad (6)$$

onde  $v$  é a velocidade do vento na seção do tubo de vazão na entrada da turbina e  $v_o$  é a velocidade do vento na saída do rotor da turbina, ambos dados em  $[m/s]$ .

Logo, sabendo-se dessa limitação e através da manipulação das equações de fluxo de massa

$$m' = \rho \cdot v \cdot A \text{ [kg/s]} \quad (7)$$

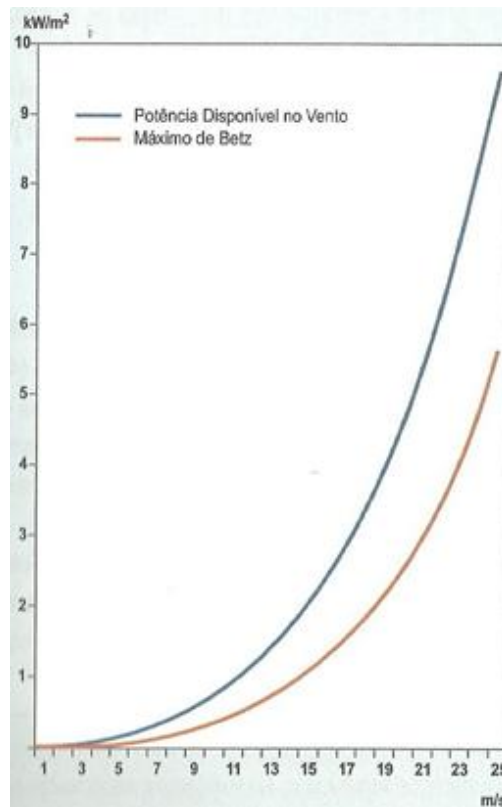
e potência disponível no vento

$$P = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \text{ [W]} \quad (8)$$

A máxima potência que pode ser extraída do vento por uma turbina ideal é chamada de “Máximo de Betz” e é dado por:

$$P_{t_{\text{máx}}} = \frac{16}{27} \cdot P \text{ [W]} \quad (9)$$

É possível visualizar estas diferenças nas curvas de potência da figura 10.



**Figura 10 - Potência do vento e máxima potência possível de ser extraída de uma turbina eólica**

Fonte: Custódio (2009).

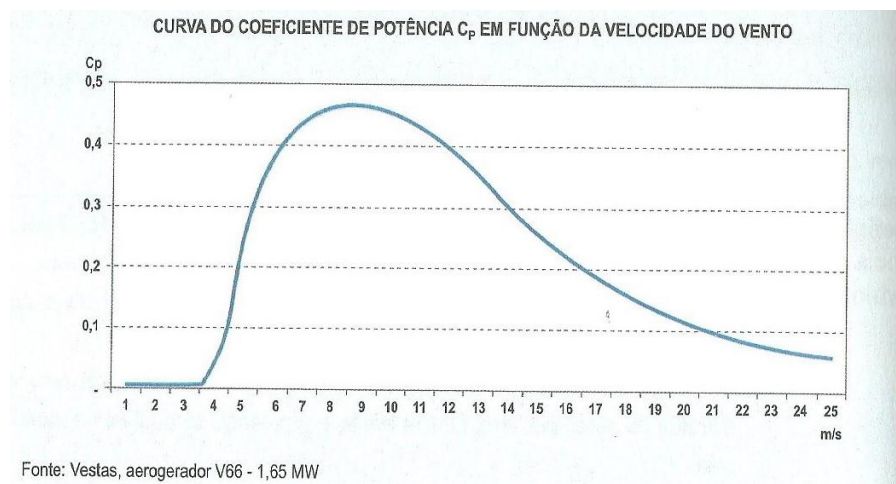
O “Máximo de Betz”, ou Coeficiente de Betz, representa que uma turbina eólica ideal poderá extrair no máximo 16/27 da potência disponível no vento, ou seja, 59,3%. Porém em casos reais, onde as perdas aerodinâmicas durante a conversão de energia são inevitáveis, uma turbina apenas extrairá uma parcela

deste máximo disponível. A relação entre a potência extraída e a potência disponível é chamada de coeficiente de potência e é dado pela equação (10).

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2}} \quad (10)$$

A relação da velocidade de ponta,  $\lambda$ , é um parâmetro que combina os efeitos da velocidade de rotação da turbina e a velocidade do vento e também pode ser relacionada com o coeficiente de potência (MACHADO et. al., 2007).

Sabendo-se que a variação na velocidade do vento incidente causa uma alteração na eficiência aerodinâmica das pás do rotor da turbina e conseqüentemente, de acordo com a equação acima descrita, o coeficiente de potência  $C_p$  também é alterado, existe uma determinada velocidade do vento capaz de gerar a máxima eficiência da turbina. Este ponto de máximo da curva  $C_p \times v$  é mostrado no gráfico da figura 11.



**Figura 11 - Curva do coeficiente de potência  $C_p$  em função da velocidade do vento**  
**Fonte: Custódio (2009).**

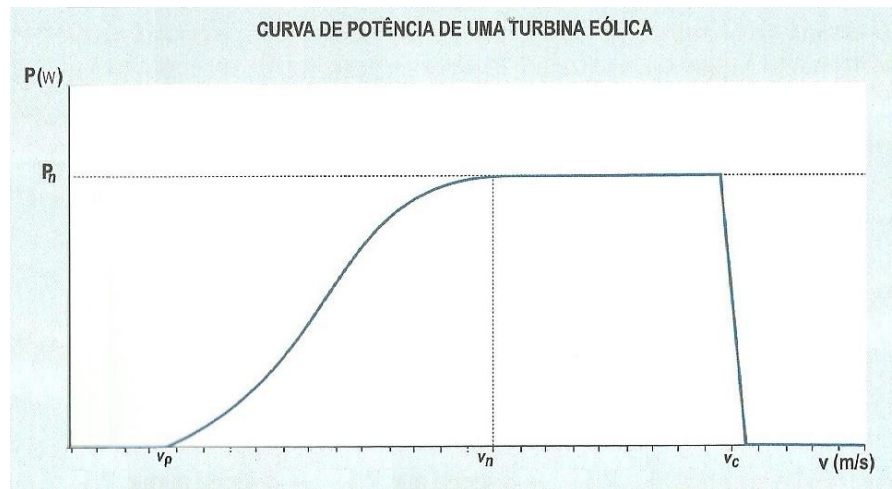
Portanto, a potência fornecida por uma turbina eólica segue a equação (11).

$$P_t = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} C_p [W] \quad (11)$$

Esta potência varia com a terceira potência da velocidade do vento e com o diâmetro do rotor da turbina, porém, no momento que esta potência atinge o valor nominal da turbina, independentemente do aumento da velocidade do vento, a



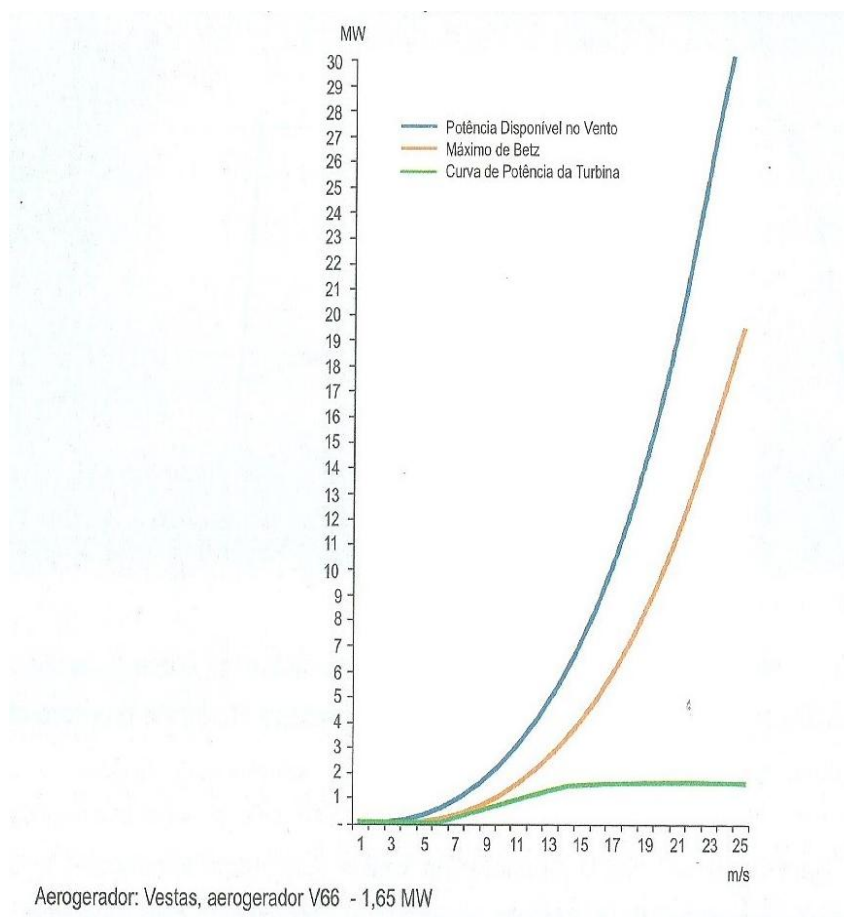
potência fornecida permanecerá constante e a eficiência da conversão energética diminuirá. A figura 12 demonstra, graficamente, esta situação.



**Figura 12 - Curva de potência de uma turbina eólica**  
**Fonte: Custódio (2009).**

A conversão de energia se dá a partir de um valor mínimo de velocidade do vento  $v_p$ , chamada de velocidade de partida da turbina. A potência da turbina é limitada ao valor nominal  $P_n$ , à velocidade nominal  $v_n$ , determinado pela capacidade do gerador elétrico. A partir daí o controle de velocidade da turbina mantém a potência o mais constante possível (CUSTÓDIO, 2009).

Quando a potência nominal da turbina é atingida, para velocidades do vento acima de certo valor, existe um limite chamado velocidade de corte  $v_c$ , onde a fim de manter a integridade mecânica da turbina, esta é retirada de operação. Isto ocorre através do controle da potência do rotor da turbina, evitando assim, sobrecargas também no gerador elétrico. Na figura 13 está a representação gráfica da potência disponível no vento, do máximo de Betz e da potência real produzida por uma turbina eólica. Nela fica visível a pequena parcela da potência disponível que a turbina é capaz de extrair e também o ponto de velocidade nominal onde a potência extraída passa a ser constante.



**Figura 13 - Representação da potência disponível no vento, da máxima potência teoricamente extraível por uma turbina eólica e a potência real produzida por uma turbina eólica comercial.**  
**Fonte: Custódio (2009).**

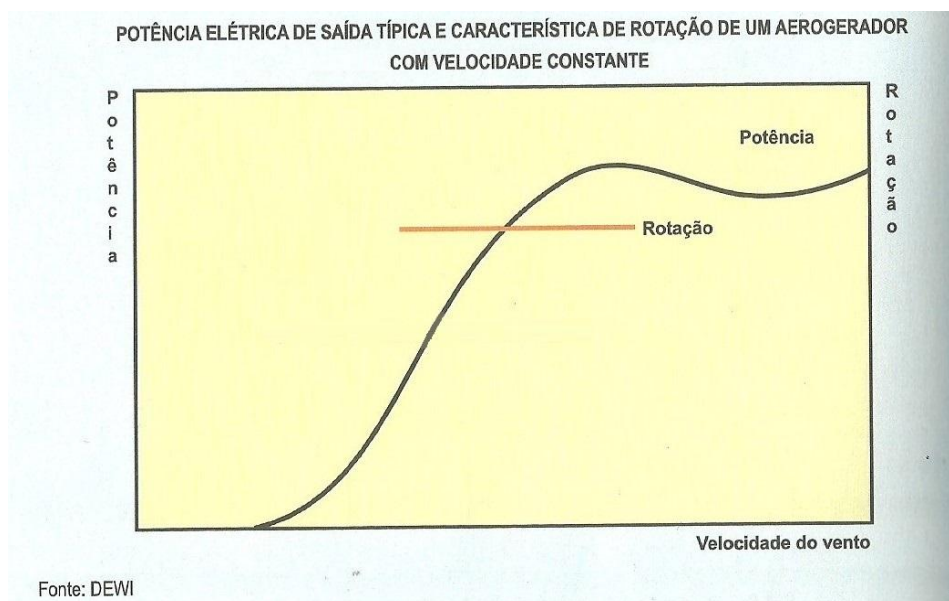
## 2.4. VELOCIDADE CONSTANTE X VELOCIDADE VARIÁVEL

Um fator determinante para a escolha do tipo de gerador (síncrono ou assíncrono) é a velocidade de rotação da turbina, a qual pode ser variável ou constante. É possível verificar que, se a velocidade do aerogerador é mantida constante, variações na velocidade do vento levarão a variações no valor de  $\lambda$  e, conseqüentemente, a mudanças no valor de  $C_p$  bem como na potência de saída gerada pela turbina eólica. Contudo, se a velocidade do rotor é ajustada de acordo com as variações na velocidade do vento, o valor de  $\lambda$  pode ser mantido no ponto ótimo de forma a garantir a máxima potência de saída para o sistema (TONKOSKI et. al., 2007).

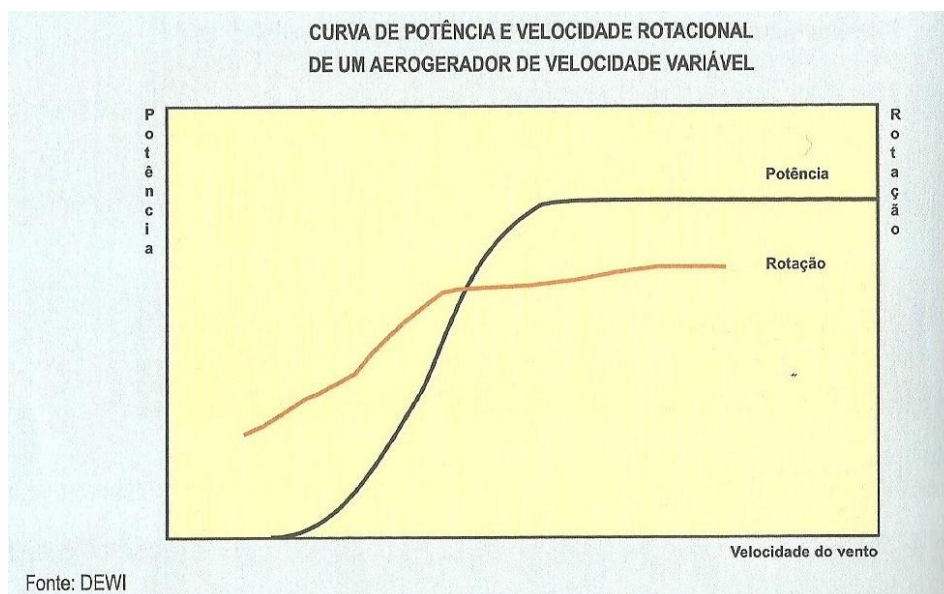
Manter o rotor da turbina eólica com velocidade constante é a maneira mais simples de se operar um aerogerador, porém a eficiência do gerador será menor do que a máxima para todas as outras velocidades do vento. Aerogeradores com velocidade constante, podem utilizar o gerador assíncrono ligado diretamente à rede elétrica.

Já os aerogeradores de velocidade variável podem utilizar gerador síncrono de ímãs permanentes, com a velocidade do rotor ajustada à situação real da velocidade do vento, garantindo assim um desempenho maximizado e maior qualidade da energia elétrica. De acordo com Oliveira (2010), os sistemas de geração com velocidade variável são a escolha mais adequada para turbinas eólicas, já que permitem a utilização destas turbinas no seu ponto de máximo coeficiente de potência para uma ampla faixa de velocidades dos ventos, o que otimiza a captura da energia disponível.

Nas figuras 14 e 15, as curvas representam as potências de um aerogerador com velocidade constante e velocidade variável, respectivamente.



**Figura 14 - Potência elétrica de saída típica e característica de rotação de um aerogerador com velocidade constante**  
Fonte: Custódio (2009).



**Figura 15 - Curva de potência e velocidade rotacional de um aerogerador de velocidade variável**  
Fonte: Custódio (2009).

## 2.5. GERAÇÃO PADRONIZADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE CONVERSORES ESTÁTICOS

Nos aerogeradores de velocidade variável a velocidade de rotação do eixo da turbina é afetada diretamente pela velocidade do vento, que é uma variável incontroleável. Sabendo que a frequência de geração elétrica é diretamente proporcional à velocidade de rotação do rotor, por consequência a frequência está diretamente relacionada à velocidade do vento. O objetivo de um aerogerador é a produção de energia elétrica, o que exige que a energia elétrica gerada seja na frequência padronizada da rede. Portanto, o controle de frequência é da maior importância num aerogerador e exige o uso de soluções adequadas e complexas, como por exemplo, o uso de sistemas de conversão de frequência.

Para que a frequência possa ser controlada, é necessário a utilização de um sistema de eletrônica de potência, por meio de conversores estáticos, tipo *back-to-end* (CA-CC-CA). Tal sistema é composto por um retificador (CA-CC) e um inversor (CC-CA). O retificador permite que uma tensão ou corrente alternada (CA) seja constante, ou seja, transformada em contínua (CC). Já, o inversor faz o papel inverso, converte um sinal contínuo em alternado. Desta forma pode-se controlar, além da frequência, a forma, amplitude e o fator de potência da onda de saída.

Assim, através deste conjunto retificador/inversor, a tensão produzida pelo gerador é retificada, a corrente contínua resultante dessa retificação é invertida e a frequência da energia elétrica fornecida pelo aerogerador torna-se invariável e sincronizada com o sistema elétrico. Uma vez que a tensão produzida pelo gerador está isolada da tensão e frequência da rede, numa frequência relacionada com a rotação da turbina, este sistema conversor permite que geradores síncronos associados a turbinas eólicas possam ser conectados à rede elétrica, conforme o diagrama da figura 16.

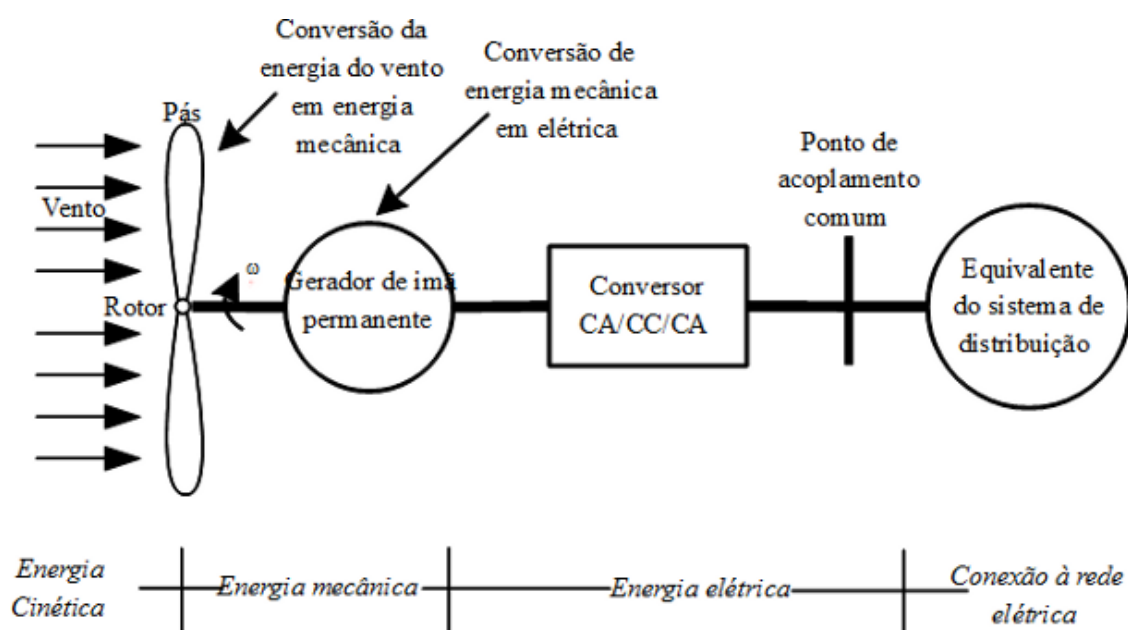


Figura 16 - Diagrama da interligação do AGPP com a rede elétrica  
Fonte: NETO (2012).

Atualmente, muitos sistemas usam como estrutura básica um estágio retificador CA-CC associado a um inversor com um transformador de baixa frequência para que se obtenha uma tensão senoidal regulada dentro dos limites estipulados pela norma. Entretanto, esta solução apresenta um elevado peso na estrutura e perdas elevadas em razão das altas correntes processadas pelo inversor em função da baixa frequência de operação do transformador acoplado à estrutura (PRAÇA, 2011).

Neste contexto, se faz necessário um novo estágio de operação por meio de conversores estáticos, de modo a viabilizar a elevação da tensão proveniente do aerogerador, geralmente algo em torno de 12 V e 24 V.

### 3 CONVERSORES

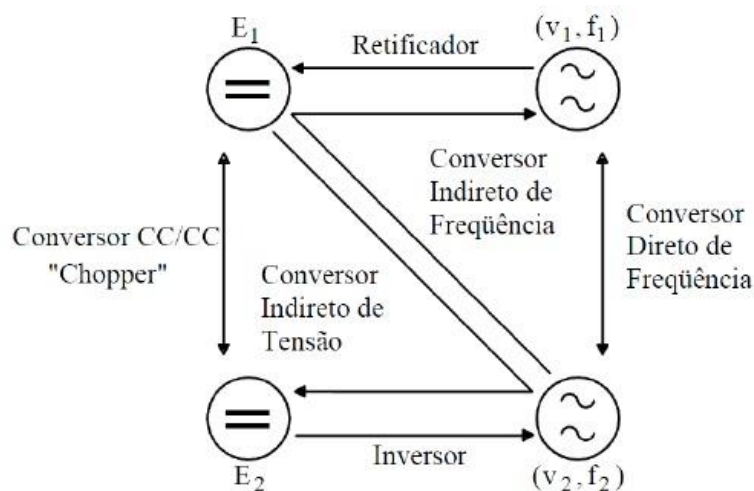
#### 3.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os sistemas conectados à rede podem apresentar diferentes configurações. Estas configurações podem ser comumente enquadradas em duas categorias: os sistemas centralizados com um único estágio de conversão de energia, denominados de inversor central, e os sistemas descentralizados os quais empregam conversores estáticos, com o intuito de assegurar um maior aproveitamento da energia gerada (DREHER, 2012).

Segundo Barbi (2006) o controle do fluxo de energia elétrica entre dois ou mais sistemas elétricos distintos sempre foi uma das grandes preocupações dos engenheiros ao longo da história da engenharia elétrica. Tendo em vista que estes tipos de controle são empregados no tratamento de potência elevadas, sempre buscaram métodos com alto rendimento.

Em tal controle são utilizados interruptores como relés, contadores, retificadores a arco e etc., sendo estes interruptores os dispositivos de controle. Conversores estáticos são sistemas constituídos por elementos passivos (R, L e C) e elementos ativos (chaves), tais como diodos, tiristores, transistores, IGBT's e MOSFET's associados segundo uma lei pré-estabelecida, buscando a redução de peso, volume e custos, redução das perdas e aumento da densidade de potência, operação em frequências maiores e aumento do rendimento (ASSEF, 2013).

Principais funções dos Conversores Estáticos:



**Figura 17 - Principais funções dos conversores estáticos**  
 Fonte: BARBI (2006).

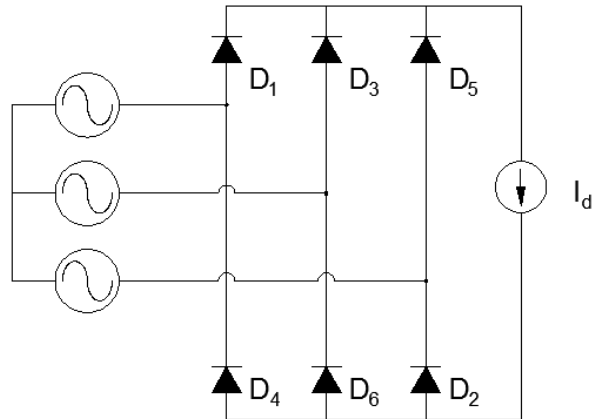
Principais aplicações:

- Fontes chaveadas;
- Controle dos motores de corrente contínua;
- Controle de motores de corrente alternada;
- Carregadores de bateria;
- Transmissão em corrente contínua;
- Filtros ativos de potência;
- Compensadores estáticos de potência reativa.

Circuitos retificadores podem ser controlados ou não-controlados, os últimos são circuitos a base de diodos que convertem uma tensão monofásica ou trifásica (CA) em uma tensão CC, normalmente utilizados para alimentação CC de circuitos eletrônicos. Já nos controlados um dos componentes utilizados são os tiristores para converter uma tensão monofásica ou trifásica (CA) em uma tensão CC variável, aplicados, por exemplo, no controle de velocidade de motores CC (BARBI, 2006)

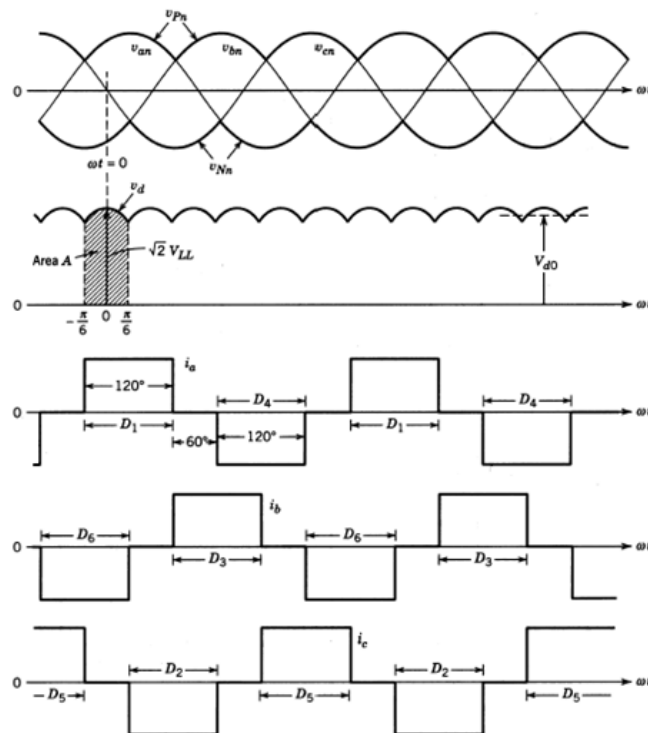
### **3.2. CIRCUITO RETIFICADOR**

Tendo em vista que o circuito retificador será aplicado a um gerador de pequeno porte, busca-se uma solução simples e com componentes mais baratos, portanto, será utilizado uma solução baseada na ponte de Graetz. Embora exista simplicidade e robustez nessa configuração, sérios problemas estão associados a esta solução, ao associar o retificador a um filtro capacitivo resulta em um baixo fator de potência, limitando a potência gerada pelo aerogerador. O baixo desempenho deste retificador pode ser melhorado associando-o a um conversor CC-CC. A topologia mais utilizada é a associação com um conversor *boost* que possui características de fonte de corrente na entrada, assim como o conversor utilizado no trabalho.



**Figura 18 - Ponte de Graetz com fonte de corrente**  
 Fonte: Adaptado de Bolourian (2010).

A ponte de Graetz com fonte de corrente na saída apresenta as seguintes formas de onda:



**Figura 19 - Formas de onda ponte de Graetz**  
 Fonte: Bolourian (2010).

O valor da tensão média de saída é dado pela equação (12).

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} \cdot V_i \cos \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_i = 1,35V_0 \quad (12)$$

O valor eficaz da corrente de entrada é dado pela equação (13).



$$I_{rms} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d \quad (13)$$

Por Fourier temos que a componente fundamental da corrente de fase é:

$$I_{s(n)} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} I_d \sin(n \cdot \omega t) d(\omega t) \cong \frac{4 \cdot I_d}{n \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} \left[ \cos \frac{n\pi}{6} - \cos \frac{n\pi}{2} \right] \quad (14)$$

$$I_{s1} = \frac{1}{\pi} \sqrt{6} \cdot I_d = 0,78 I_d \quad (15)$$

Considerando um fator de potência de deslocamento igual a 1 tem-se:

$$FP = FD \cdot \frac{I_{s1}}{I_d} = 1 \cdot \frac{3}{\pi} = 0,955 \quad (16)$$

Para este trabalho a saída do circuito retificador será conectada a nova configuração do conversor SEPIC modificado apresentado anteriormente, resultando no circuito da figura 20.

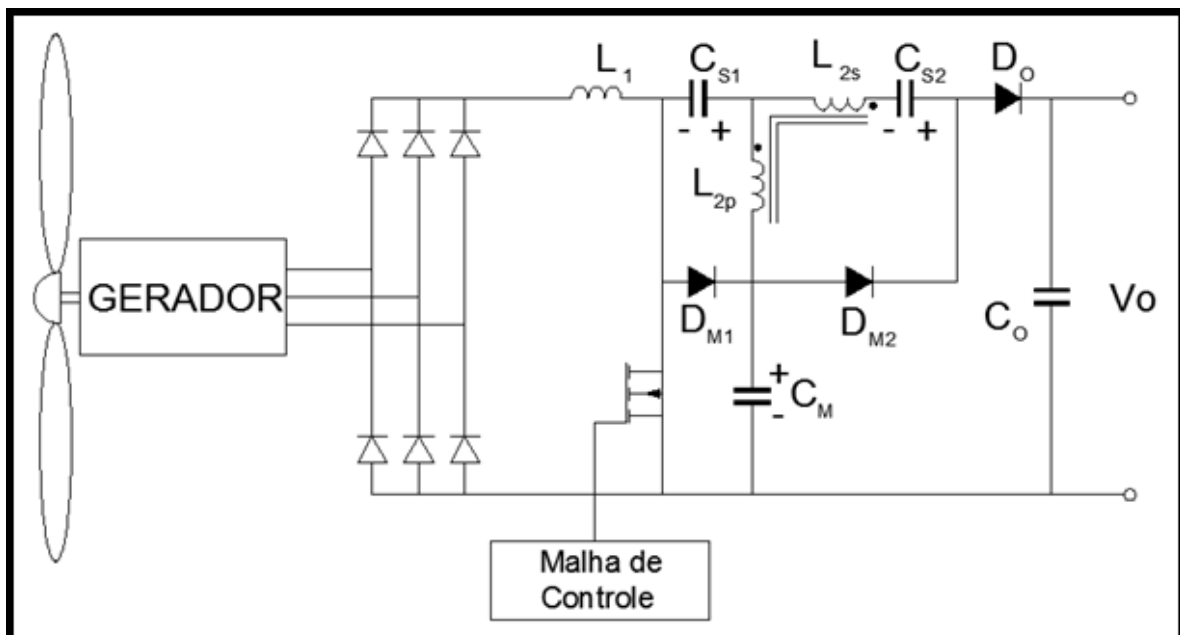


Figura 20 - Modelo simplificado do circuito final

O ajuste da tensão de saída nos conversores CC-CC é feita através do ajuste constante da quantidade de energia que é absorvida da fonte e injetada na carga, que por sua vez é controlada pela duração dos intervalos de absorção e injeção de energia.

### 3.3. CONVERSORES CC-CC

Tendo-se como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de geração eólica de pequeno porte conectado à rede de distribuição, percebe-se a necessidade de um estágio elevador de tensão, uma vez que as tensões fornecidas por geradores eólicos de pequeno porte tendem a ser relativamente baixas (tensões entre 12 V e 24 V). Essa tensão fornecida pelo aerogerador sofrerá uma elevação que possibilite a mesma a compor um barramento CC a fim de passar por um estágio inversor para assim ter sua tensão de saída com formato regular modulado com as características da rede. O foco desse trabalho se encontra na parte de estudo e desenvolvimento de um conversor estático de alto ganho CC-CC com a utilização do conversor SEPIC modificado, porém, antes serão abordadas as principais características dos conversores CC-CC.

A solução mais comum quando um alto ganho se faz necessário para implementação do primeiro estágio, é a utilização de conversores CC-CC isolados. A relação de transformação permite um aumento no ganho estático, porém também apresenta alguns problemas de redução de eficiência devido as perdas e os parâmetros intrínsecos do transformador. O transformador de potência apresenta uma importante contribuição para o peso e o volume, sendo que os conversores de energia utilizados com fontes renováveis devem ter uma alta eficiência devido ao alto custo da energia produzida, ou seja, a densidade de energia é um parâmetro muito importante (GULES et. al., 2014).

Conversores não isolados básicos fazem uso de um único par de chaves PWM, ou seja, uma chave ativa e um diodo e utilizam dispositivos de armazenamento de energia como capacitores e indutores como forma de estabilizar as variações de tensão e/ou corrente em seus terminais de entrada e de saída. Pode-se representar a operação do conversor CC-CC de maneira simplificada conforme a figura 21.



Figura 21 - Representação simplificada de um conversor CC-CC.

A fonte de tensão  $V_i$  fornece energia elétrica ao Conversor CC-CC e este fornece energia elétrica a fonte  $V_o$ . Logo, o conversor pode ser conceituado como um sistema formado por semicondutores de potência operando como interruptores e por elementos passivos, como indutores e capacitores com o objetivo de controlar o fluxo de potência da fonte de entrada  $V_i$  para a fonte de saída  $V_o$ . A variável de controle do sistema é conhecida como razão cíclica (*Duty-cycle*) e representada por “D”, sendo  $0 \leq D \leq 1$ .

Conforme dito anteriormente, em conversores ideais, as perdas internas são nulas e a potência de saída ( $P_o$ ) é igual a potência de entrada ( $P_i$ ).

O ganho estático de um conversor CC-CC é definido pela equação (17).

$$q = \frac{V_o}{V_i} \quad (17)$$

Conversores CC-CC não isolados clássicos apresentam um ganho estático limitado. O conversor *boost* é um dos conversores CC-CC não isolado mais utilizados e normalmente opera com performance adequada com uma razão cíclica próxima a 0.8, resultando em uma tensão de saída 5 vezes maior que a de entrada (GULES, et al. 2014).

### 3.3.1. Revisão controle conversores

O ajuste da tensão de saída nos conversores CC-CC é feita através do ajuste da quantidade de energia que é absorvida da fonte e injetada na carga, que por sua vez é controlada pela duração dos intervalos de absorção e injeção de energia. Estes dois processos constituem um ciclo de chaveamento, que é representado pela razão cíclica do conversor.

Comumente o controle da razão cíclica é feito com por PWM (*Pulse Width Modulation*), modulação em largura de pulso, com os métodos abaixo:

- *Single-loop control* (malha simples);
- *Voltage mode control* (malha de tensão);
- *Current-mode control* (malha de corrente).

A diferença fundamental nos dois últimos métodos é a modulação PWM. No método da tensão, uma rampa externa é comparada com o sinal de controle e gerar a razão cíclica. Já no método da corrente, a rampa da corrente do indutor é comparada no modulador PWM para gerar a razão cíclica.

No método da corrente um sensor, constituído por um resistor em série com a chave, detecta a corrente na chave, que é parte da corrente do indutor. Durante o período de condução, a corrente na chave é a mesma do indutor, realizando proteção contra sobrecorrente através do limite do valor do sinal de controle. Dentre os métodos de aplicação da malha de corrente, para os testes realizados neste trabalho, foi utilizado um controle PI (Proporcional Integral).

A ação integral corresponde a ter-se uma taxa de variação de saída em relação à entrada. Logo, com uma ação integral atua-se beneficemente na resposta em regime permanente, tendendo a eliminar o erro no espaço estacionário, no entanto, esta ação prejudica o regime transitório. Portanto com um controlador PI pode-se melhorar a resposta transitória com a ação proporcional enquanto a ação integral corrige o erro em regime.

#### 3.3.1.1. Revisão MPPT

O máximo aproveitamento da capacidade de energia elétrica de um aerogerador é obtido quando o mesmo opera sempre no ponto de máxima potência (MPP), como foi visto no Capítulo 2 esse ponto varia de acordo com a velocidade do vento. Portanto, para aumentar a eficiência do sistema é importante que o aerogerador opere sobre o MPP o maior tempo possível, é necessário aplicar uma técnica que busque este ponto, mesmo com variações meteorológicas. Estas técnicas se baseiam no rastreamento do ponto de máxima potência.

“Com o intuito de maximizar a energia produzida e, desta forma, reduzir o tempo de amortização do investimento na implantação de um gerador, deve-se sempre buscar o ponto de maior potência do sistema, levando a uma maior produção de energia. Um circuito eletrônico (controlador) faz a busca do ponto de maior potência de um módulo ou conjunto de módulos. Este circuito é conhecido como MPPT (Maximum Power Point Tracking).” (DREHER, 2012)

De acordo com as mudanças da velocidade do vento, e conseqüentemente da velocidade de rotação do rotor eólico, o controlador MPPT deve mudar a característica da carga elétrica para otimizar potência elétrica de saída. “A eletrônica de potência vem tendo papel fundamental na modificação da característica da carga elétrica de aerogeradores. A energia elétrica é processada por conversores estáticos através dos quais é possível extrair a máxima energia disponível para cada velocidade de vento” (DAHER, 2006). Atualmente existem várias técnicas

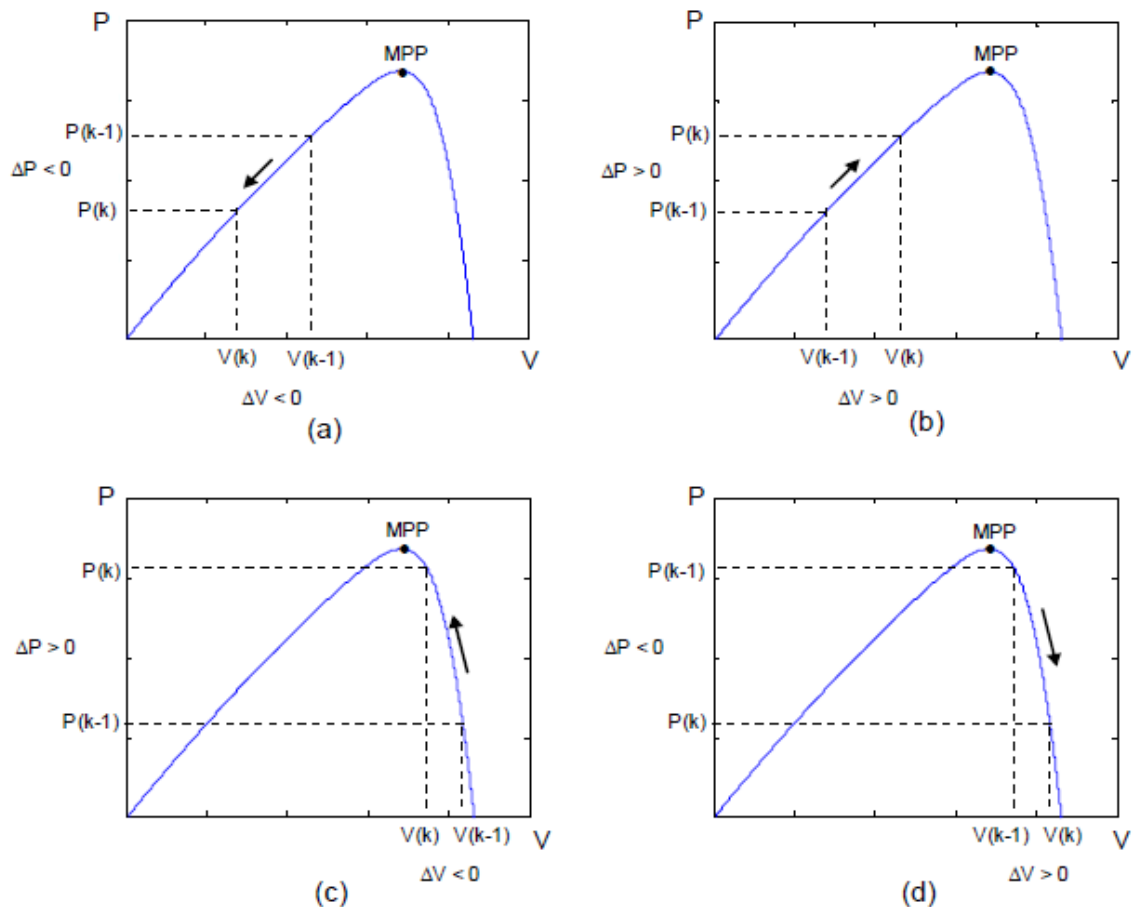
MPPT, estes métodos variam em complexidade, sensores requeridos, faixa de eficiência, velocidade de convergência, custos e implementação em hardware entre outros aspectos.

Dentre muitos métodos de MPPT mostrados na literatura, é possível citar os mais usais, como: controle de Tip Speed Ratio (TSR), controle de realimentação de potência, e o método de “Hill-Climb Searching” (HCS). Para alcançar o controle da extração máxima de potência da turbina eólica, neste trabalho é proposto o método HCS, onde a curva de máxima potência do aerogerador, necessário para o método de realimentação de potência, e as informações sobre a velocidade do vento e velocidade angular da turbina, necessários para o método TSR, não são necessárias.

O método de “Hill Climb Searching” foi proposto para continuamente procurar a máxima potência do aerogerador através da medição da potência de saída e de um algoritmo baseado em lógica. A vantagem deste método é ser independente dos parâmetros do aerogerador, porém, para obter boa performance, são utilizados recursos de inteligência artificial, que torna sua implementação mais difícil (ADEGAS, 2006). A técnica baseia-se em perturbar a tensão do sistema em uma determinada direção, e observar o comportamento da sua potência de saída. Através da comparação entre a potência calculada no ponto atual e a potência calculada no ponto anterior. Este método atua modificando a tensão de saída do terminal do aerogerador incrementando ou decrementando a razão cíclica do conversor. Se a potência aumentar, a perturbação continua na mesma direção, caso contrário o sistema é perturbado na direção oposta. A amplitude desta perturbação é de baixa para que não haja mudança brusca na potência e torne o sistema instável.

As leituras de potências devem ser feitas quando o sistema já estiver em regime permanente após ser perturbado e devem estar sincronizadas com a fonte de perturbação. Em regime permanente, o sistema oscila em torno do ponto de máxima potência desperdiçando uma fração de energia disponível. Reduzindo o tamanho da perturbação é possível minimizar essa oscilação, porém perturbações muito pequenas tornam o método lento para rastrear o MPP. Para se obter uma resposta rápida com a menor oscilação de potência possível, a corrente deve ser ajustada com uma taxa constante ou variável, de acordo com a necessidade. A

figura 22 apresenta casos possíveis para a potência em um aerogerador, de acordo com a variação da velocidade do vento.



**Figura 22 - Possíveis casos de potência em um aerogerador**  
**Fonte: López (2009).**

Para realizar este controle se faz necessário a definição de dois parâmetros. O primeiro é o período de amostragem ( $T_a$ ) e o segundo é o tamanho da perturbação ( $\Delta V$ ) aplicada à tensão de referência.  $T_a$  diz respeito ao intervalo de tempo em que é amostrada a tensão e a corrente do aerogerador. Com relação a  $\Delta V$ , existe uma limitação prática que impede a escolha de perturbações muito pequenas. Segundo López, as perturbações na tensão de referência não devem ter a mesma ordem de grandeza que as oscilações presentes na tensão de barramento CC provocadas pelas não linearidades do conversor de potência e ruídos nas medições.

“A escolha de um período de amostragem pequeno permitiria detectar rapidamente modificações nas condições meteorológicas, rastreando em menor tempo o novo MPP. Porém, existe uma limitação para o valor

mínimo de  $T_a$  imposta pela dinâmica do conversor de potência. O  $T_a$  deve ser escolhido como sendo superior ao tempo de estabilização da tensão de saída do conversor para evitar instabilidade da técnica MPPT” (LÓPEZ, 2009).

Supondo alterações muito rápidas na velocidade do vento, o método HCS apresenta limitações a serem consideradas, são elas: operação fora do ponto de máxima potência e, como já citado, erro em regime permanente e resposta dinâmica lenta.

O fluxograma básico do método HCS é apresentado na figura 23.

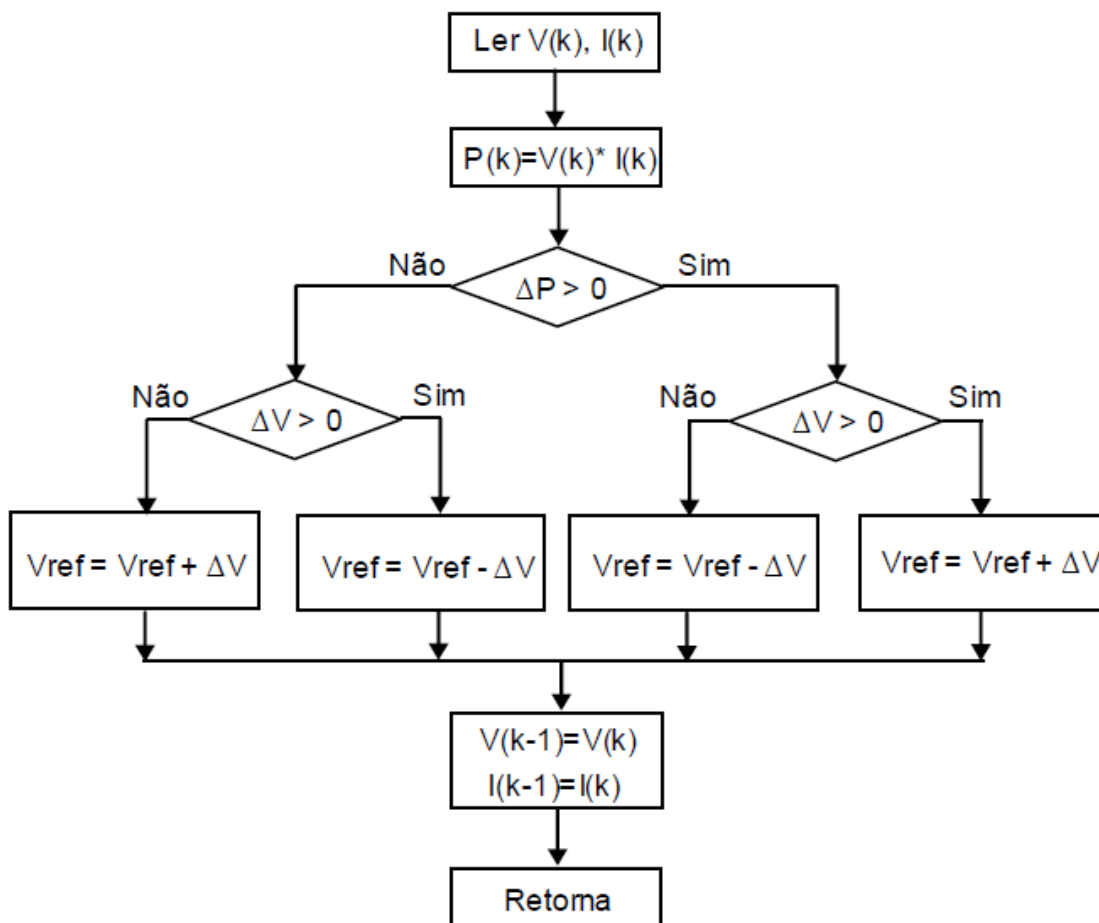


Figura 23 - Fluxograma simplificado do método HCS  
Fonte: López (2009).

3.3.2. Classificação dos conversores CC-CC quanto à topologia e ao ganho estático.

De um modo geral, existem diferentes abordagens que resultam em conversores com ganho estático elevado. Algumas destas abordagens consideram associação de conversores, outras a inclusão de circuitos específicos para elevação da tensão na saída do conversor e, outras fazem uso do ajuste dos níveis de tensão através de elementos magnéticos como o transformador (DREHER, 2012).

Existem diversas topologias de conversores CC-CC não isolados, sendo as seis topologias da tabela 3 as mais populares e difundidas.

**Tabela 3 - Conversores CC-CC não isolados**  
Fonte: Adaptado de Dreher (2012).

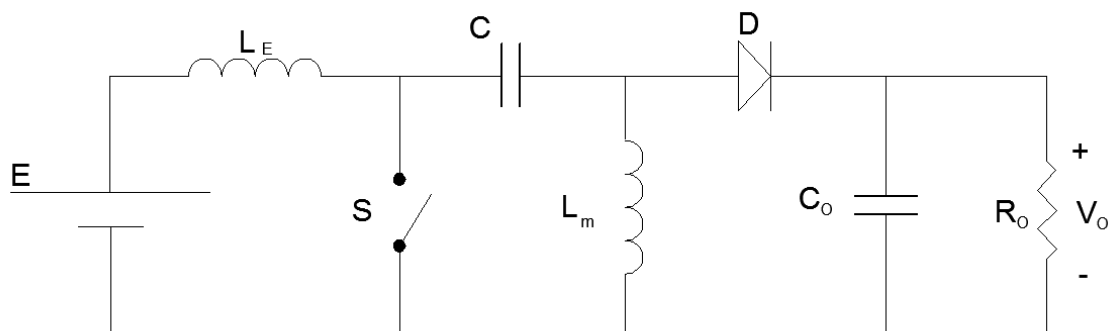
Conversor	Circuito	Ganho estático ( $V_i/V_o$ )
Buck		D
Boost		$1/(1-D)$
Buck-Boost		$D/(1-D)$
Cúk		$D/(1-D)$
Sepic		$D/(1-D)$
Zeta		$D/(1-D)$



A partir da tabela, é possível visualizar que dos ganhos estáticos representados, apenas o conversor *Buck* é abaixador (ganho estático  $< 1$  e a tensão de carga é sempre menor que a tensão da fonte de entrada) e o único que apresenta uma relação linear entre entrada e saída, sendo o mais fácil de ser controlado com o emprego das técnicas clássicas de controle. O conversor *Boost* é o único sempre elevador, tensão mínima da carga é igual a tensão da fonte entrada. Já os outros conversores possuem o mesmo ganho estático, portanto, geram na saída uma tensão menor que a tensão de entrada para  $D < 0,5$  e uma tensão maior que a entrada para  $D > 0,5$  (BARBI, 2006).

### 3.3.3. Conversor CC-CC SEPIC

A topologia do conversor SEPIC (*Single-Ended Primary Inductance Converter*) foi proposta em 1977, originalmente este conversor foi desenvolvido para funcionamento como elevador de tensão. Suas principais características são: simplicidade, possibilidade de operar como elevador ou abaixador de tensão, estrutura que pode ser naturalmente isolada, entrada com característica de fonte de corrente (pequena ondulação na corrente de entrada) e saída com característica de fonte de tensão, e sua principal desvantagem é a dificuldade no controle devido a topologia ser um sistema de 4ª ordem (BARBI, 2006).

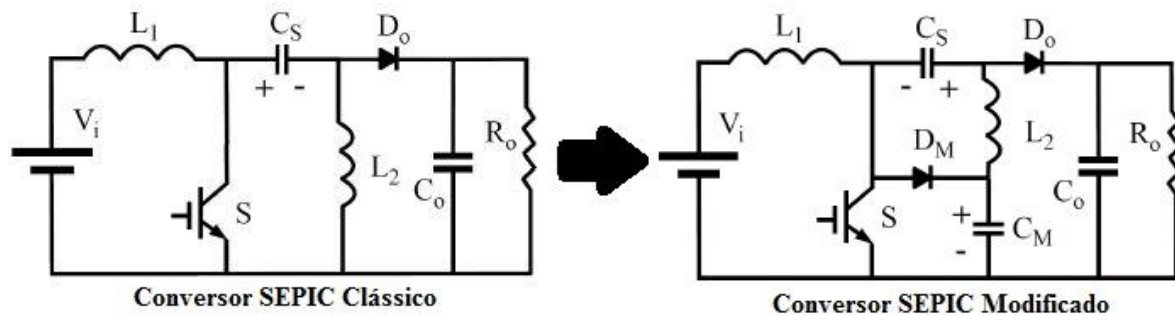


**Figura 24 - Circuito equivalente do conversor SEPIC**  
Fonte: Barbi (2006).

### 3.3.4. Conversor CC-CC SEPIC modificado sem acoplamento magnético

O ganho estático elevador e abaixador do conversor SEPIC é interessante por sua ampla capacidade de aplicação, no entanto, a tensão sobre a chave é igual a soma da tensão de entrada e da tensão de saída, conforme mostrado na equação (21), e seu ganho estático é menor que o do *Boost* convencional.

Esta topologia do conversor CC-CC SEPIC modificado sem acoplamento magnético é obtida com a adição do diodo  $D_M$  e o capacitor  $C_M$ .



**Figura 25 - Modificação do conversor SEPIC**  
Fonte: Adaptado de Gules (2014).

Esta modificação altera muitas características operacionais da topologia clássica. O capacitor adicionado é carregado com a tensão de saída do conversor *boost*, a polaridade do capacitor  $C_S$  é invertida.

#### 3.3.4.1. Etapas de Funcionamento

Abaixo são demonstradas as novas etapas de operação, em condução contínua, desta topologia.

##### **1ª Etapa ( $t_0 \rightarrow t_1$ )**

Em  $t_0$  a chave S é aberta e a energia armazenada no indutor de entrada  $L_1$  é transferida a saída através do capacitor  $C_S$  e do diodo  $D_o$  e também é transferida ao capacitor  $C_M$  através do diodo  $D_M$ , Portanto, a tensão sobre a chave é igual a tensão no capacitor  $C_M$  e a energia armazenada no indutor  $L_2$  é transferida a saída através do diodo  $D_o$ .

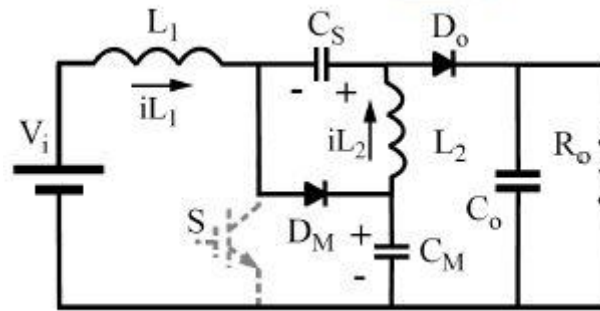


Figura 26 - 1ª Etapa de funcionamento do conversor SEPIC modificado

Fonte: Gules et. al. (2014).

### 2ª Etapa ( $t_1 \rightarrow t_2$ )

No instante  $t_1$  a chave S passa a conduzir, os diodos são bloqueados e os indutores armazenam a energia. A tensão de entrada é aplicada ao indutor de entrada  $L_1$  e a diferença de potencial no indutor  $L_2$  é dada pela diferença de tensão entre o capacitor  $C_s$  e  $C_M$ , sendo a tensão sobre o capacitor  $C_M$  maior que a tensão sobre o capacitor  $C_s$ .

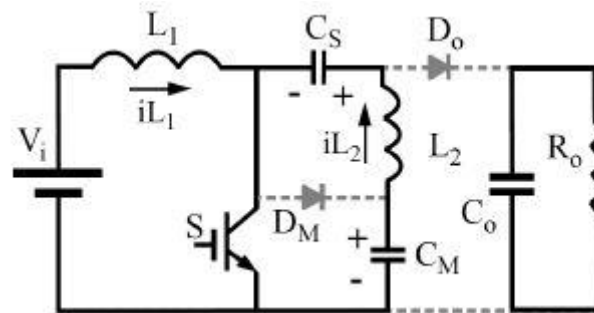


Figura 27 - 2ª Etapa de funcionamento do conversor SEPIC modificado

Fonte: Gules et. al. (2014).

A tensão máxima sobre todos os diodos e chaves é igual a tensão sobre o capacitor  $C_M$ , enquanto a tensão de saída é igual a soma da tensão dos dois capacitores.

$$V_o = V_{C_s} + V_{C_M} \quad (18)$$

A corrente média no indutor  $L_1$  é igual a corrente de entrada e a corrente de saída é igual a corrente média no indutor  $L_2$ . Como dito anteriormente, o capacitor  $C_M$  recebe a tensão de saída do conversor *Boost* e é dada pela equação (19).

$$\frac{V_{C_M}}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (19)$$

O ganho estático desta topologia em condução contínua é dado pela equação (20), logo o ganho estático é superior ao obtido com a topologia clássica do conversor *Boost*.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1 + D}{1 - D} \quad (20)$$

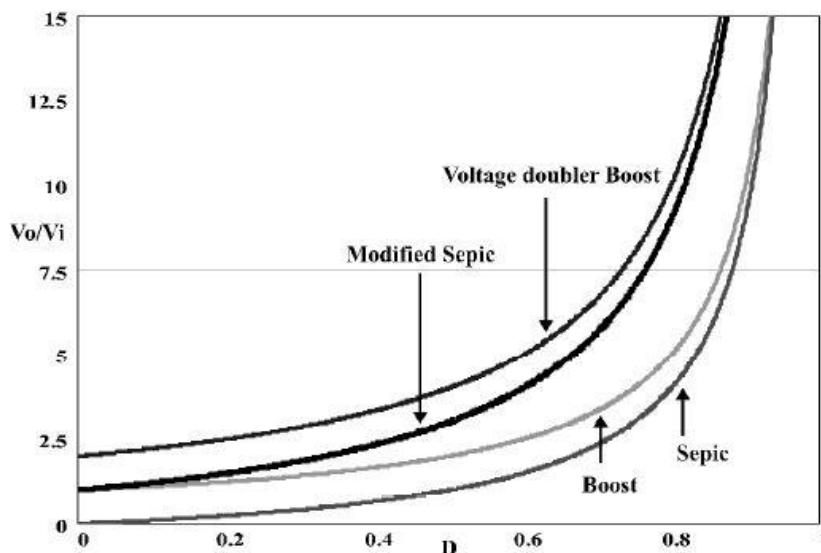


Figura 28 - Ganho estático x razão cíclica

Fonte: Gules et. al. (2014).

Logo, a tensão sobre a chave é igual a tensão  $V_{CM}$  e menor que a tensão de saída.

Na figura 28 são demonstradas as curvas de ganho estático em relação a razão cíclica de operação, a partir delas observa-se que esta topologia possui um ganho estático igual a 10 com uma razão cíclica  $D = 0,818$  e uma tensão sobre a chave aproximadamente igual a metade da tensão de saída.

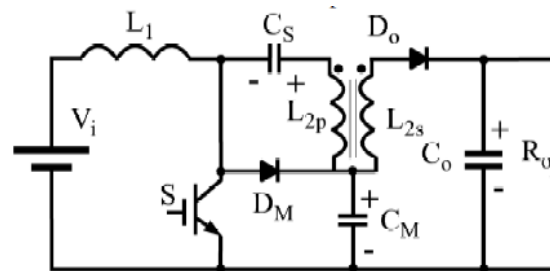
### 3.3.5. Conversor CC-CC SEPIC modificado com acoplamento magnético

“Em relação às topologias que empregam indutores acoplados pode-se dizer que a razão de transformação destes é usada para aumentar o ganho de tensão, tal como nos transformadores nas topologias isoladas.” (DREHER, 2012)

A topologia citada previamente sem acoplamento magnético possui o dobro do ganho estático do conversor *Boost* quando operando com uma alta razão cíclica, no entanto algumas aplicações necessitam de um ganho estático muito alto. A limitação quanto a última topologia apresentada se dá na necessidade de manter a

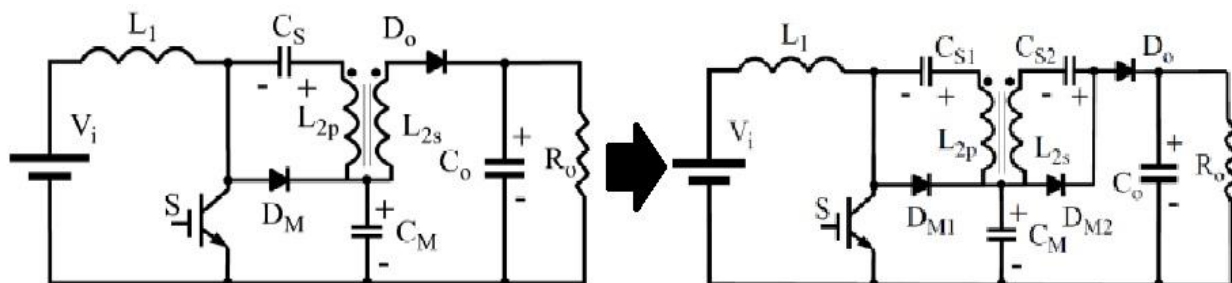
razão cíclica próxima de 0,85 para garantir o desempenho apresentado, resultando em um ganho estático máximo de aproximadamente 12.

Para aumentar o ganho estático do conversor sem aumentar a razão cíclica e sem acréscimo na tensão sobre a chave, acopla-se um enrolamento secundário ao indutor  $L_2$ , conforme a figura 29. A operação deste indutor é similar ao indutor do *buck-boost* e o enrolamento secundário pode aumentar a tensão de saída de acordo com a relação de espiras ( $n$ ).



**Figura 29 - Conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético**  
Fonte: Gules et. al. (2014).

Devido a existência do acoplamento do enrolamento ao indutor  $L_2$ , a estrutura apresenta sobretensão no diodo de saída  $D_o$ . A energia armazenada no indutor de dispersão resulta em sobretensões no diodo  $D_o$  devido à recuperação reversa do diodo de saída e a existência de uma indutância de dispersão do acoplamento magnético. Para resolver estes problemas, inclui-se um multiplicador de tensão no lado secundário do indutor  $L_2$ , esta alteração aumenta o ganho estático do conversor, reduz a tensão sobre o diodo de saída para um valor menor que a tensão de saída e a energia armazenada na indutância de dispersão é transferida para a saída. Logo, este multiplicador de tensão composto pelo diodo  $D_{M2}$  e pelo capacitor  $C_{S2}$  é um circuito grampeador não-dissipativo para o diodo de saída.



**Figura 30 - Conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético e multiplicador de tensão**  
Fonte: Adaptado de Gules et. al. (2014).

Nas soluções baseadas no conversor *boost* clássico que utilizam o indutor de entrada para conseguir o acoplamento magnético, a ondulação da corrente de entrada aumenta significativamente de acordo com o número de espiras do indutor. Logo, ao aumentar o número de espiras atingimos um ganho estático maior e consequentemente a ondulação da corrente de entrada também aumenta. Sendo que o acoplamento magnético não é feito através do indutor de entrada, esta topologia apresenta uma baixa ondulação de corrente de entrada e não possui relação com o acoplamento magnético.

### 3.3.5.1. Etapas de Funcionamento

Abaixo são demonstradas as 5 etapas de operação desta topologia e suas respectivas formas de onda teóricas.

#### 1ª Etapa ( $t_0 \rightarrow t_1$ )

A chave S conduz e o indutor  $L_1$  armazena energia, o capacitor  $C_{S2}$  é carregado pelo enrolamento secundário do indutor  $L_{S2}$  e pelo diodo  $D_{M2}$ . O diodo de saída está bloqueado e tem-se:

$$V_{Dmax} = V_o - V_{CM} \quad (21)$$

Em  $t_1$  a transferência de energia ao capacitor  $C_{S2}$  termina e o diodo  $D_{M2}$  é bloqueado.

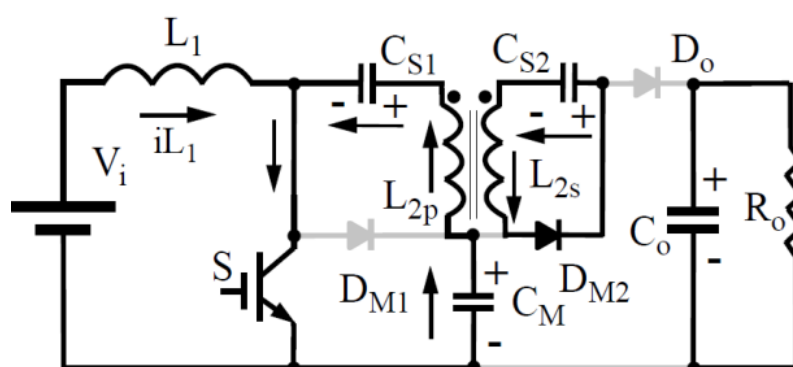


Figura 31 - Primeira etapa de operação  
Fonte: Gules et. al. (2014).

### 2ª Etapa ( $t_0 \rightarrow t_1$ )

Nesta etapa os indutores  $L_1$  e  $L_2$  armazenam energia e suas correntes aumentam linearmente. O diodo  $D_{M2}$  permanece bloqueado até  $t_2$  quando a chave abre.

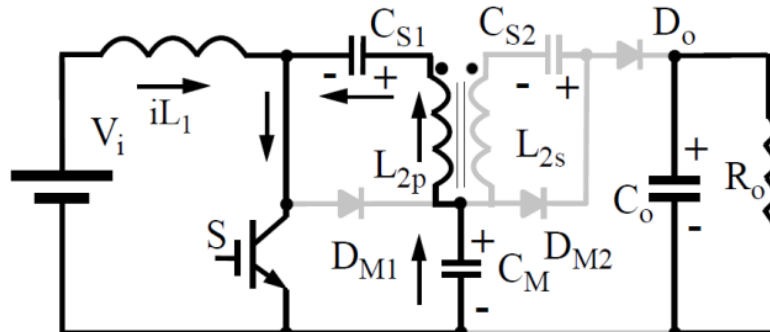


Figura 32 - Segunda etapa de operação  
Fonte: Gules et. al. (2014).

### 3ª Etapa ( $t_0 \rightarrow t_1$ )

Em  $t_2$  a chave abre, a energia armazenada no indutor  $L_1$  é transferida para o capacitor  $C_M$ . A energia é transmitida para a saída através do indutor  $L_2$ , do diodo  $D_o$  e dos capacitores  $C_{S1}$  e  $C_{S2}$ .

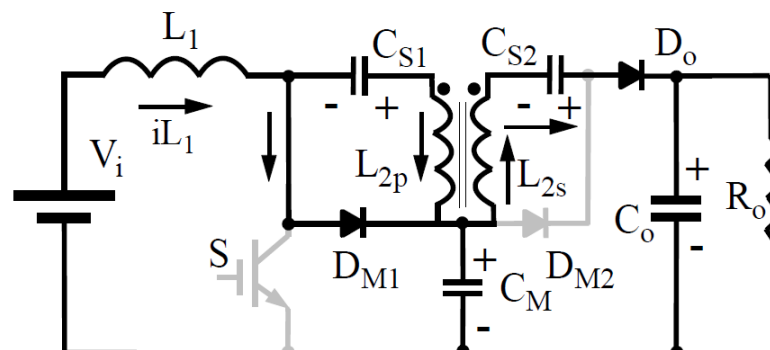


Figura 33 - Terceira etapa de operação  
Fonte: Gules et. al. (2014).

### 4ª Etapa ( $t_0 \rightarrow t_1$ )

Em  $t_3$  termina a transferência de energia para o capacitor  $C_M$  e o diodo  $D_{M1}$  se bloqueia. A transferência de energia à saída continua até  $t_4$  quando a chave é fechada novamente.

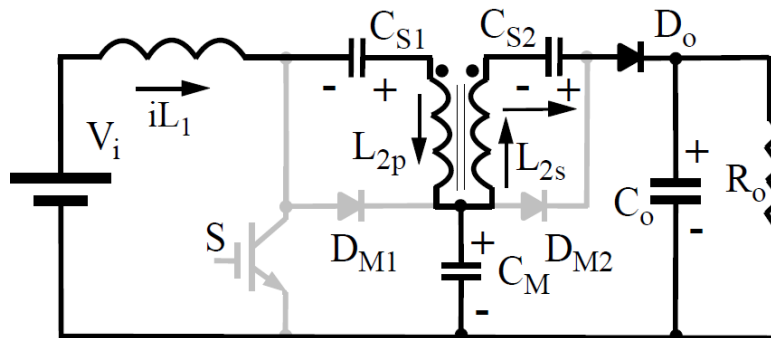


Figura 34 - Quarta etapa de operação  
Fonte: Gules et. al. (2014).

### 5ª Etapa ( $t_0 \rightarrow t_1$ )

Em  $t_4$ , com a chave fechada, a corrente no diodo de saída reduz linearmente e a razão  $di/dt$  é limitada pela indutância de dispersão do transformador, reduzindo os problemas de corrente de recuperação reversa dos diodos. O conversor retorna para a primeira etapa de operação assim que o diodo deixa de conduzir.

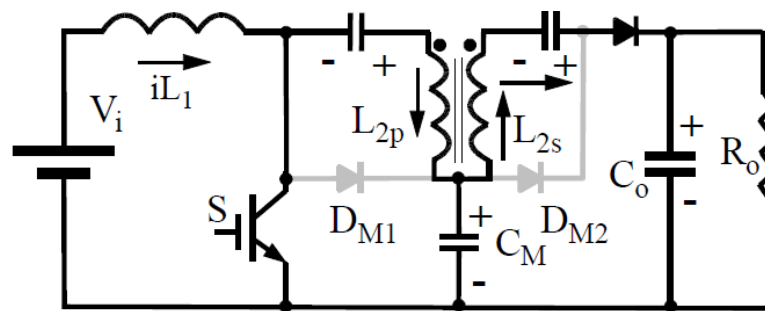


Figura 35 - Quinta etapa de operação  
Fonte: Gules et. al. (2014).

As tensões sobre a chave e sobre os diodos são menores que a tensão de saída, o chaveamento ocorre com corrente próxima de zero reduzindo significativamente as perdas sobre o componente. A razão de variação da corrente  $di/dt$  é limitada sobre os diodos pela presença da indutância de dispersão, reduzindo os efeitos negativos da corrente reversa de recuperação dos diodos.



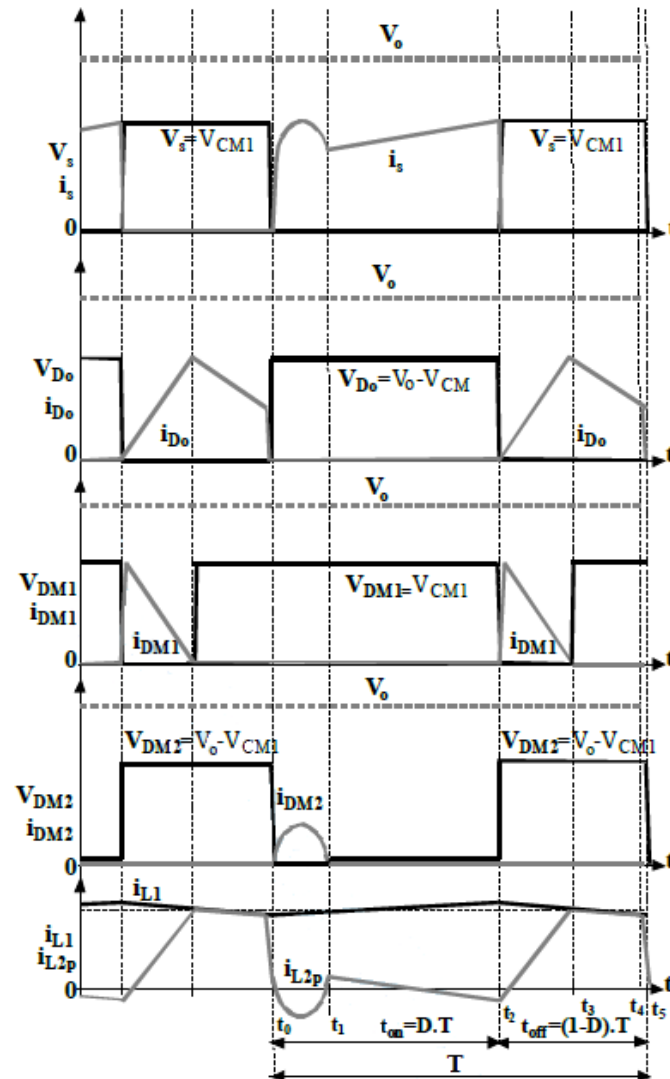


Figura 36 - Formas de onda condução contínua  
Fonte: Gules et. al. (2014).

O ganho estático da estrutura é dado por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(1+n)}{1-D} \quad (22)$$

Sendo 'n' a razão de transformação do acoplamento dado por:

$$n = \frac{N_{L2s}}{N_{L2p}} \quad (23)$$

Considerando uma razão cíclica igual a 0,8, a topologia apresenta ganho estático  $q=10$  para  $n=1$ ,  $q=15$  para  $n=2$ ,  $q=20$  para  $n=3$ , com uma tensão sobre a chave 5 vezes maior que a tensão de entrada. Na figura 37 são demonstradas as curvas de ganho estático em relação a razão cíclica de operação do SEPIC modificado com acoplamento magnético.

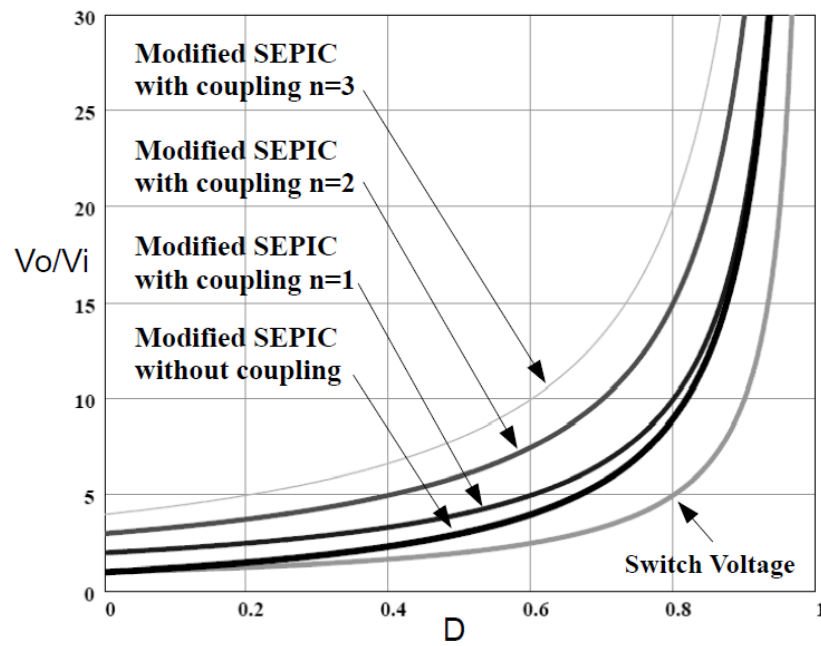


Figura 37 - Curva de ganho estático em função da razão cíclica  
Fonte: Gules et. al. (2014)

## 4 APRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR UTILIZADO

Conforme citado anteriormente, esta nova configuração é obtida com uma alteração no acoplamento do SEPIC modificado mostrado no capítulo anterior. Os enrolamentos do transformador são ligados sequencialmente para elevar a tensão na saída do circuito e também apresenta 5 etapas de funcionamento.

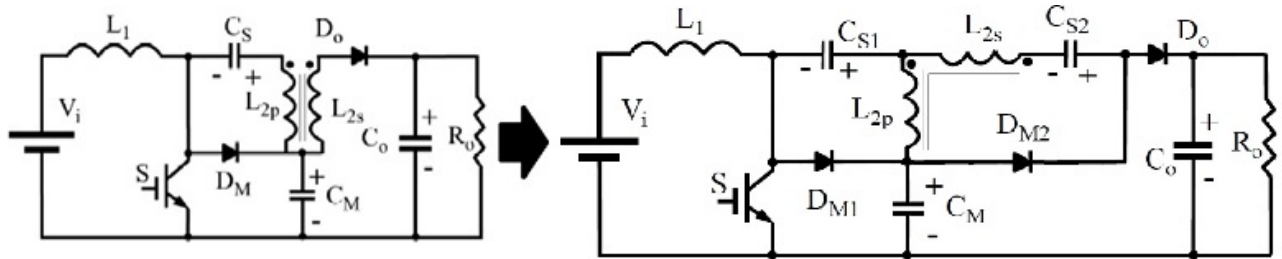


Figura 38 - Nova configuração de conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético  
Fonte: Adaptado de Gules et. al. (2014) e Rocha (2013).

### 4.1. ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DA CONFIGURAÇÃO

As etapas são explicadas abaixo considerando operação em regime permanente e todos os capacitores carregados.

#### 1ª Etapa ( $t_0 \rightarrow t_1$ ):

A chave  $S$  conduz e o indutor  $L_1$  do boost de entrada se carrega submetido a tensão de entrada  $V_i$ . O primário do transformador está submetido à diferença de tensão dos capacitores  $C_M$  e  $C_{S1}$ , que é igual a tensão  $V_i$ .

$$V_{L_{2p}} = V_i = V_{C_M} - V_{C_{S1}} \quad (24)$$

No secundário do transformador, aparece uma tensão igual a relação de espiras ( $n$ ) multiplicado por  $L_{2p}$ . O diodo  $D_{M2}$  entra em condução e o capacitor  $C_{S2}$  é carregado com a soma das tensões em  $L_2$ , ou seja:

$$V_{C_{S2}} = V_{L_{2p}} + V_{L_{2s}} = V_i + n \cdot V_i \quad (25)$$

A carga liberada por  $C_M$  circula pelo primário e secundário do  $L_2$  e carrega o capacitor  $C_{S1}$ .

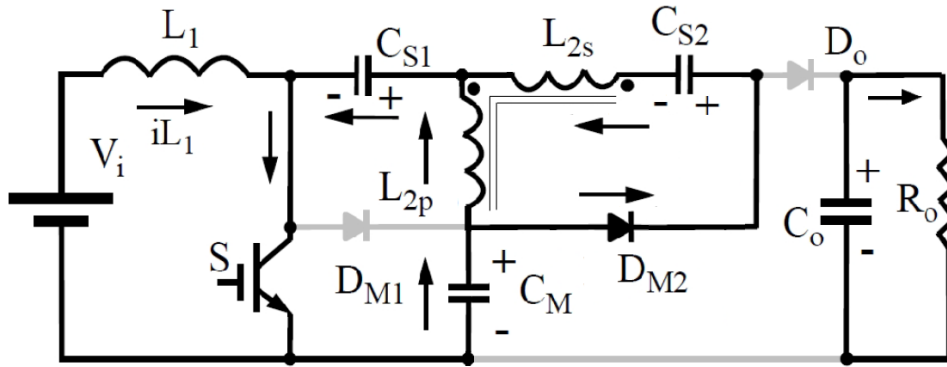


Figura 39 - 1ª Etapa de funcionamento da nova configuração  
Fonte: Rocha (2013).

### 2ª Etapa ( $t_1 \rightarrow t_2$ ):

Em  $t_1$  o capacitor  $C_{S2}$  está completamente carregado,  $D_{M2}$  deixa de conduzir e  $L_{2p}$  passa a se comportar como um indutor simples submetido a tensão de entrada. Logo, a inclinação da reta de corrente de carga é dada pela razão  $V_i/L_{2p}$ . A chave continua conduzindo de  $t_1$  a  $t_2$ , portanto  $L_1$  continua submetido à tensão de entrada. O capacitor  $C_{S1}$  continua a se carregar mas agora somente sobre influência da corrente que carrega o indutor  $L_{2p}$ .

Nesta etapa o capacitor  $C_M$  se descarrega e a carga continua submetida a tensão do capacitor de saída.

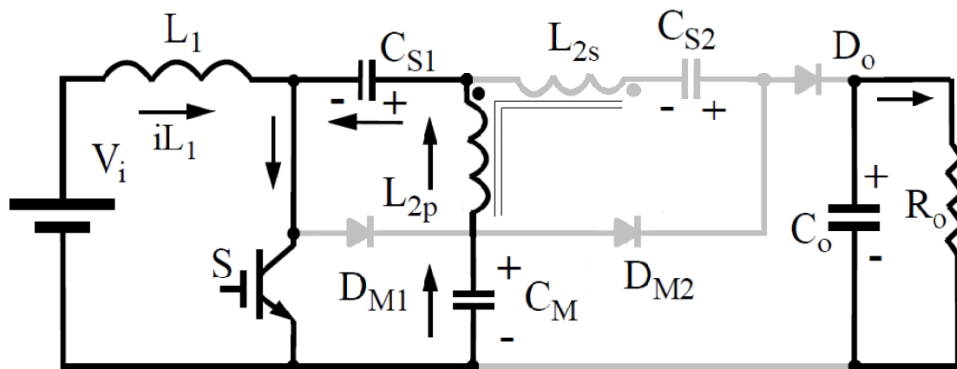


Figura 40 - 2ª Etapa de funcionamento  
Fonte: Rocha (2013).

### 3ª Etapa ( $t_2 \rightarrow t_3$ ):

A chave  $S$  abre e o diodo  $D_{M1}$  passa a conduzir. O indutor  $L_{2p}$  agora é submetido a uma tensão com polaridade inversa e valor igual à  $V_{C_{S1}}$ . A corrente de descarga do indutor de entrada divide-se para o diodo  $D_{M1}$  e para o capacitor  $C_{S1}$ .

O diodo  $D_{M1}$  continua conduzindo até o momento em que  $i_{L_{2p}} = i_{D_{M1}}$ , neste instante ( $t_3$ ) o diodo deixa de conduzir. A corrente que vai para a saída do circuito é a mesma que circula pelo secundário do transformador e é dada por:

$$i_{L_{2s}} = i_{L_{Cs1}} - i_{L_{2p}} \quad (26)$$

O valor médio de  $i_{L_{2s}}$  é igual a corrente na carga e igual a corrente média no diodo  $D_o$ .

O capacitor  $C_{S1}$  transfere carga para  $L_{2p}$  e  $C_M$  é carregado com a corrente de  $D_{M1}$ , igual a corrente de saída. Sendo que a tensão média nos enrolamentos do transformador deve ser nula devido à presença dos capacitores, as tensões nos enrolamentos se somam e temos:

$$V_{L_{2p}} = \frac{t_{on} \cdot V_i}{t_{off}} \quad (27)$$

$$V_{L_{2s}} = \frac{t_{on} \cdot n \cdot V_i}{t_{off}} \quad (28)$$

Assim, a tensão de saída é igual a:

$$V_o = V_{L_{2p}} + V_{L_{2s}} + V_{C_M} + V_{C_{S2}} \quad (29)$$

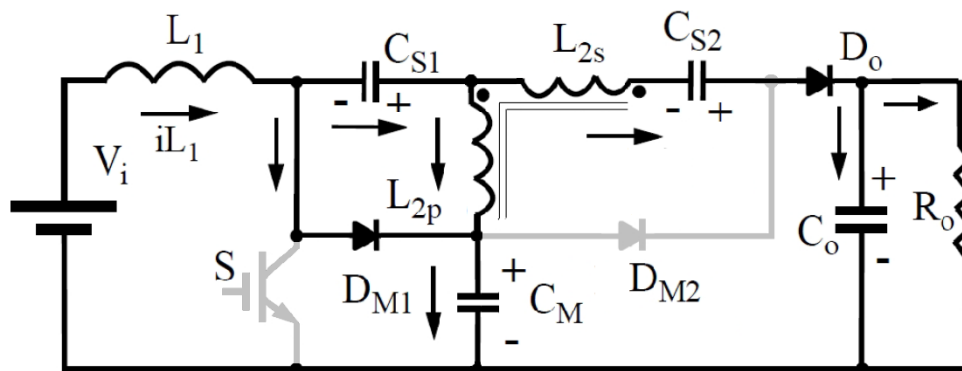


Figura 41 - 3ª Etapa de funcionamento  
Fonte: Rocha (2013).

#### 4ª Etapa ( $t_3 \rightarrow t_4$ ):

Conforme explicado na 3ª etapa, em  $t_3$  as correntes de  $L_2$  se igualam a corrente de  $D_{M1}$  e este deixa de conduzir. O capacitor  $C_M$  continua carregando enquanto  $C_{S1}$  descarrega. A soma das tensões de  $L_2$  se mantém e a tensão de saída é composta pelas mesmas tensões da 3ª etapa.

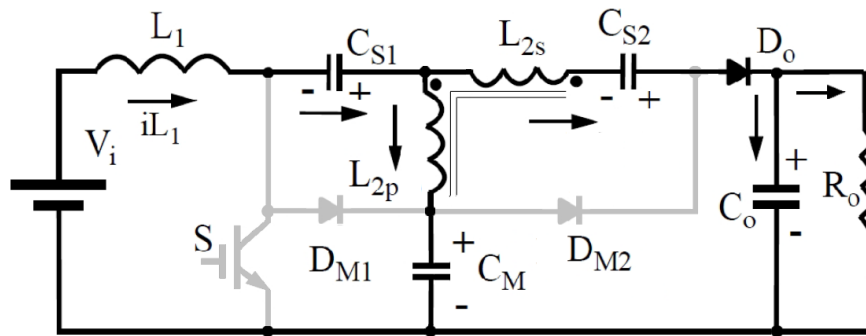


Figura 42 - 4ª Etapa de funcionamento  
Fonte: Rocha (2013).

### 5ª Etapa ( $t_4 \rightarrow t_5$ ):

A chave S se fecha novamente e volta a conduzir. A corrente do diodo  $D_o$  decresce até que deixa de conduzir e há inversão da corrente em  $L_{2s}$ , neste instante o sistema retorna para a primeira etapa de operação.

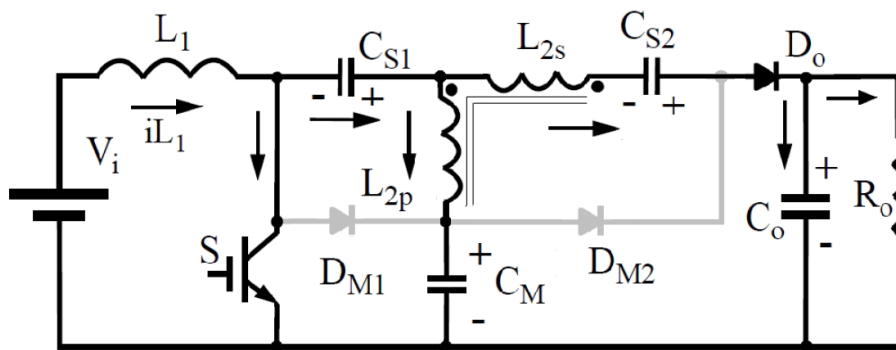


Figura 43 - 5ª Etapa de funcionamento  
Fonte: Rocha (2013).

Nesta nova configuração temos um *boost* na entrada, portanto a tensão sobre o capacitor é igual à tensão de um circuito *boost* convencional nas mesmas configurações. Pela fórmula convencional temos uma das parcelas que compõem a tensão de saída:

$$V_{C_M} = \frac{1}{1-D} \cdot V_i \quad (30)$$

De (28) nota-se a primeira contribuição do transformador desta configuração, na tensão de carga do capacitor  $C_{S2}$ .  $L_{2p}$  e  $L_{2s}$  ficam submetidos a  $V_i$  e  $n \cdot V_i$ , respectivamente, durante todo o tempo em que a chave permanece fechada ( $t_{on}$ ). A segunda contribuição do transformador aparece quando a chave abre,  $L_{2p}$  e  $L_{2s}$

invertem a polaridade da tensão já que a tensão média em cada enrolamento deve ser nula. Logo, partindo das equações (27) e (28) tem-se:

$$V_{L_{2p}} = \frac{V_i \cdot t_{on}}{t_{off}} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{T \cdot (1 - D)} = \frac{V_i \cdot D}{1 - D} \quad (31)$$

$$V_{L_{2s}} = \frac{V_i \cdot n \cdot t_{on}}{t_{off}} = \frac{V_i \cdot n \cdot D \cdot T}{T \cdot (1 - D)} = \frac{V_i \cdot n \cdot D}{1 - D} \quad (32)$$

Das equações acima e (25) têm-se que:

$$V_{L_{2p}} + V_{L_{2s}} = \frac{V_i \cdot D}{1 - D} + \frac{V_i \cdot n \cdot D}{1 - D} = \frac{V_{CS2} \cdot D}{1 - D} \quad (33)$$

Conforme (29) a tensão de saída é composta pelo somatório das tensões em  $L_{2p}$ ,  $L_{2s}$ ,  $V_{CM}$  e  $V_{S2}$ .

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} + V_i + n \cdot V_i + \frac{V_i \cdot D}{1 - D} + \frac{V_i \cdot n \cdot D}{1 - D} \quad (34)$$

Isolando  $V_i$  temos

$$V_o = V_i \left( \frac{1}{1 - D} + 1 + n + \frac{D}{1 - D} + \frac{n \cdot D}{1 - D} \right) \quad (35)$$

Logo:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1 + 1 - D + n - n \cdot D + D + n \cdot D}{1 - D} \quad (36)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{2 + n}{1 - D} \quad (37)$$

Portanto o ganho estático é superior ao ganho estático da estrutura apresentada em 3.3.4 por  $1/1-D$  e as formas de onda são basicamente as mesmas, mostradas na figura 36.

## 5 ESTUDO QUALITATIVO DO CONVERSOR EM OPERAÇÃO

A fim de validar o funcionamento da topologia proposta, foram realizadas duas simulações. A primeira delas com o circuito de comando em malha aberta para avaliar o comportamento do circuito em relação a teoria e a segunda com circuito de controle com malha de corrente, ambas com 24 V de tensão de pico na entrada, potência de saída igual a 200 W e frequência de chaveamento igual a 50 kHz.

### 5.1. SIMULAÇÕES OPERANDO EM MALHA ABERTA

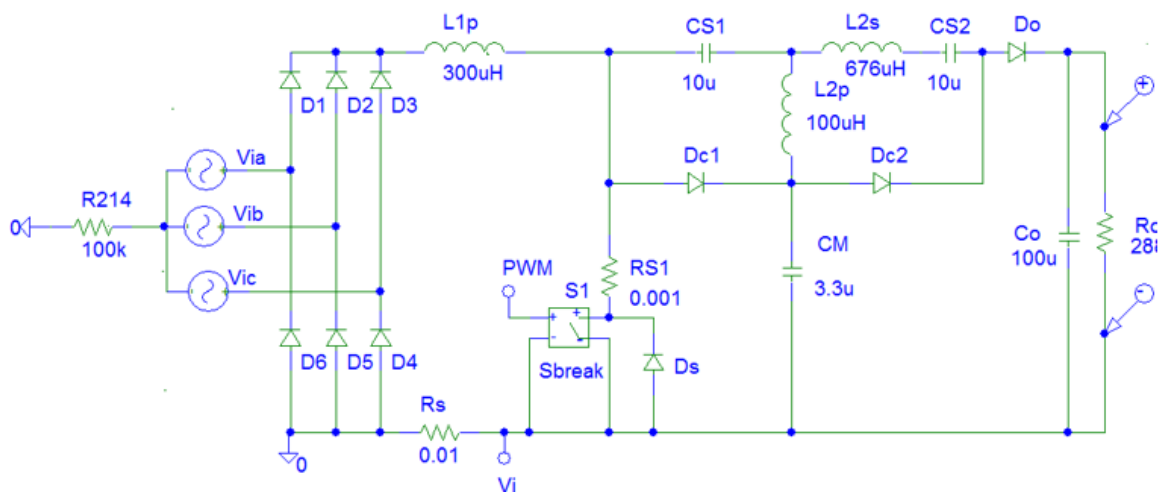


Figura 44 - Etapa de potência da topologia proposta

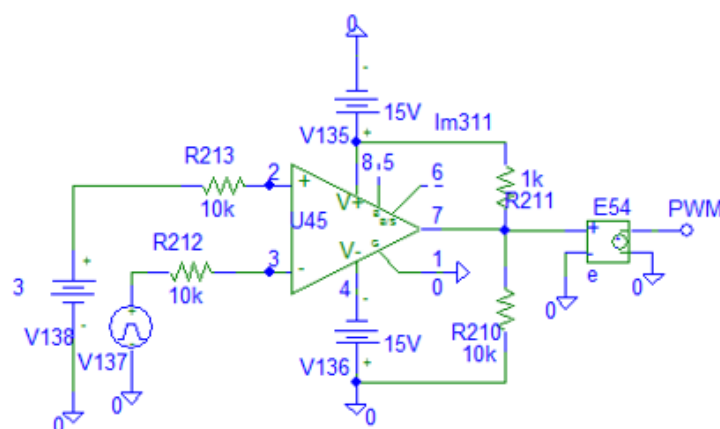


Figura 45 - Circuito de comando em malha aberta



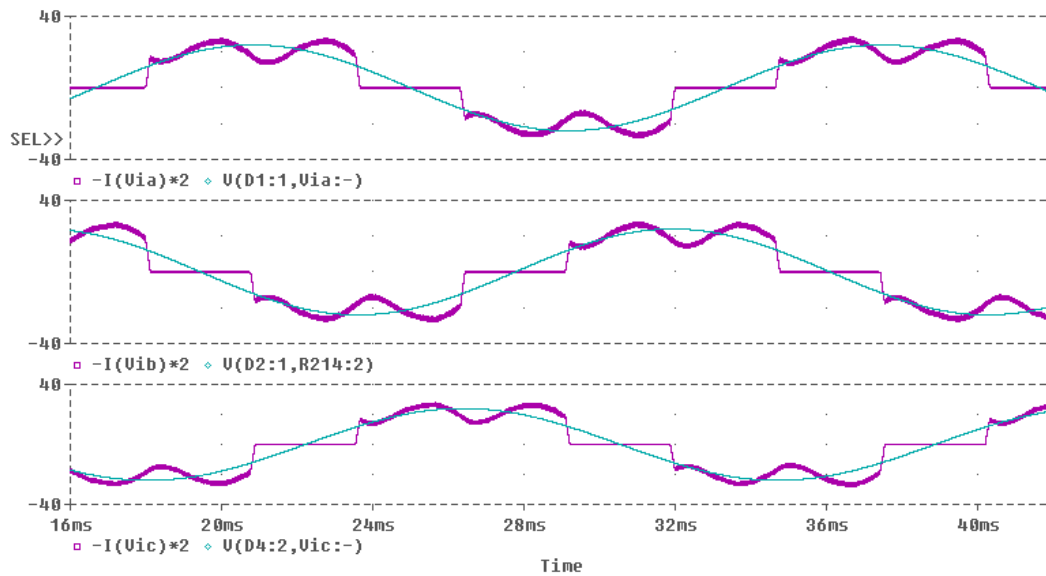


Figura 46 - Correntes e tensões nas três fases do gerador (corrente multiplicada por 2)

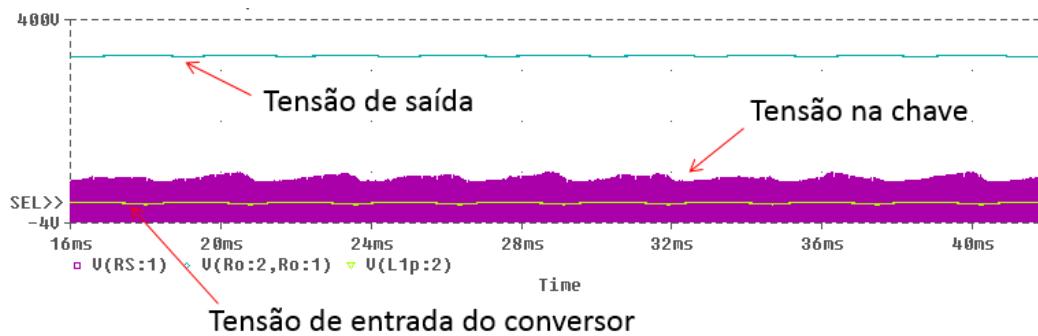


Figura 47 - Formas de onda de  $V_i$ ,  $V_o$  e  $V_s$  em malha aberta

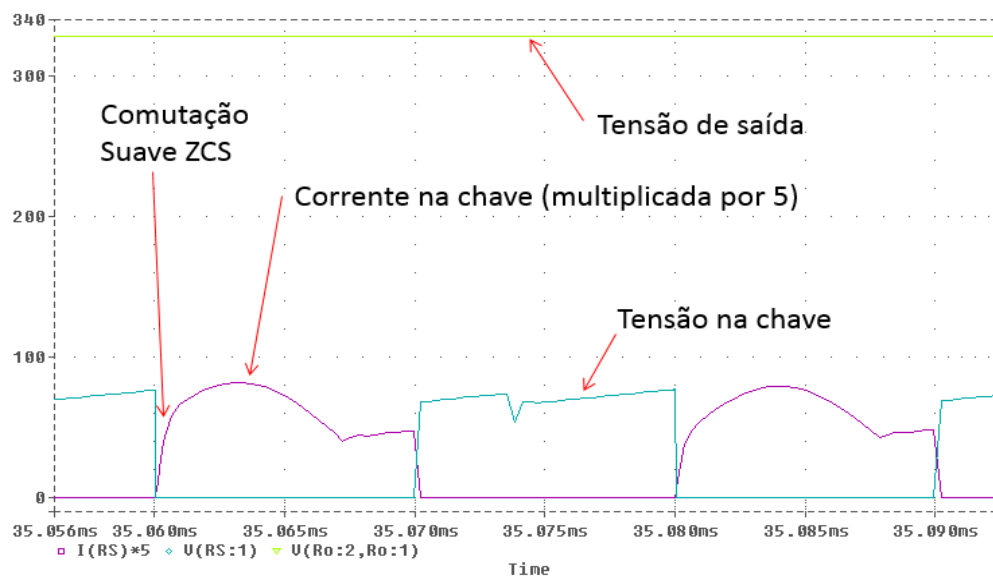
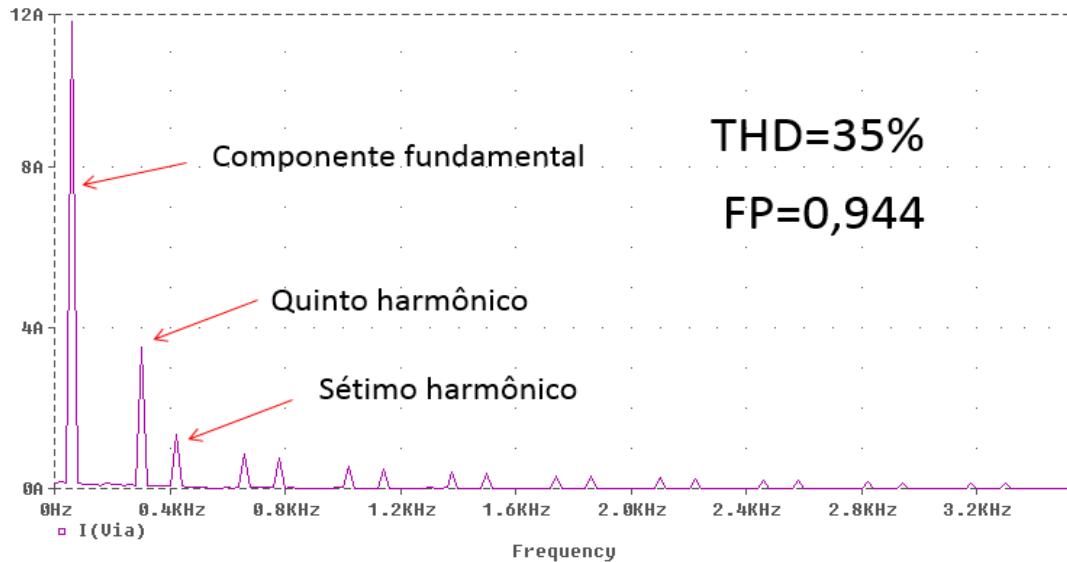


Figura 48 - Formas de onda  $V_s$  e  $I_s$  em malha aberta

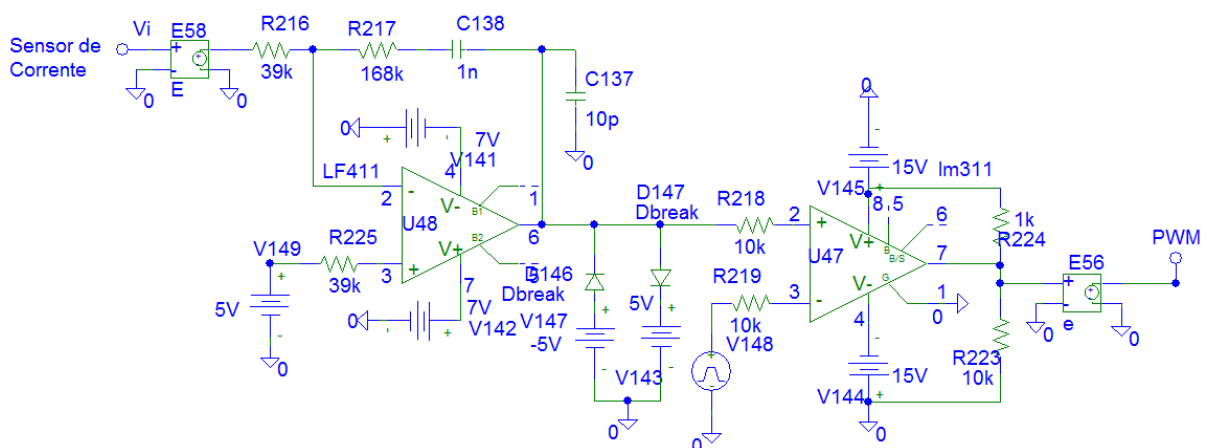
Observa-se que a tensão na chave representa uma fração da tensão de saída do conversor. A comutação suave, com corrente nula, na chave ocorre devido a presença da indutância de dispersão. Os resultados obtidos demonstram que o sistema se comportou como o esperado.



**Figura 49 - Espectro harmônico do sistema**

Na figura 49, está sendo mostrado o espectro harmônico da corrente de entrada. Observa-se que a taxa de distorção harmônica total foi de 35% e o fator de potência igual a 0,944. A seguir encontram-se os resultados da simulação com controle em malha fechada.

## 5.2. SIMULAÇÕES OPERANDO COM MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE



**Figura 50 - Circuito de comando em malha de corrente**

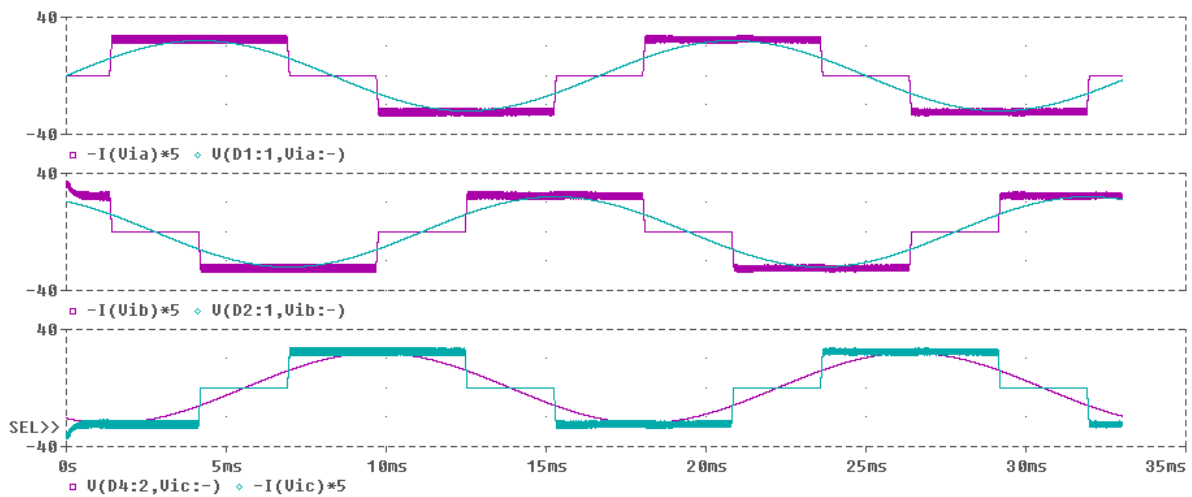


Figura 51 - Correntes e tensões nas três fases do gerador (corrente multiplicada por 5)

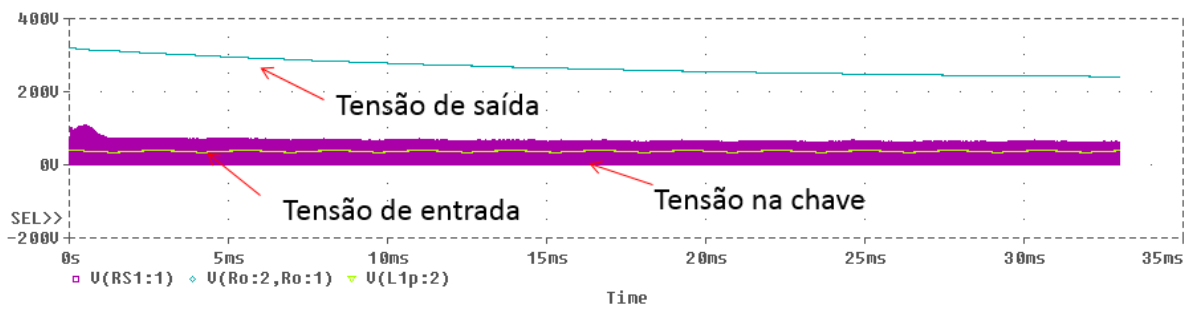


Figura 52 - Formas de onda  $V_i$ ,  $V_o$  e  $V_s$  com malha de corrente

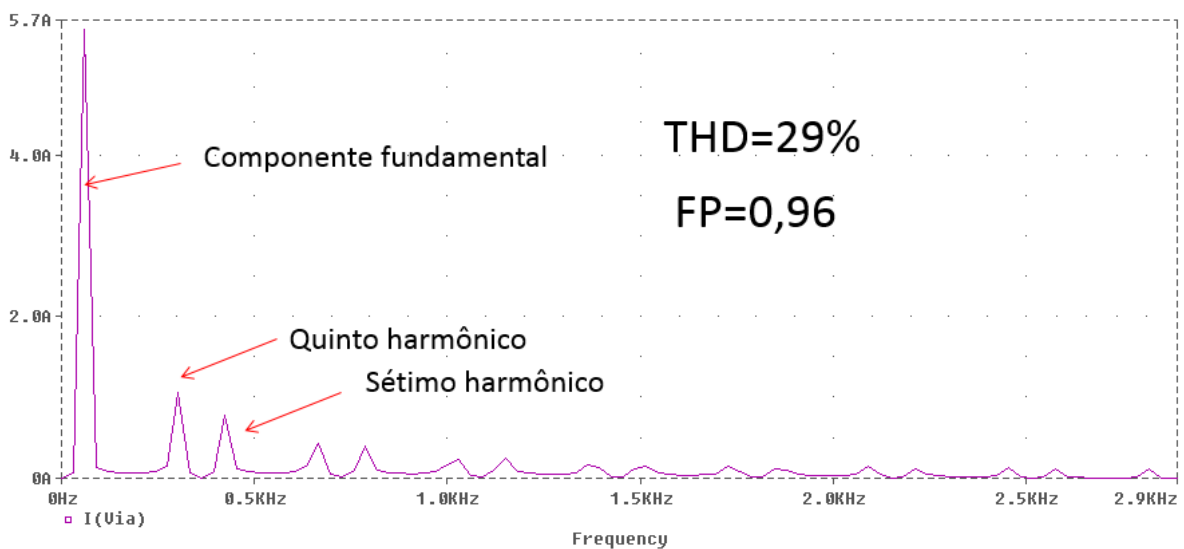
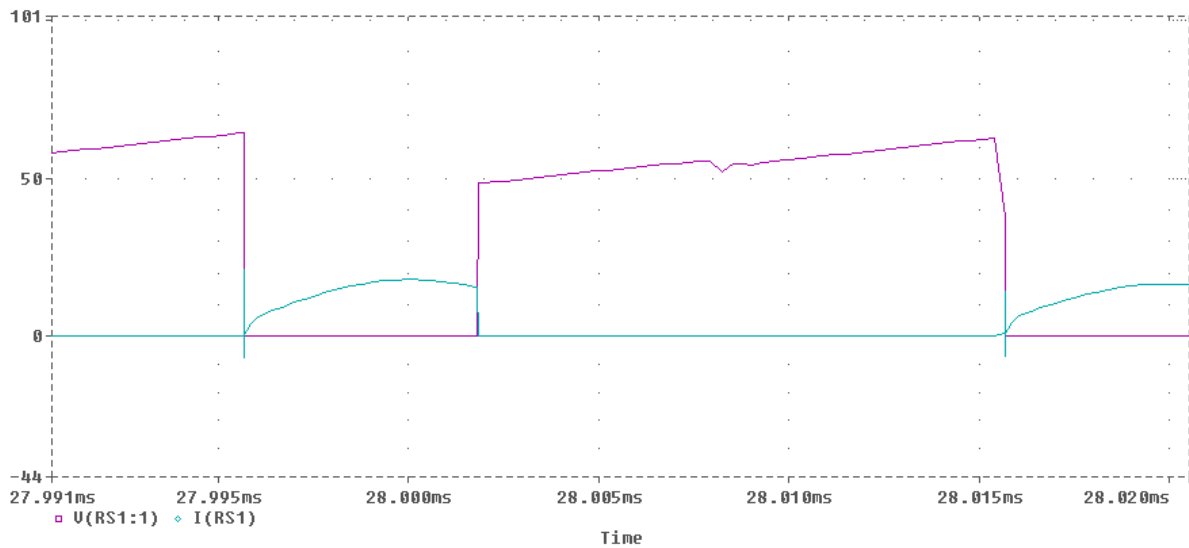


Figura 53 - Espectro harmônico do sistema com malha de corrente



**Figura 54 - Formas de onda  $V_s$  e  $I_s$  com malha de corrente**

A tensão de saída diminuiu devido a aplicação da malha de corrente, limitando a corrente de entrada em 5 A. Observa-se também uma melhora no conteúdo harmônico do sistema. As amplitudes das componentes apresentadas diminuíram expressivamente e também houve a elevação do fator de potência.

## 6 EXPERIMENTAÇÕES E PROJETO

### 6.1. PROJETO

Nesta etapa, com o intuito de colocar em prática o estudo realizado, as principais equações são aplicadas para projetar o conversor utilizado. Especificações iniciais escolhidas:

- Tensão de entrada ( $V_i$ ): 12 V
- Tensão de saída ( $V_o$ ): 240 V
- Potência de saída ( $P_o$ ): 120 W
- Frequência de chaveamento ( $F_s$ ): 30 kHz
- Relação de espiras do transformador ( $n$ ): 2,8
- Rendimento ( $\eta$ ): 93%

Considerando o ganho estático ( $V_o/V_i$ ) igual a 20 e a relação de espiras do transformador igual a 2,8, através da equação (38) obtém-se a razão cíclica nominal do conversor:

$$\frac{240}{12} = \frac{2 + 2,8}{1 - D} \quad (38)$$

$$D = 1 - \frac{(2 + 2,8) \cdot 12}{240} \quad (39)$$

$$D = 0,76 \quad (40)$$

#### 6.1.1. Cálculo dos componentes

##### a. Capacitores ( $C_M; C_{S_1}; C_{S_2}$ )

Os capacitores  $C_M$  e  $C_S$  apresentam a mesma ondulação da tensão ( $\Delta V_C$ ). Considerando nula a resistência série equivalente (RSE) do capacitor, o valor da capacitância pode ser calculado pela variação de carga do mesmo. Normalmente, um baixo valor de capacitância é obtido e um capacitor de baixo SER pode ser utilizado. Considerando uma ondulação de tensão do capacitor igual a 20% da

tensão nominal do capacitor  $C_M$ , as capacitâncias são calculadas pela equação (41).

$$C_M = C_{S_1} = C_{S_2} = \frac{I_o \cdot n}{\Delta V_C \cdot F_s} \quad (41)$$

Onde:

$$\Delta V_C = 20\% \frac{V_i}{1 - D} \quad (42)$$

$$\Delta V_C = \frac{20}{100} \cdot \frac{12}{1 - 0,76} = 10 \text{ V} \quad (43)$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (44)$$

$$I_o = \frac{120}{240} = 500 \text{ mA} \quad (45)$$

Portanto:

$$C_M = C_{S_1} = C_{S_2} = \frac{500m \cdot 2,8}{10 \cdot 30k} \quad (46)$$

$$C_M = C_{S_1} = C_{S_2} = 4,66 \mu F \quad (47)$$

A tensão no capacitor  $C_M$  é mostrada na equação (30) e calculada pela equação (48), enquanto a tensão no capacitor  $C_{S_1}$  é equivalente, porém subtraída pela tensão de entrada, conforme a equação (50).

$$V_{C_M} = \frac{12}{1 - 0,76} \quad (48)$$

$$V_{C_M} = 50 \text{ V} \quad (49)$$

$$V_{C_{S_1}} = V_{C_M} - V_i = 50 - 12 \quad (50)$$

$$V_{C_{S_1}} = 38 \text{ V} \quad (51)$$

Já a tensão no capacitor  $C_{S_2}$  é a soma das tensões nos dois enrolamentos do transformador durante a condução da chave, conforme mostrado pela equação (25) e calculada pela equação (52).

$$V_{C_{S_2}} = V_i + n \cdot V_i = 12 + 2,8 \cdot 12 \quad (52)$$

$$V_{C_{S_2}} = 45,6 \text{ V} \quad (53)$$

b. Indutor e Transformador ( $L_1; L_{2p}$  e  $L_{2s}$ ):

A ondulação de corrente ( $\Delta I_L$ ) dos indutores  $L_1$  e  $L_2$  são calculadas pela mesma equação, portanto, considerando  $L_1$  e  $L_2$  iguais, o valor da indutância pode ser calculado pela equação (54).

$$L_1 = L_{2p} = \frac{V_i \cdot D}{\Delta I_L \cdot F_s} \quad (54)$$

Onde:

$$\Delta I_L = 30\% I_{L_{MED}} \quad (55)$$

$$I_{L_{MED}} = I_{in} = \frac{P_i}{V_i} = \frac{P_o \cdot \eta}{V_i} \quad (56)$$

$$I_{L_{MED}} = \frac{120 \cdot 0,93}{12} = 9,3 \text{ A} \quad (57)$$

$$\Delta I_L = \frac{30}{100} \cdot 9,3 = 2,79 \text{ A} \quad (58)$$

Portanto:

$$L_1 = L_{2p} = \frac{12 \cdot 0,76}{2,79 \cdot 30k} \quad (59)$$

$$L_1 = L_{2p} = 108 \mu H \quad (60)$$

Como o indutor  $L_2$  contém um enrolamento secundário para o acoplamento magnético, considerando a relação de espiras igual a 2,8, a indutância do segundo enrolamento ( $L_{2s}$ ) é calculada por:

$$L_{2s} = n^2 \cdot L_{2p} = 2,8^2 \cdot 108 \mu \quad (61)$$

$$L_{2s} = 846 \mu H \quad (62)$$

A tensão nos enrolamentos do transformador é dada pela equação (63).

$$V_{L_{2p}} + V_{L_{2s}} = \frac{V_{C_{S2}} \cdot D}{1 - D} \quad (63)$$

$$V_{L_{2p}} + V_{L_{2s}} = \frac{45,6 \cdot 0,76}{1 - 0,76} = 144,4 \text{ V} \quad (64)$$

c. Tensão e corrente na chave ( $V_S ; I_{SRMS}$ )

A tensão na chave é igual à tensão no capacitor  $C_M$ , calculada na equação (49), portanto:

$$V_S = V_{C_M} = 50 V \quad (65)$$

A corrente eficaz na chave é igual a soma das correntes nos indutores  $L_1$  e  $L_2$  e pode ser calculada pela equação (66).

$$I_{S_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (I_1^2 + I_1 \cdot I_2 + I_2^2) \cdot D} \quad (66)$$

Onde  $I_1$  é a corrente na chave no início da condução e  $I_2$  é a corrente no término da condução, as duas parcelas podem ser calculadas pelas equações (67) e (68), respectivamente.

$$I_1 = \left( \frac{P_o}{V_i \cdot \eta} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) + \left( \frac{P_o}{V_o} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (67)$$

$$I_1 = \left( \frac{120}{12 \cdot 0,93} - \frac{3}{2} \right) + \left( \frac{120}{240} - \frac{3}{2} \right) \quad (68)$$

$$I_1 = 8,25 A \quad (69)$$

$$I_2 = 14,25 A \quad (70)$$

Portanto:

$$I_{S_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (8,25^2 + 8,25 \cdot 14,25 + 14,25^2) \cdot 0,76} \quad (71)$$

$$I_{S_{RMS}} = 9,92 A \quad (72)$$

d. Diodos ( $D_{M_1}; D_{M_2}; D_o$ )

Assim como para a tensão na chave, a tensão no diodo  $D_{M_1}$  é igual à tensão no capacitor  $C_M$ .

$$V_{D_{M_1}} = V_{C_M} = 50 V \quad (73)$$

As tensões nos diodos  $D_{M_2}$  e  $D_o$  são iguais e podem ser calculadas pela equação (74).

$$V_{D_{M_2}} = V_{D_o} = \frac{n \cdot V_i}{1 - D} \quad (74)$$

$$V_{D_{M_2}} = V_{D_o} = \frac{2,8 \cdot 12}{1 - 0,76} \quad (75)$$

$$V_{D_{M_2}} = V_{D_o} = 140 V \quad (76)$$



A corrente média de todos os diodos é aproximadamente igual à corrente de saída, portanto:

$$I_{D_{M1}} = I_{D_{M2}} = I_{D_o} = I_o = 500 \text{ mA} \quad (77)$$

Conforme a equação (29), verifica-se que o somatório de  $V_{C_M}$ ,  $V_{C_{S2}}$ ,  $V_{L_{2P}}$  e  $V_{L_{2S}}$  para a razão cíclica de 0,76 é igual à tensão de saída.

$$V_o = 50 \text{ V} + 45,6 \text{ V} + 144,4 \text{ V} = 240 \text{ V} \quad (78)$$

Com uma relação de espiras ligeiramente menor, tensão na chave reduzida e ponto de operação nominal abaixo de 0,8, o conversor projetado deverá alcançar o mesmo ganho estático da topologia sem a alteração no acoplamento do SEPIC modificado mostrado no capítulo 3.

## 6.2. EXPERIMENTAÇÕES

Os resultados experimentais foram obtidos com a implementação do conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético alterado, apresentado na figura 4. O circuito foi implementado seguindo os parâmetros apresentados na tabela 4 e com os componentes apresentados na tabela 5.

**Tabela 4 - Parâmetros do SEPIC modificado com acoplamento magnético alterado**

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada ( $V_i$ )	12,1 V
Tensão de saída ( $V_o$ )	240 V
Potência de saída ( $P_o$ )	120 W
Frequência de chaveamento ( $F_s$ )	30 kHz
Razão cíclica ( $D$ )	0,76
Tensão na chave ( $V_S$ )	50 V
Ganho estático ( $q$ )	20
Relação de espiras do transformador ( $n$ )	2,8

Tabela 5 - Componentes do SEPIC modificado com acoplamento magnético alterado

Componente	Especificação
$S$	IRFP90N20D
$C_M$	4,7 $\mu$ F/250 V
$C_{S_1}$	4,7 $\mu$ F/250 V
$C_{S_2}$	4,7 $\mu$ F/250 V
$L_1$	EE42/15 core IP12
$L_2$	EE42/15 core IP12
$D_{M_1}$	MUR860
$D_{M_2}$	MUR860
$D_o$	MUR860
$C_o$	100 $\mu$ F/400 V

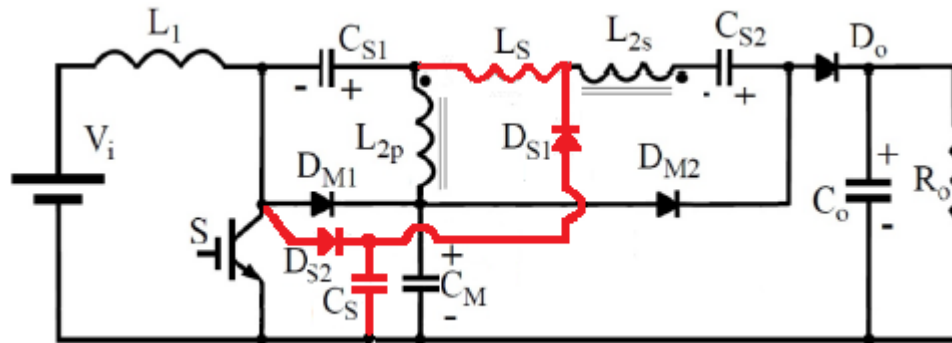
Todos os resultados experimentais foram obtidos com um osciloscópio digital TPS2024 (200MHZ-2GS/s) e um amplificador de corrente TCPA300 (100MHz) com uma sonda de corrente TCP312 (30A-100MHz) da Tektronix. A alimentação do circuito foi feita com uma fonte CC isolada (FCC 400-10i) da Supplier, fixa em 12,1 V.

#### 6.2.1. Testes operando em malha aberta

Com o intuito de avaliar a operação do conversor, o protótipo foi testado inicialmente com malha aberta e operando com uma carga resistiva igual a 115 W.

Nos primeiros testes as formas de onda de tensão da chave apresentavam uma elevada dispersão. Para melhorar a resposta do conversor foi adicionado um circuito *snubber*. Na figura 55, em vermelho destaca-se a configuração do circuito *snubber* no conversor, onde:

- Indutância ( $L_s$ ): 6  $\mu$ H
- Diodo ( $D_{s1}$ ): UF4007
- Diodo ( $D_{s2}$ ): UF4007
- Capacitância ( $C_s$ ): 3 nF



**Figura 55 - Conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético e circuito *snubber***

A indutância deste circuito limita a variação  $di/dt$  no início da condução e assim consegue-se uma comutação suave ZCS (*Zero-current switching*). Quando a chave deixa de conduzir, a energia armazenada no indutor do circuito *snubber* é transferida ao capacitor deste circuito. A tensão inicial neste capacitor é zero e sua capacitância reduzida limita o  $dv/dt$  da chave, quando o circuito passa a conduzir a energia neste capacitor é transferida ao capacitor  $C_{S1}$  até que a tensão no capacitor do *snubber* seja zero.

Os resultados experimentais obtidos com o conversor SEPIC modificado com acoplamento magnético alterado são similares às formas de onda apresentadas na figura 36 e são apresentados nas figuras 56 a 64.

Além da corrente na entrada, a figura 56 mostra a tensão de entrada próxima a 12 V e tensão de saída igual a 234 V. Como pode-se verificar, a tensão de saída está próxima do esperado, o que comprova o ganho próximo a 20 e uma razão cíclica igual a 0,76, conforme projetado.

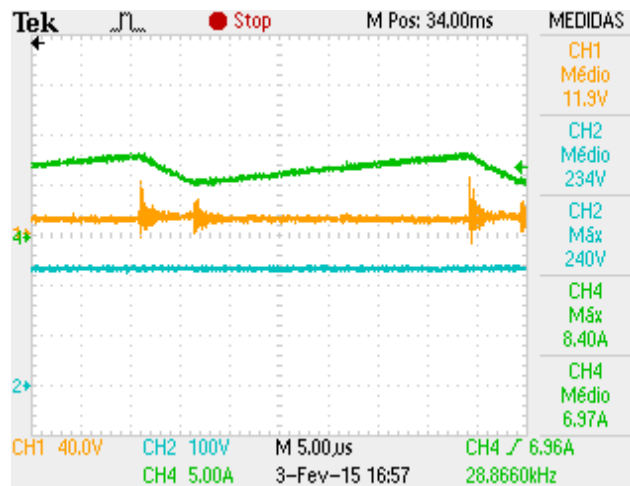


Figura 56 - Tensão (CH1) e corrente (CH4) de entrada e tensão de saída (CH2)

A figura 57 mostra a tensão e a corrente na chave, onde se verifica que a tensão está ligeiramente elevada em relação ao valor teórico 50 V, enquanto a corrente está abaixo do valor teórico. Esta tensão acima de 50 V pode ser causada pelas ondulações presentes na chave e pela dispersão da tensão como pode-se observar.

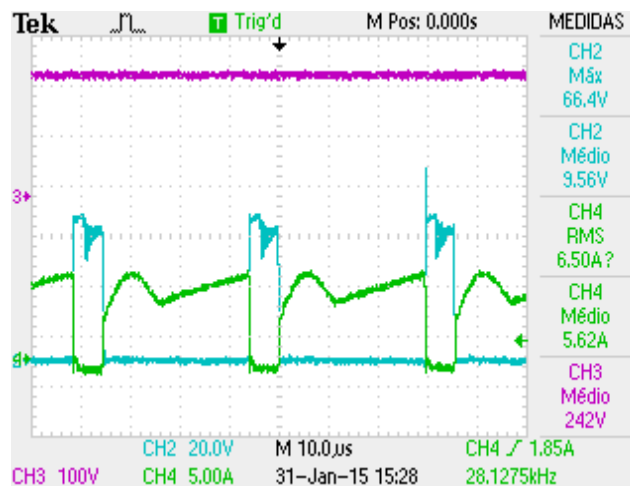


Figura 57 - Tensão (CH1) e corrente (CH4) na chave e tensão de saída (CH3)

Os detalhes da condução da chave podem ser visualizados nas figuras 58, 59 e 60.

Nas figuras 58 e 59, é possível notar a comutação suave (ZCS – Zero Current Switching). Ao aproximar o início da condução, verifica-se que a corrente na chave é muito próxima de zero durante o início da condução. Assim como a tensão

nula na chave, a redução das perdas de comutação ocorre devido a indutância de dispersão do transformador.

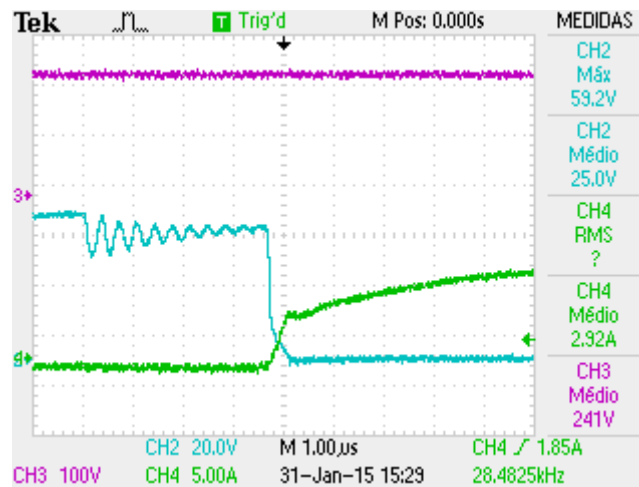


Figura 58 - Tensão (CH2) e corrente (CH4) na chave no início da condução

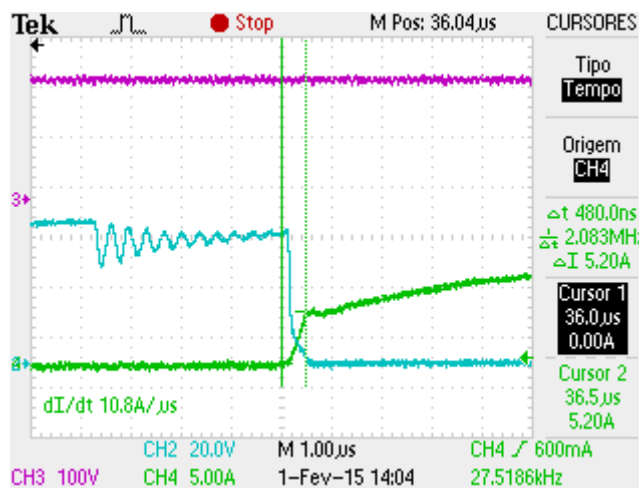


Figura 59 - Corrente zero no início da condução

Na figura 60 é mostrado o desligamento da chave, o qual apresenta um comportamento melhorado, com menos ondulação na tensão da chave que o esperado.

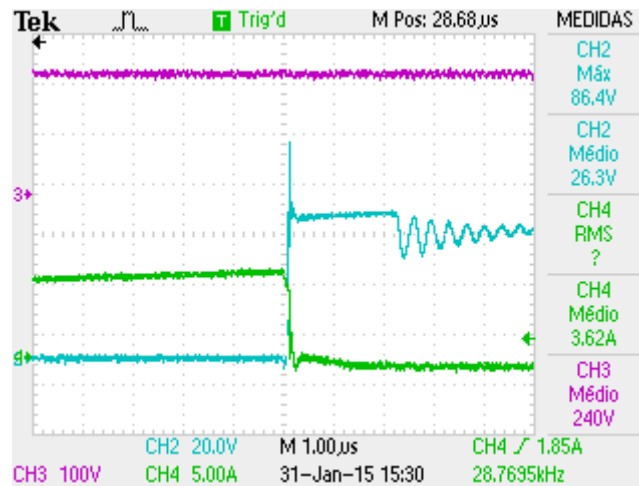


Figura 60 - Tensão (CH2) e corrente (CH4) na chave no término da condução

As formas de onda das correntes nos diodos  $D_{M_2}$  e  $D_o$  são apresentadas na figura 61. A corrente média no diodo  $D_o$  assemelha-se à corrente na carga e a corrente em  $D_{M_2}$  carrega o capacitor  $C_{S_2}$ . A corrente de recuperação reversa do diodo  $D_o$  é reduzida pela presença do indutor de dispersão.

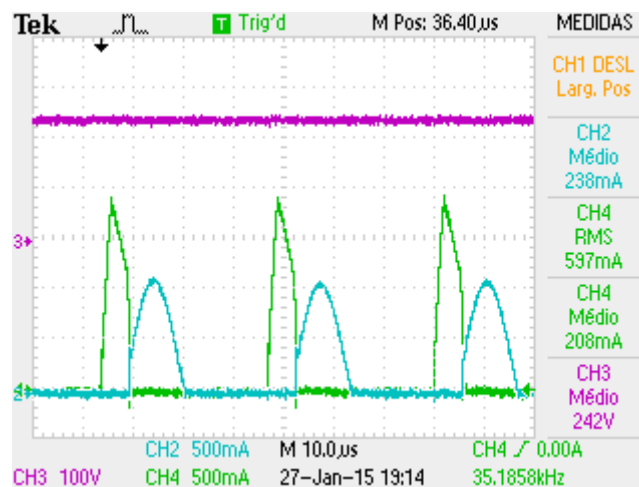


Figura 61 - Corrente em  $D_{M_2}$  (CH2) e  $D_o$  (CH4) e tensão de saída (CH3)

Na figura 62, é possível visualizar as formas de onda de corrente no indutor  $L_1$  e no capacitor  $C_{S_1}$ . Nota-se que o valor médio da corrente em  $L_1$  é o mesmo da corrente de entrada.

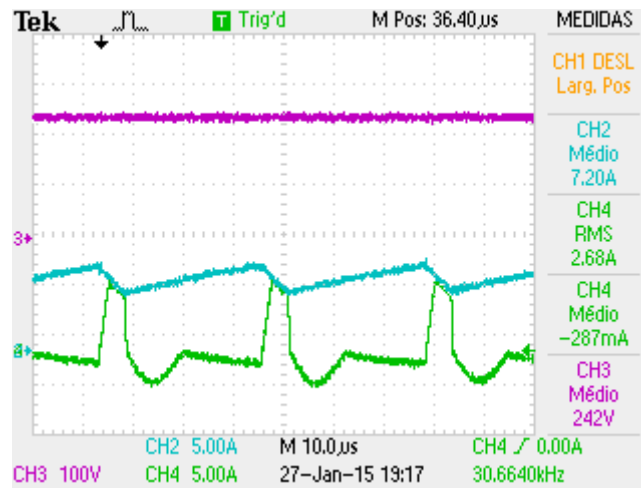


Figura 62 - Corrente em  $L_1$  (CH2) e  $C_{S1}$  (CH4) e tensão de saída (CH3)

Na figura 63 são mostradas as correes em  $L_{2S}$  e  $L_{2P}$ , as quais coincidem com o esperado.

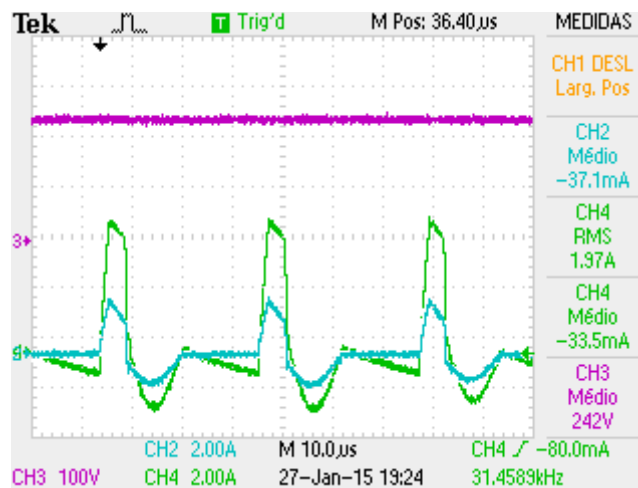


Figura 63 - Corrente em  $L_{2S}$  (CH2) e  $L_{2P}$  (CH4) e tensão de saída (CH3)

As formas de onda dos capacitores  $C_M$ ,  $C_{S1}$  e  $C_{S2}$  são mostradas na figura 64, assim como suas respectivas tensões. Verifica-se que os valores das tensões aproximam-se dos valores teóricos.

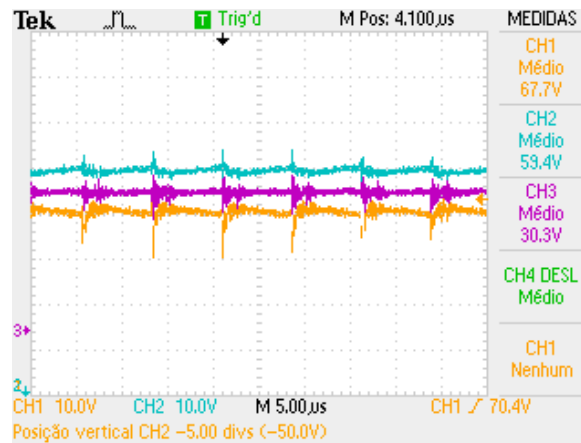


Figura 64 - Tensão em  $C_M$  (CH1),  $C_{S1}$  (CH3) e  $C_{S2}$  (CH2)

As formas de onda acima mostram que o conversor está operando conforme o esperado e apresenta resposta similares obtidas na simulação qualitativa presente neste estudo e as formas de onda teóricas, no entanto, a tensão na chave ainda apresenta uma pequena ondulação.

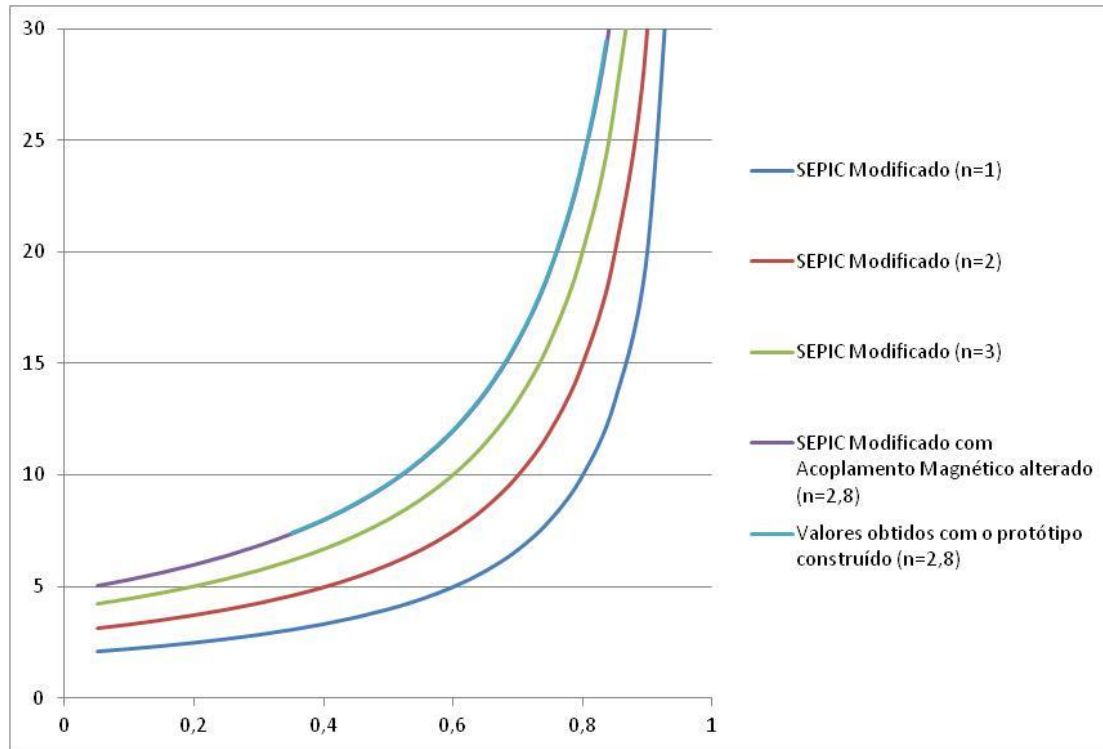
Com o intuito de traçar a curva de ganho estático x razão cíclica do conversor, manteve-se a tensão de saída constante variando a entrada e consequentemente a razão cíclica. Partindo-se da equação (37) os valores obtidos da razão cíclica em cada situação encontram-se na tabela 6.

Tabela 6 - Valores obtidos de tensão entrada e saída e calculados

$V_i$ (V)	$V_o$ (V)	$V_o/V_i$	D
7,4	218	29,5	0,84
7,92	229	28,9	0,83
8,4	232	27,6	0,83
9,13	232	25,4	0,81
9,79	230	23,5	0,80
10,5	228	21,7	0,78
11,7	228	19,5	0,75
12,8	231	18,0	0,73
14	229	16,4	0,71
16,1	230	14,3	0,66
18,4	231	12,6	0,62
20,4	231	11,3	0,58
22,5	231	10,3	0,53
24,7	232	9,4	0,49
26,9	229	8,5	0,44
29	230	7,9	0,39
31,2	231	7,4	0,35



Na figura 65, é possível visualizar a curva de ganho estático x razão cíclica obtida com os valores da tabela 4. Nota-se que a curva do protótipo construído coincide com a curva teórica do mesmo conversor.



**Figura 65 - Curva ganho estático x razão cíclica**

Para verificar o rendimento do conversor, utilizou-se um wattímetro digital Yokogawa WT230. Utilizando-se uma fonte CC, estabeleceu-se a tensão de saída em 12,1 V e variou-se a corrente de entrada. As leituras foram realizadas diretamente na entrada e na saída do conversor. A tensão de leitura na entrada do conversor ficou próxima a 10 V devido à queda ocorrida no cabo de conexão entre a fonte e a entrada do conversor. Os valores obtidos nas leituras são apresentados na tabela 7.

**Tabela 7 - Leituras do rendimento**

	Aquisições no Wattímetro		
Tensão de entrada (V)	10,30	9,85	8,18
Tensão de saída (V)	171,78	240,01	343,50
Ganho estático	16,68	24,37	41,99
Potência fornecida (W)	25,00	42,00	82,00
Rendimento (%)	90,52	87,65	75,55

O circuito construído apresentou um rendimento próximo ao esperado quando operado com um ganho estático mais baixo e consequentemente com uma potência mais baixa. Na leitura com o circuito ajustado para fornecer uma tensão de saída de 240 V, conforme premissa de projeto, o rendimento ficou abaixo dos 90% mesmo com apenas 42 W sendo fornecidos pela fonte conectada na entrada. Como uma última verificação, ajustou-se a razão cíclica do circuito, para que fosse extraída da fonte, uma corrente próxima de 10 A fazendo com que a potência na entrada do conversor fosse próxima a 100 W. Nesta situação o circuito apresentou um rendimento aquém do desejado, no entanto obteve-se um ganho estático próximo de 42. Portanto o circuito não apresentou a curva de rendimento esperado para aplicações envolvendo conversão de energia (superior a 90%),

#### 6.2.2. Testes com malha de controle de corrente

Com o intuito de avaliar a resposta do circuito com controle em malha fechada, a malha aberta utilizada foi substituída por uma malha de corrente. Em um primeiro teste variou-se a tensão de alimentação do circuito, o que acarretou na alteração das potências de entrada e saída, no entanto a corrente permaneceu constante, como pode ser verificado nas figuras 66 e 67.

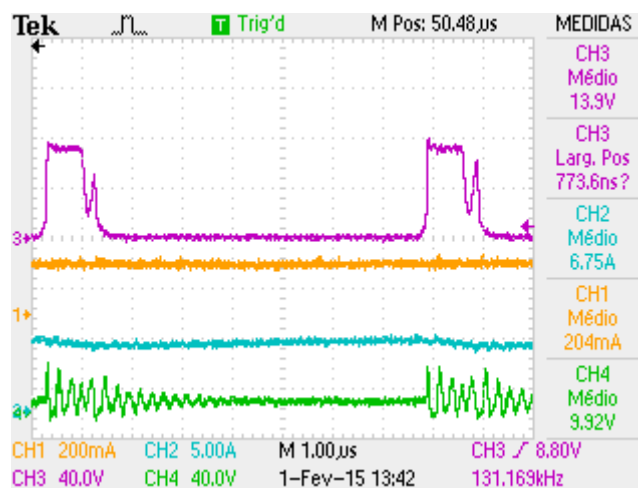
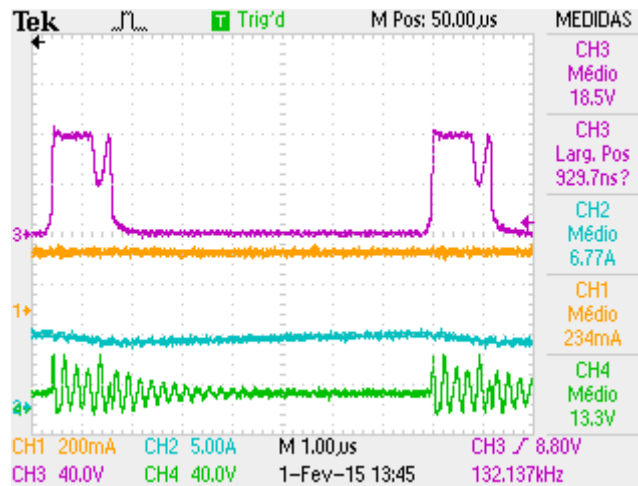
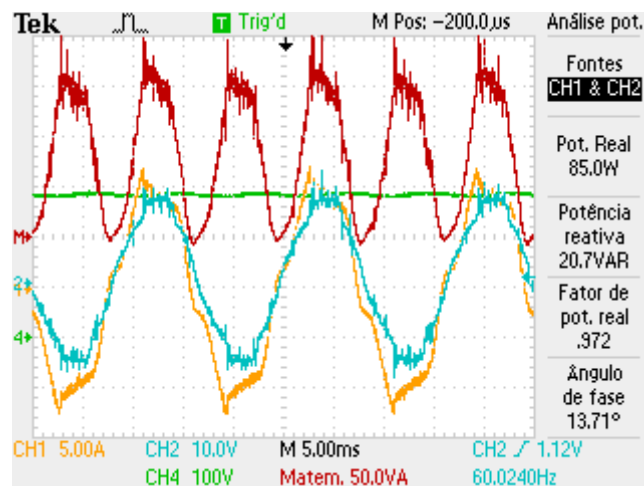


Figura 66 - Tensão (CH4) e corrente (CH2) na entrada, corrente na saída (CH1) e tensão na chave (CH3)



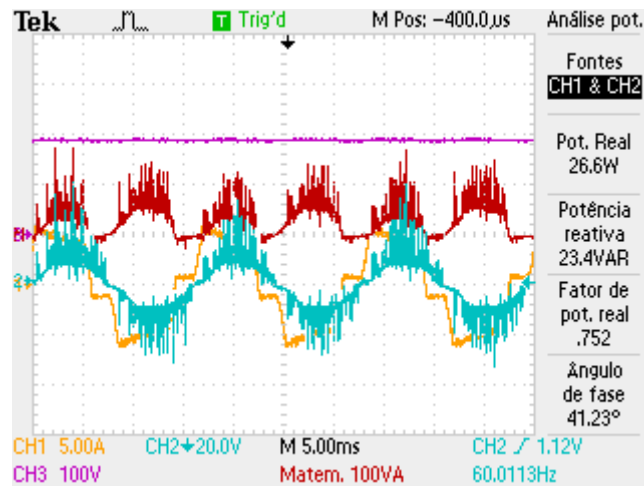
**Figura 67 - Tensão (CH4) e corrente (CH2) na entrada, corrente na saída (CH1) e tensão na chave (CH3)**

Para avaliar o fator de potência do circuito em bancada, a fonte de alimentação CC do circuito foi substituída inicialmente por um regulador de tensão monofásico (variac). Em uma primeira leitura as formas de onda da tensão de entrada e saída apresentavam oscilações excessivas devido a indutância do variac, para minimizar os efeitos desta indutância foram adicionado capacitores a saída da fonte. O resultado encontra-se na figura 68, onde o circuito apresenta  $FP = 0,972$  com uma potência de 85 W.



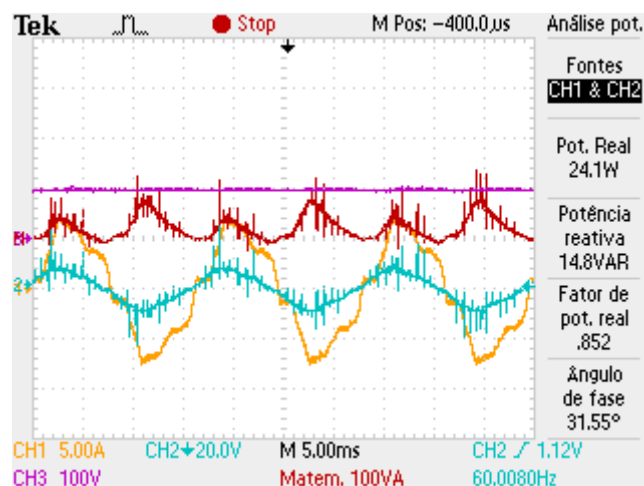
**Figura 68 - Fator de potência com variac monofásico**

Para continuar avaliando a resposta do circuito, o variac monofásico foi substituído por um variac trifásico. Novamente em um primeiro teste, o FP estava baixo mesmo com uma baixa potência fornecida pela fonte trifásica.



**Figura 69 - Fator de potência com variac trifásico (sem capacitor na entrada)**

Novamente para melhorar o FP de potência encontrado, foi adicionado um capacitor entre duas fases do variac e realizada uma nova leitura. O FP foi elevado consideravelmente, no entanto, o valor continuou abaixo do esperado.



**Figura 70 - Fator de potência com variac trifásico (com capacitor na entrada)**

Nos testes realizados com os dois variacs a tensão de entrada teve de ser elevada para níveis superiores ao estabelecido no projeto, devido a limitação da corrente fornecida por estes equipamentos, principalmente para o variac trifásico, que a tensão de entrada foi a níveis superiores a 20 V com uma potência entregue de apenas 27 W.

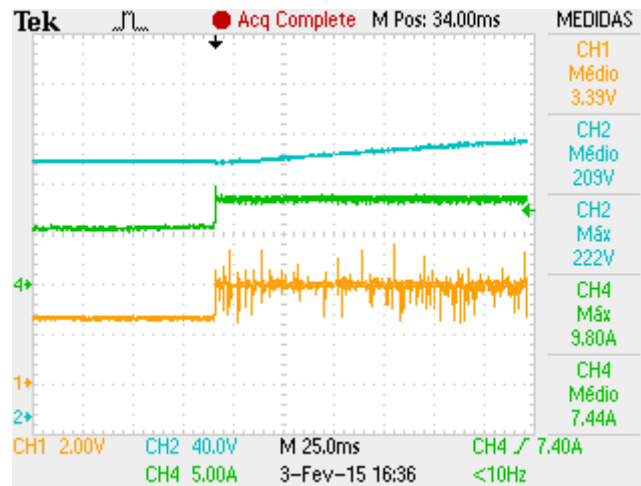


Figura 71 - Resposta transitória

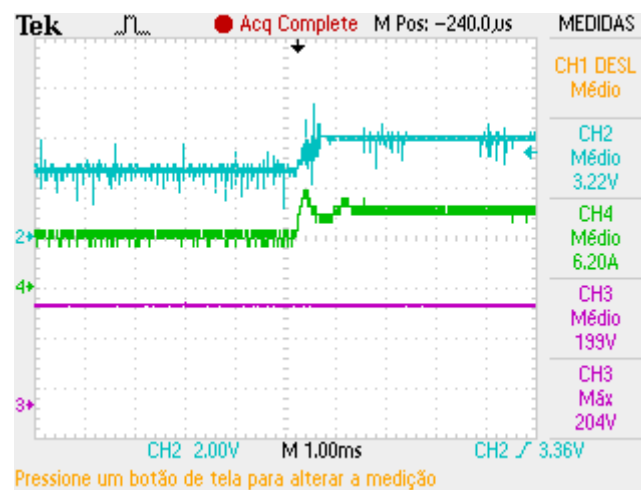


Figura 72 - Resposta transitória com escala de tempo menor

Na figura 71 e 72, observa-se que a resposta transitória do sistema está de acordo com o esperado, estável e com baixo erro em regime permanente. O atraso na elevação da tensão de saída (CH2 – Figura 70) ocorre devido ao capacitor de saída.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A topologia do conversor SEPIC modificado proposta apresentou resultados consistentes, principalmente pelo alto ganho estático que este possibilita mesmo com baixas tensões de entrada e baixas potências, no entanto é necessário melhorar o rendimento do circuito para que este venha a ser viável em aplicações de transformação de energia. A maior parte dos resultados práticos foram obtidos com tensão de 12,1 V fornecida pela fonte de alimentação CC na entrada do conversor, variando-se a potência extraída da fonte e entregue a carga. Na situação em que a tensão de saída estava de acordo com o valor de projeto (240 V) a eficiência do circuito ficou um pouco abaixo do esperado, no entanto, ainda é possível melhorar o rendimento do circuito com componentes com menores resistências em estado ativo.

Ainda assim, para esta situação foi possível observar que a tensão na chave (aproximadamente 60 V) foi apenas uma parcela da tensão de saída. Durante os testes foi possível verificar que a curva da razão cíclica em relação ao ganho estático obtida é praticamente idêntica a curva teórica. A partir das leituras realizadas pelo osciloscópio foi calculado um ganho estático superior a 30, se for considerada a leitura realizada pelo Wattímetro, o circuito atingiu um ganho estático próximo a 42, mas teve um rendimento considerado baixo para este tipo de aplicação.

A indutância de dispersão presente no transformador reduz as perdas de comutação, assim como é possível elevar o ganho da topologia alterando apenas a relação de espiras do transformador.

Além disso, o circuito apresentou o comportamento esperado quando foi testado com a malha de controle de corrente. Apresentando um FP superior a 0,95 quando alimentado com uma fonte CA monofásica e um FP próximo a 0,85 com a fonte trifásica. O FP obtido, principalmente com fonte trifásica, foi prejudicado devido a alta indutância das fontes utilizadas.

Devido aos problemas que surgiram no decorrer do desenvolvimento do projeto, não foi possível avaliar o comportamento do circuito construído quando aplicado a um gerador, assim como não foi possível desenvolver e testar o comportamento da malha de controle MPPT. Mesmo assim, os resultados obtidos

foram consistentes e próximos ao projetado, o circuito apresentou um elevado ganho estático mesmo com baixas tensões e potências na entrada, deixando a desejar apenas na sua curva de rendimento que deveria ser superior a 90% em uma ampla faixa de potência aplicada.

## REFERÊNCIAS

ADEGAS, Fabiano D. In: **Análise, Simulação e Implementação de um Conversor de Baixa Potência com MPPT e PFC para Aerogeradores em Sistemas Isolados**. 2006. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

ARAUJO, S. V. In: **Step-Up Converter with High Voltage Gain Employ Three-State Switching Cell and Voltage Multiplier**. In: IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008, Rhodes. p. 2271-2277.

ABEEólica - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Disponível em <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/artigos/118-a-perspectiva-de-futuro-da-energia-e%C3%B3lica.html>>. Acesso 8 jan. 2014.

ABEEólica - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Disponível em <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/artigos/115-a-trajet%C3%B3ria-da-fonte-e%C3%B3lica-de-energia-e-a-sua-competitividade.html>>. Acesso em 8 jan. 2014.

ABEEólica - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Mensal de Dados do Setor Eólico – Público**. Disponível em: <[http://www.portalabeeolica.org.br/images/pdf/Boletim\\_Dados-ABEEolica-Janeiro-2014-Publico.pdf](http://www.portalabeeolica.org.br/images/pdf/Boletim_Dados-ABEEolica-Janeiro-2014-Publico.pdf)>. Acesso em 10 mai. 2014.

AZEVEDO, Thiago P. S. de. In: **Bancada Experimental para Ensaio em Geradores Elétricos Utilizados em Aerogeradores de Pequeno Porte**. 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém. 2012.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 6. ed. Florianópolis: Do Autor, 2006

\_\_\_\_\_, **Projeto de fontes chaveadas**. 1. ed. Florianópolis: Do Autor, 2006

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar C. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 2. ed. Florianópolis: Do Autor, 2006

BOLOURIAN, Arman. In: **Evaluations of Energy Efficiency Improvement**. 2010. 71 f. Thesis – Chalmers University of Technology, Goteborg. 2010.

CUSTÓDIO, Ronaldo D. S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**; Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DREHER, Jacson R. In: **Conversores Boost-Flyback Integrados para Aplicações com Alto Ganho de Tensão**. 2012. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Pato Branco. 2012.

ENERCOM, Materiais Elétricos. Disponível em <<http://www.enercom.com.br/Content/48-energia-eolica>>. Acesso 22 dez. 2013.



GULES, Roger et al. **A Modified Sepic Converter with High Static Gain for Renewable Applications**. IEEE Transactions on Power Electronics, volume 29, p. 5860-5871, Nov. 2014.

GWEC, *Global Wind Energy Council*, **Global Wind Report – Annual Market Update 2013**. Disponível em <[http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report\\_9-April-2014.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report_9-April-2014.pdf)>.

IEA, *International Energy Agency*. Disponível em <<http://www.iea.org/topics/windpower/>>. Acesso em 20 mai. 2014.

LISERRE, Marco; SAUTER, Thilo; HUNG, John Y. **Future Energy Systems, Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics**. IEEE Industrial Electronics Magazine, mar. 2010.

LÓPEZ, Julio I. S. In: **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia usando Técnica MPPT e Controle Digital**. 2009. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2009.

MACHADO, Isaac R. et al. **Sistema Eólico de Pequeno Porte para Carregamento de Baterias**. Eletrônica de Potência, Ceará, v. 12, n. 2, p. 97-104, 2007.

MARTINZ, Fernando O. In: **Estudo de Estratégias de Rastreamento da Corrente e da Tensão de Saída CA de um Conversor do tipo Fonte de Tensão**. 2007. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa>>. Acesso em 5 jan. 2014.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica>>. Acesso em: 10 mai. 2014.

MIRANDA, Rubens D. In: **Modelamento da Malha de Controle da Corrente em Conversores de Potência Modulados por Largura de Pulso**. 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.

OLIVEIRA, Eduardo F. de. **Conversor Estático de Baixo Custo e Alto Rendimento para Sistemas Eólicos de Pequeno Porte**. In: PRÊMIO JOVEM CIENTISTA. Ceará, 2010.

PINTO, Adeon C.; NETO, Pedro J. S. **Uma Revisão do Estado da Arte sobre a Aplicação de Aerogeradores de Pequeno Porte no Contexto das Redes Inteligentes**. In: Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol.14, n°1, Jan/Jun, 2012.

PRAÇA, Paulo P. In: **Conversores de Alto Ganho de Tensão e Estágio Único Aplicados à Sistemas de Energias Renováveis com Baterias**. ago. 2011. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Ceará. 2011.

ROCHA, Werveson J. **Nova Configuração de Conversor SEPIC Modificado com Acoplamento Magnético**. Paraná, 2013, 6 p. Trabalho Acadêmico do CPGEI – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ROSA, Victor H. S. In: **Energia Elétrica Renovável em Pequenas Comunidades no Brasil: Em Busca de Um Modelo Sustentável**. Abr. 2007. 440 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável, área de concentração em Política e Gestão Ambiental) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília. 2007.

SAMPAIO, Leonardo P. In: **Controle da injeção de potências ativa e reativa em inversor de Geração Distribuída conectado à rede de distribuição em corrente alternada em baixa tensão, empregando LMIs com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade**. 2013. 210 f. Tese (Doutorado, área de conhecimento: Automação) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2013.

TIBOLA, Gabriel. In: **Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência**. 2009. 285 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

TONKOSKI, Reinaldo et al. **Mitigação do Conteúdo Harmônico em Aero geradores usando um PFP Elevador de Chave Única**. Eletrônica de Potência, vol. 12, p. 269-276. Nov. 2007.

VIEIRA, Daniel. In: **Policies to Encourage the Sustainable Development of Brazilian Electricity System with Distributed Generation**. Ago. 2011. 69 f. Dissertação - Universidade de Cambridge, Cambridge. 2011.

\_\_\_\_\_, **Modelo Econômico de Programação Diária da Geração Considerando os Custos de Parada e Partida e Operação como Compensador Síncrono**. 2007. Dissertação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2007.