

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROBERTO GERALDO SAMISTRARO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:
PROJETO DE UM INVERSOR DE CORRENTE PUSH-PULL MONOFÁSICO,
ISOLADO EM BAIXA FREQUÊNCIA, PARA APLICAÇÃO EM UM SISTEMA DE
PROCESSAMENTO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

JOINVILLE/SC

2012

ROBERTO GERALDO SAMISTRARO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

PROJETO DE UM INVERSOR DE CORRENTE PUSH-PULL MONOFÁSICO,
ISOLADO EM BAIXA FREQUÊNCIA, PARA APLICAÇÃO EM UM SISTEMA DE
PROCESSAMENTO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica do Centro
de Ciências Tecnológicas, da
Universidade do Estado de Santa
Catarina, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer,
Dr. Eng.

Coorientador: Marcello Mezaroba, Dr. Eng.

JOINVILLE/SC

2012

ROBERTO GERALDO SAMISTRARO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

**PROJETO DE UM INVERSOR DE CORRENTE PUSH-PULL MONOFÁSICO,
ISOLADO EM BAIXA FREQUÊNCIA, PARA APLICAÇÃO EM UM SISTEMA DE
PROCESSAMENTO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica na área de concentração Eletrônica de Potência.

Banca Examinadora

Orientador: _____
Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Coorientador: _____
Prof. Dr. Marcello Mezaroba
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro: _____
Prof. Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro: _____
Jonathan Domini Sperb, Me. Eng.
Supplier Indústria e Comércio de Eletro Eletrônicos Ltda

JOINVILLE – SC, 04/12/2012

Aos meus pais, Geraldo e Zélia;
Aos meus irmãos e à minha amada, Nayme.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado saúde e perseverança durante os meus passos nessa longa caminhada.

Aos meus queridos pais, Geraldo e Zélia, que me deram a tranquilidade necessária para que eu pudesse me dedicar exclusivamente aos meus estudos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer pela orientação, dedicação e ensinamentos ao longo do trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcello Mezaroba pela co-orientação.

Ao Prof. Dr. Yales Rômulo de Novaes pelas valiosas e importantes contribuições à minha formação acadêmica.

Aos membros da banca pela disponibilidade.

Aos colegas de graduação, pela amizade e convívio durante esta etapa importante de minha vida.

À minha namorada Nayme, pelo carinho, apoio, ajuda e compreensão prestados em todos os momentos ao longo do curso.

Em fim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para que eu obtivesse êxito no final desta etapa.

RESUMO

SAMISTRARO, Roberto Geraldo. **Projeto de Um Inversor de Corrente Push-Pull Monofásico, Isolado em Baixa Frequência, para Aplicação em Um Sistema de Processamento de Energia Fotovoltaica.** 2012. TCC (Bacharelado em Engenharia Elétrica – Área: Processamento de Energia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012.

As últimas décadas têm sido caracterizadas por um importante desenvolvimento e amadurecimento de tecnologias para a utilização de fontes renováveis de energia. Sistemas fotovoltaicos, eólicos e de biomassa tem aumentado sua eficiência, tornando-se cada vez mais economicamente viáveis. Dentro deste âmbito, este projeto busca trazer benefícios para a área de processamento de energia, consistindo no estudo de um inversor de corrente Push-Pull para converter a energia gerada por painéis fotovoltaicos em corrente alternada, possibilitando a conexão com a rede elétrica. A energia fotogerada pelos PVs passará por um conversor cc-cc com MPPT antes da conexão com o inversor. Na parte inicial do trabalho é realizado um estudo sobre a energia solar fotovoltaica no Brasil, bem como sobre o funcionamento das células fotovoltaicas e os principais fatores que influenciam em seu funcionamento. No projeto são estudadas algumas topologias de conversores cc-ca, justificando a escolha do push-pull para a aplicação e calculados todos os valores dos componentes que serão utilizados neste conversor. Antes de efetuar a implementação prática são realizadas inúmeras simulações com modelos completos dos semicondutores fornecidos pelos fabricantes, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos e, por fim, implementado e testado um protótipo do conversor com o objetivo de verificar seu funcionamento e validar o projeto desenvolvido. Este é o primeiro protótipo que será desenvolvido sendo que o conversor, em sua versão final, injetará energia na rede com baixa taxa de distorção harmônica.

Palavras-chave: Inversor Push-Pull. Energia renovável. Painéis Fotovoltaicos (PV). Rede Elétrica.

ABSTRACT

SAMISTRARO, Roberto Geraldo. **Project of a Single Phase Push-Pull Current Inverter, Isolated in Low Frequency, for Application in a Photovoltaic Processing Power System.** 2012. TCC (Bacharelado em Engenharia Elétrica – Área: Processamento de Energia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012.

The last decades have been characterized by an important development and maturation of technologies for using renewable energy sources. Photovoltaic systems, wind and biomass has increased efficiency, making it more economically viable. Within this context, this project seeks to bring benefits to the area of processing power, consisting of a Push-Pull current inverter to convert the energy generated by photovoltaic panels into alternating current, allowing the connection to the grid. The energy photogenerated by PVs passed through a dc-dc converter with MPPT before connecting to the inverter. In the early part of the work is a study about the photovoltaic solar energy in Brazil, as well as about the functioning of photovoltaic cells and the main factors that influence their operation. In the project some converter topologies dc-ac are studied, justifying the choice of push-pull for the application and calculated all the values of the components that will be used in this converter. Before making the practical implementation several simulations are conducted with complete models provided by manufacturers of semiconductors, increasing the reliability of the results obtained and, finally, implemented and tested a prototype of the converter in order to verify its operation and validate the project developed. This is the first prototype that is being developed and the converter, in its final version, will inject power into the grid with low rate harmonic distortion.

Key-words: Inverter Push-Pull. Renewable energy. Photovoltaic panels (PV). Grid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de ligação de um Banco de Painéis Fotovoltaicos na Rede Elétrica	13
Figura 2 - Esquema de Ligação Trifásico em Estrela e Triângulo	14
Figura 3 - Forma de Onda da Corrente na Fase A.....	15
Figura 4- Radiação Solar no Território Brasileiro	18
Figura 5- Curva de Preços de Módulos Fotovoltaicos.....	19
Figura 6- Painéis SW130 Poly R6A.....	24
Figura 7- Curva Tensão versus Corrente de um PV	25
Figura 8 - Influência da Radiação no Funcionamento do PV SW130 poly R6A	26
Figura 9 - Influência da Temperatura no Funcionamento do PV SW130 poly R6A...	27
Figura 10- Circuito Ponte Completa	28
Figura 11- Circuito em Meia-Ponte.....	29
Figura 12- Circuito Push-Pull.....	30
Figura 13– Circuito Push-Pull Conectado na Rede	30
Figura 14 – Etapas de Operação	31
Figura 15 - Formas de Onda das Etapas de Operação.....	32
Figura 16- Circuito de Comando Proposto	33
Figura 17- Formas de Onda do Circuito de Comando Autônomo	34
Figura 18- Tensão Enrolamentos Auxiliares X Perdas.....	36
Figura 19- Fluxos Mútuo e Disperso de um Transformador	40
Figura 20- Circuito Equivalente T de um Transformador Monofásico	42
Figura 21- Diagrama Elétrico do Transformador	43
Figura 22- Transformador Adquirido	47
Figura 23- Dissipador dos <i>Mosfet's</i>	52
Figura 24 - Gráfico de Pizza das Perdas no Conversor	55
Figura 25- Circuito Completo Implementado.....	56
Figura 26- Layout da Placa do Conversor - à direita, Parte Inferior; à esquerda, Parte Superior.....	57
Figura 27- Imagem do Protótipo Implementado	57
Figura 28 - Tensão e Corrente na Entrada do Conversor – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental	58

Figura 29 - Tensão nos Gatilhos dos Interruptores – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental	58
Figura 30 - Tensão e Corrente nos Interruptores – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental	58
Figura 31 - Tensão e Corrente nos Interruptores (Detalhe da Entrada em Condução) – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental	59
Figura 32 - Tensão e Corrente nos Interruptores (Detalhe do Bloqueio) – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental	59
Figura 33 - Tensão e Corrente na Rede (Secundário do Trafo) – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental	59
Figura 34 - Tensão no interruptor e no Capacitor do Snubber – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental	60
Figura 35 - Circuitos Utilizados nos Testes de Rendimento do Trafo.....	62
Figura 36 - Circuito Equivalente com o Secundário em Curto-Circuito.(a) Modelo T. (b) Modelo L	68
Figura 37 - Circuito Equivalente para Ensaio de Circuito Aberto. (a) Modelo T. (b) Modelo L.....	71
Figura 38 - Circuito Equivalente para Ensaio com Carga Nominal.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Usinas Solares Conectadas na Rede em 2010.....	20
Tabela 2 - Parâmetros Nominais do Módulo SW130 poly R6A.....	24
Tabela 3- Características Diodos Zener	35
Tabela 4 - Especificações para o Cálculo dos Esforços.....	37
Tabela 5- Especificações <i>Mosfet</i> IRFZ48N	38
Tabela 6- Especificações do Transformador	44
Tabela 7- Resumo das Lâminas Escolhidas	46
Tabela 8- Aspectos Construtivos do Transformador	47
Tabela 9- Parâmetros do Transformador	48
Tabela 10- Parâmetros do Circuito <i>Snubber</i>	49
Tabela 11- Resultados Experimentais Obtidos	61
Tabela 12 – Resultados Obtidos Experimentalmente para o Rendimento do Trafo.	61

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
cc-ca	Corrente Contínua – Corrente Alternada
ca-cc	Corrente Alternada – Corrente Contínua
cc-cc	Corrente Contínua – Corrente Contínua
MPP	Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point</i>)
PV	Painel Fotovoltaico
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
FMM	Força Magneto Motriz
VE	Veículo Elétrico
USP	Universidade de São Paulo
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
Mosfet	<i>Metal-oxide-semiconductor fiel-effec-transistor</i>
RSE	Resistência Série Equivalente
nPEE	Núcleo de Processamento de Energia Elétrica
EMI	Interferência Eletromagnética
MWp	MegaWatt-Pico
kWp	KiloWatt-Pico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	CONTEXTO	12
1.2.	OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	13
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2.	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL	17
2.1.	POTENCIAL ENERGÉTICO BRASILEIRO	17
2.2.	APROVEITAMENTO DA ENERGIA NO PAÍS.....	20
3.	GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	23
3.1.	INTRODUÇÃO À ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	23
3.2.	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	23
3.3.	FATORES QUE INFLUENCIAM NO FUNCIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	25
3.3.1.	<i>Efeito da Variação da Radiação</i>	<i>26</i>
3.3.2.	<i>Efeito da Variação da Temperatura</i>	<i>27</i>
4.	ESTUDO DOS CONVERSORES CC-CA PROPOSTOS.....	28
4.1.	CONVERSOR CC-CA EM PONTE COMPLETA	28
4.2.	CONVERSOR CC-CA EM MEIA-PONTE.....	29
4.3.	CONVERSOR CC-CA PUSH-PULL.....	29
4.3.1.	<i>Princípio de Funcionamento.....</i>	<i>31</i>
5.	PROJETO FÍSICO DO CONVERSOR.....	33
5.1.	DEFINIÇÃO DO CIRCUITO DE COMANDO	33
5.2.	ESFORÇOS NOS COMPONENTES E ESCOLHA DO INTERRUPTOR	36
5.2.1.	<i>Esforços no Interruptor</i>	<i>37</i>
5.2.2.	<i>Esforços nos Enrolamentos Primários do Transformador</i>	<i>38</i>
5.2.3.	<i>Esforços no Enrolamento Secundário do Transformador.....</i>	<i>38</i>
5.3.	ESTUDO E PROJETO DO TRANSFORMADOR.....	39
5.3.1.	<i>Estudo do Transformador</i>	<i>39</i>
5.3.1.1.	<i>Modelagem Matemática e Circuito Equivalente.....</i>	<i>40</i>
5.3.2.	<i>Projeto do Transformador.....</i>	<i>43</i>
5.3.2.1.	<i>Cálculo da Seção e Escolha da Bitola dos Condutores</i>	<i>44</i>
5.3.2.2.	<i>Escolha das Lâminas do Núcleo</i>	<i>45</i>
5.3.2.3.	<i>Cálculo do Número de Espiras.....</i>	<i>46</i>
5.3.3.	<i>Parâmetros do Transformador.....</i>	<i>47</i>
5.4.	PROJETO DO CIRCUITOSNUBBER	48
5.5.	PERDAS NOS COMPONENTES.....	50
5.5.1.	<i>Perdas nos Interruptores.....</i>	<i>50</i>
5.5.2.	<i>Perdas no Transformador</i>	<i>52</i>
5.5.3.	<i>Perdas nos Circuitos Ssubbers.....</i>	<i>53</i>
5.5.4.	<i>Perdas nos Circuitos de Comando.....</i>	<i>53</i>
6.	ANÁLISE EXPERIMENTAL E POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	55
6.1.	RENDIMENTO DO CONVERSOR	60
7.	CONCLUSÕES	63
7.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS.....	65
	APÊNDICE A.....	68

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

A expansão econômica e social verificada nas últimas décadas vem exigindo importante desenvolvimento da nossa infraestrutura no setor de energia. Apesar da necessidade de se encontrar um substituto para o petróleo, esse composto continua sendo o mais consumido entre as fontes de energia existentes.

Do ponto de vista ambiental, o impacto da construção de uma usina geradora, seja ela hidrelétrica, termoeletrica, nuclear, dentre outras, é muito grande. No Brasil, onde a maior parte da energia elétrica provém de usinas hidrelétricas, são grandes as desvantagens do uso desse tipo de energia, tais como a perda de uma grande área de terra que poderia ser produtiva, alterações na fauna, flora e mesmo no clima da região afetada (STIVARI, OLIVEIRA, *et al.*, 2003). Socialmente, para a instalação dessas usinas, é necessário a desapropriação de terras e o deslocamento da população desses locais.

A participação de energias renováveis como a eólica e a solar, mesmo que ainda pouco expressivas quando comparadas com a energia gerada através do petróleo e usinas hidrelétricas, já produz impactos ambientais positivos. A utilização de painéis fotovoltaicos traz muitas vantagens. Dentre elas pode-se citar a capacidade de instalação em qualquer lugar que tenha incidência solar e o baixo custo de manutenção.

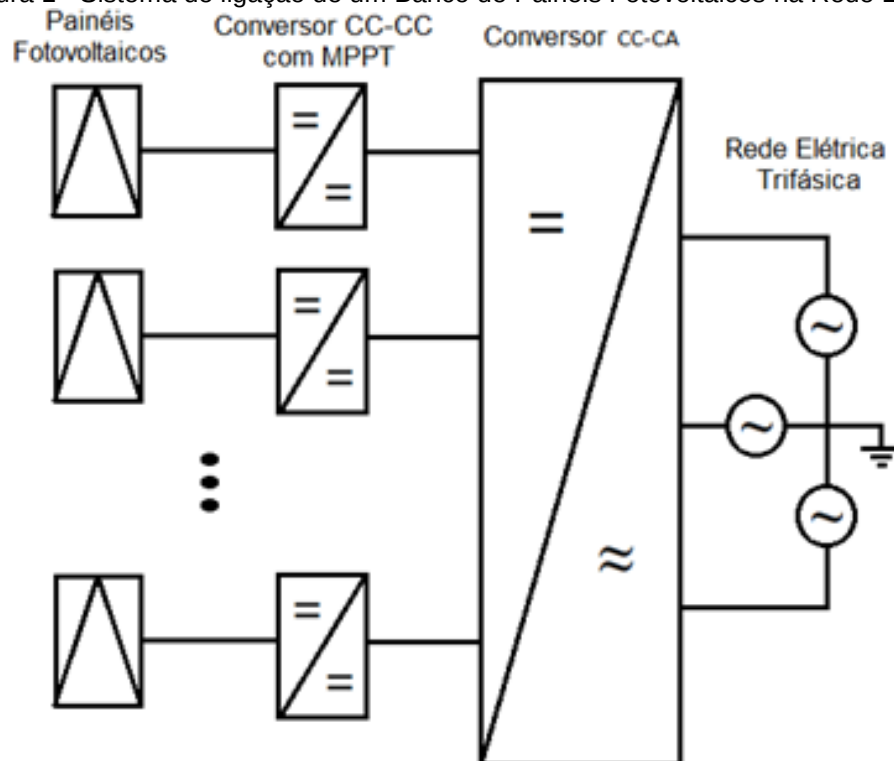
Vários são os desafios a serem superados para melhorar a tecnologia disponível e o país já demonstra avanços. Recentemente a ANEEL aprovou regras destinadas a reduzir barreiras para instalação de geração distribuída de pequeno porte, que incluem a micro geração, com até 100 kW de potência, e a mini geração, de 100 kW à 1 MW (ANEEL, 2012). A norma N° 482, de 17 de Abril de 2012 cria o Sistema de Compensação de Energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local, sendo que o excedente produzido é injetado à rede, gerando créditos, os quais serão abatidos no consumo dos meses seguintes. A regra é válida para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia (hídrica, solar, biomassa, eólica e co-

geração qualificada). Esse tipo de geração traz muitas vantagens sobre a geração centralizada convencional, como, por exemplo, redução dos gastos com transmissão e redução das perdas na rede, pois o consumo se dá no local da geração (ANEEL, 2012).

1.2. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

Na Figura 1 é apresentado um esquema de ligação de um banco de painéis fotovoltaicos na rede elétrica que será adotado neste trabalho, no qual se pode ver a necessidade de um conversor cc-ca antes da conexão com a rede.

Figura 1 - Sistema de ligação de um Banco de Painéis Fotovoltaicos na Rede Elétrica

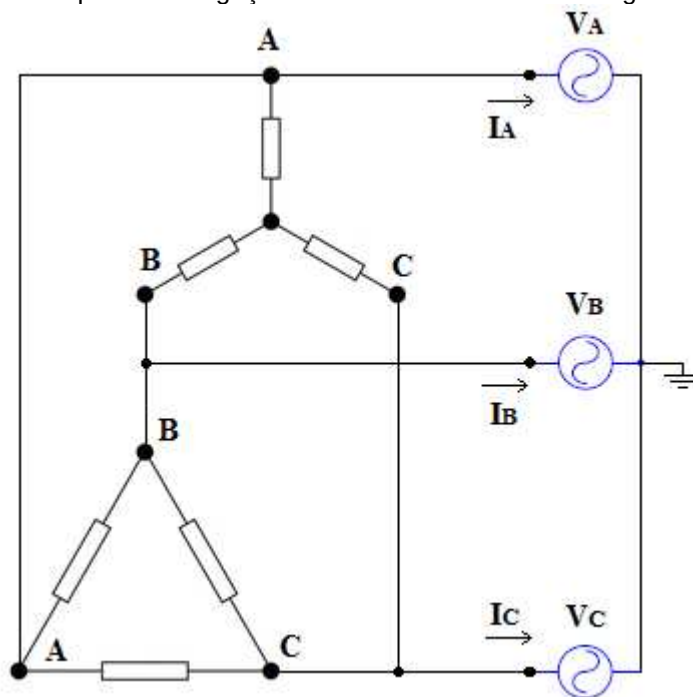


Fonte: Produção do próprio autor

O sistema processará a energia proveniente de três painéis fotovoltaicos, os quais serão conectados em paralelo na entrada do conversor cc-cc, que será chaveado em alta frequência. Este fato pode garantir uma maior robustez ao sistema, pois pretende-se substituir o filtro LC da saída do conversor pela própria indutância de dispersão do conversor cc-ca, garantindo assim entrada em corrente

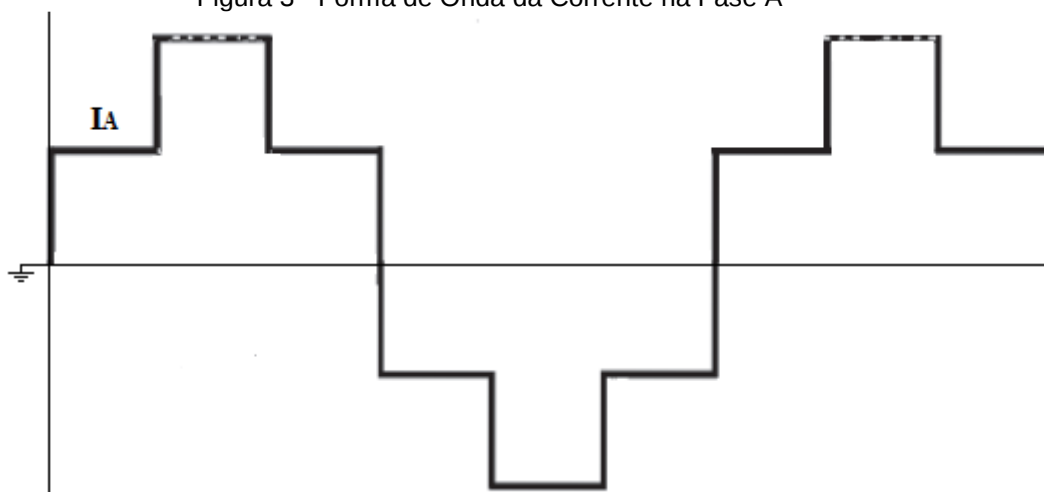
no inversor. Para isto será levantado um estudo verificando se a dispersão será alta o suficiente para garantir condução contínua na saída do conversor cc-cc. Este primeiro protótipo injetará energia apenas em uma fase da rede. A versão final do sistema será trifásica e processará a energia proveniente de 18 PVs, sendo que a conexão com a rede será em estrela e triângulo, injetando energia com conceito semelhante ao empregado nos retificadores multipulsos presentes em (BARBI, 2006), o que diminui taxa de distorção harmônica e, conseqüentemente, melhora a qualidade da energia entregue. A Figura 2 ilustra o esquema de ligação trifásico estrela e triângulo, e na Figura 3 tem-se a forma de onda da corrente em uma das fases da rede com o esquema de ligação proposto.

Figura 2 - Esquema de Ligação Trifásico em Estrela e Triângulo



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 3 - Forma de Onda da Corrente na Fase A



Fonte: Produção do próprio autor

A partir do contexto acima, a proposta deste trabalho é a elaboração de um conversor cc-ca simples, robusto e de baixo custo, responsável pela adequação da tensão gerada pelos painéis fotovoltaicos com a rede elétrica, pois a geração a partir de células fotovoltaicas se dá em corrente contínua.

Os estudos sobre geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos se justificam devido aos elevados padrões de insolação no território brasileiro em comparação aos níveis internacionais, indicando perspectivas positivas para o desenvolvimento da energia fotovoltaica (CASTRO, PAES e DANTAS, 2012). Outro fator que justifica o projeto é o aumento da demanda de energia elétrica na zona rural, sendo que em inúmeras vezes essa carga está no fim de cada ramal alimentador o que acarreta em perdas de distribuição, quedas de tensão e instabilidade no sistema (PRATI, 2010). Também é um fator justificador a possibilidade de economia com energia elétrica ou uma renda extra para o caso de comercialização com uma concessionária de energia elétrica, além de ser a energia que mais cresce no mundo (EMPRESA BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR, 2012).

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Na sequência do trabalho, inicia-se o segundo capítulo com um estudo da energia solar fotovoltaica no Brasil, analisando o potencial energético brasileiro em comparação com outros países, bem como comparações com outras fontes de

energia, como a hidrelétrica e a proveniente da cana de açúcar, utilizada para locomoção dos automóveis à combustão. É feita também uma análise do aproveitamento atual da energia no país, com destaque para as usinas solares conectadas à rede. Finalizando o capítulo, é feito um estudo dos principais projetos em desenvolvimento, citando os projetos dos estádios solares e aeroportos com usinas solares conectadas à rede.

No capítulo 3 faz-se um estudo superficial sobre o efeito fotovoltaico, analisando o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas, as características técnicas dos painéis utilizados, fatores que influenciam em seu funcionamento, bem como curvas de tensão, corrente e potência do equipamento utilizado.

No capítulo seguinte são apresentadas outras topologias de conversores cc-ca e suas principais características, explicando o princípio de funcionamento do conversor, detalhando suas etapas de operação e formas de onda.

O projeto físico do conversor pode ser visto no capítulo 5, no qual é apresentado o circuito de comando proposto, os esforços e escolha dos componentes, estudo e projeto do transformador, definição do circuito de auxílio à comutação (*snubber*), as perdas nos componentes, o cálculo térmico para dimensionamento do dissipador dos interruptores e, finalizando o capítulo, é mostrado o layout do protótipo implementado em laboratório.

Os dois últimos capítulos tratam da análise final do conversor com resultados obtidos via simulação e experimentais. No último capítulo são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros de como melhorar a eficiência do conversor e a qualidade da energia injetada na rede.

Para finalizar o estudo, o Apêndice A traz a metodologia utilizada para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente do transformador.

2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

2.1. POTENCIAL ENERGÉTICO BRASILEIRO

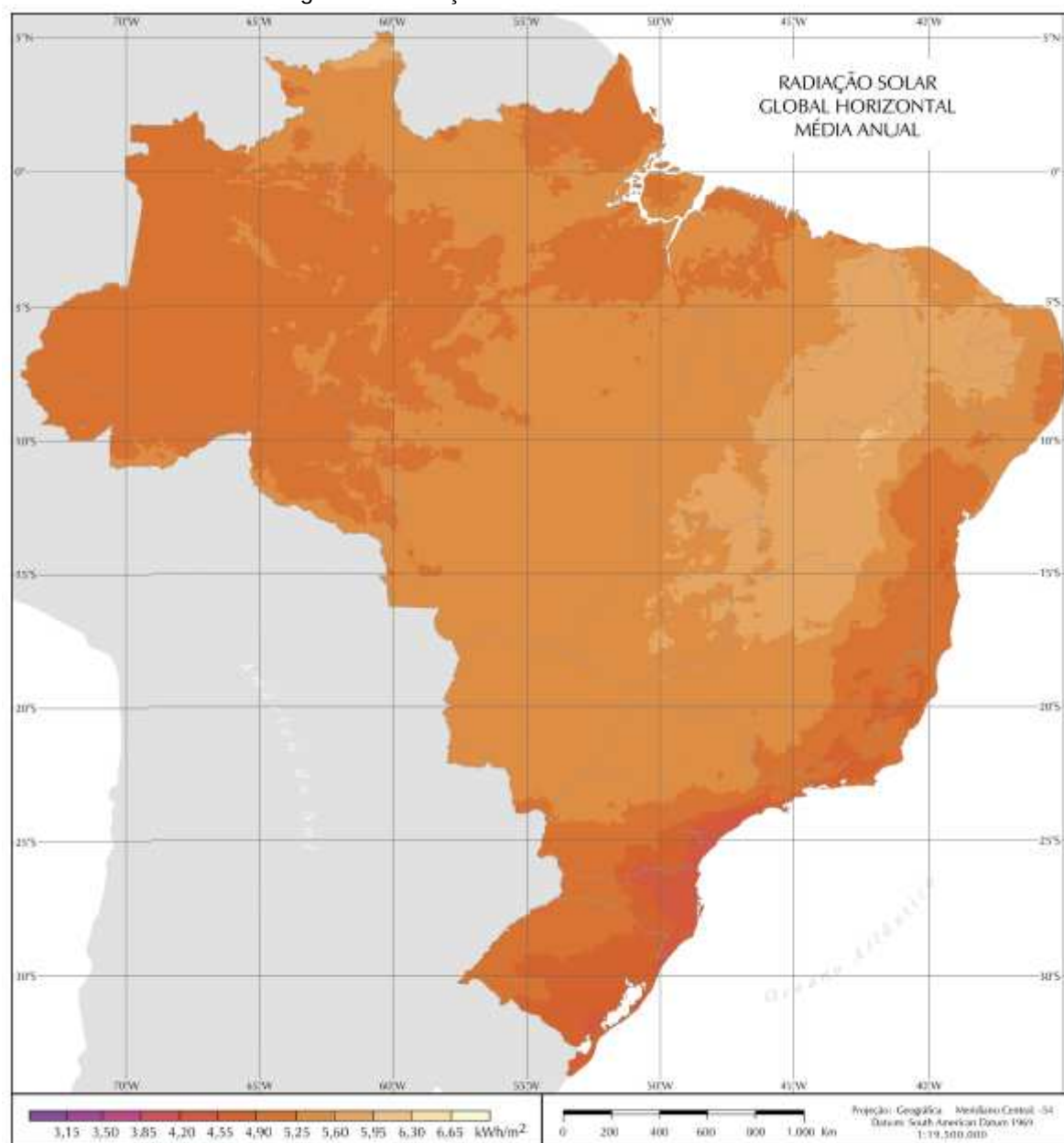
A maior parte do Brasil está situada entre a Linha do Equador e o Trópico de Capricórnio, o que determina uma área com grande potencial para o aproveitamento de energia solar durante todo o ano.

O mapa apresentado na Figura 4 mostra a média anual do total diário de radiação solar no território brasileiro, através do qual nota-se que a região Norte recebe menor incidência de radiação do que a região Central do Brasil, apesar de sua localização próxima a linha do Equador. Isso se deve às características climáticas da região amazônica que apresenta fração de cobertura de nuvens e precipitações elevadas, principalmente durante o verão.

Em (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006) é feito um estudo sobre a variabilidade da radiação solar nas diferentes regiões do Brasil, através do qual conclui-se que a região Sul apresenta a maior variabilidade entre as estações do ano, isto é, o fluxo de radiação solar média no verão é cerca de 65% maior que o fluxo no Inverno. A região Norte é a que apresenta a menor variabilidade entre as estações do ano.

Fazendo uma análise entre o potencial solar no Brasil e na Alemanha, que é o país que mais investe em energia solar fotovoltaica no mundo, percebe-se uma maior disponibilidade desta energia em territórios brasileiros. Segundo Ricardo Ruther em entrevista concedida à rádio CBN, a Alemanha tem em sua região mais ensolarada 40% menos luminosidade à região menos ensolarada do Brasil, que é o Litoral de Santa Catarina (RUTHER, 2011). Isto ressalta a importância de se obter um sistema eficiente de processamento da energia fotovoltaica na região. Na entrevista Ruther destacou os investimentos dos alemães em energia fotovoltaica, citando a instalação, somente no ano de 2009, de mais de 3.000 MW no telhado das residências no país. Tal valor equivale quase à quarta parte do total gerado em Itaipu Binacional, que tem 14.000 MW de potência instalada (ITAIPU BINACIONAL, 2012).

Figura 4- Radiação Solar no Território Brasileiro



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006)

Fazendo uma análise comparativa entre a geração de energia elétrica proveniente da Usina hidrelétrica de Itaipu Binacional e da geração a partir de painéis fotovoltaicos, estima-se que cobrindo o lago de Itaipu, de 1.350 km² de extensão, com gerador solar fotovoltaico é possível gerar 108 GWp, cerca de 8 vezes o total gerado pela Usina e o equivalente a mais de 50% de toda a energia elétrica consumida no Brasil (RUTHER, 2010).

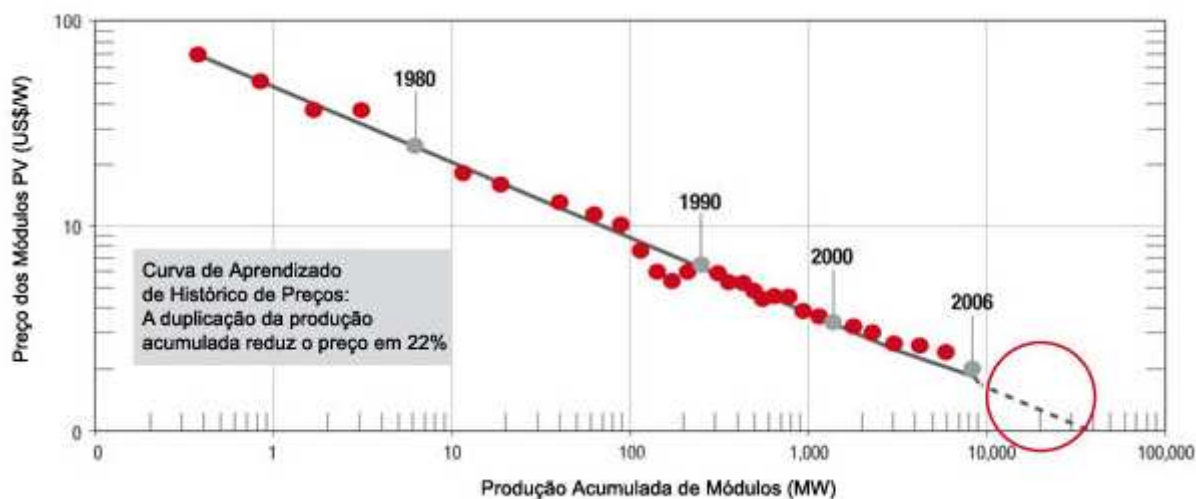
Comparando agora um automóvel *Flexfuel* movido a Álcool com um VE movido à energia solar fotovoltaica, estima-se que um hectare de cana de açúcar faz com que o veículo se locomova por aproximadamente 43.000 km. Cobrindo este

mesmo hectare com painéis fotovoltaicos e considerando eficiência do sistema de 8%, é possível gerar energia elétrica suficiente para o VE se locomover por 1.500.000 km (RUTHER, 2010).

Outro fator que poucos brasileiros têm conhecimento é que o Brasil possui uma das maiores reservas de silício do mundo, sendo este a principal matéria-prima utilizada na fabricação de painéis fotovoltaicos. Isto faz com que o país seja um local privilegiado para desenvolver uma indústria local de produção de células fotovoltaicas, porém o silício aqui produzido é, em sua maioria, destinado à siderurgia, pois esta requer um baixo valor agregado (AMÉRICA DO SOL).

Diante de tantos benefícios da energia fotovoltaica, por que ela ainda não é largamente utilizada no Brasil? Para o professor as duas principais dificuldades deste tipo de energia no Brasil são o pouco conhecimento que os brasileiros têm desta alternativa, pois para a grande maioria energia solar é sinônimo de aquecimento de água e o alto custo, tendo em vista que os painéis são importados com um alto valor agregado sobre o silício possivelmente daqui exportado. Este valor, contudo, vem caindo consideravelmente nos últimos anos, conforme Figura 5. Nos anos de 2007, 2008 e 2009 a queda foi de 42,7% (REN21, 2011).

Figura 5- Curva de Preços de Módulos Fotovoltaicos



Fonte: National Renewable Energy laboratory (2009)

2.2. APROVEITAMENTO DA ENERGIA NO PAÍS

Como foi visto, o Brasil possui inúmeras vantagens para o desenvolvimento da tecnologia solar fotovoltaica, porém o aproveitamento desta energia, embora cada vez mais crescente, ainda é inexpressivo na matriz energética.

Existem duas principais categorias de sistemas fotovoltaicos: os sistemas isolados, que não são conectados à rede elétrica, e os sistemas conectados à rede elétrica. A diferença fundamental entre esses dois tipos de configuração é a existência ou não de um sistema acumulador de energia.

No Brasil, até 1995 os sistemas fotovoltaicos conectados à rede eram poucos e de caráter experimental, instalados em universidades, institutos de pesquisa e concessionárias de energia, portando as principais aplicações da tecnologia solar fotovoltaica no país eram relativas à telecomunicação, à eletrificação rural, aos serviços públicos e ao bombeamento de água (FRAIDENRAICH e LYRA, 1995).

Um levantamento independente, realizado pelo Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos da USP e revisado em maio de 2010 pelo Laboratório de Energia Solar da UFSC, aponta que existiam na época 38 usinas solares conectadas à rede, listadas na Tabela 1, o que demonstra que o uso de sistemas conectados à rede vêm se intensificando. Estes projetos totalizam 174 kWp de potência, representando apenas 0,0001% do total de energia elétrica produzida no Brasil em 2010.

Em agosto de 2011 foi inaugurada a primeira usina de energia solar comercial do Brasil. Localizada no Ceará, a MPX Solar possui capacidade de gerar 1 MWp, o suficiente para abastecer 1,5 mil residências e pertence ao empresário Eike Batista, que pretende expandir sua capacidade até 5 MWp (BRAGA, 2011).

Tabela 1 - Usinas Solares Conectadas na Rede em 2010

Nome	Cidade	Ano de Instalação	Potência [kWp]
CHESF	Recife - PE	1995	11
LABSOLAR	Florianópolis – SC	1997	2,1
LSF – IEE / USP (a)	São Paulo – SP	1998	0,8
UFRJ – COPPE	Rio de Janeiro – RJ	1999	0,9
FAE – UFPE	Fernando de Noronha – PE	2000	2,5
Convivência/ UFSC	Florianópolis – SC	2000	1,1

LSF – IEE / USP (b)	São Paulo – SP	2001	6,3
UFRJ	Juiz de Fora – MG	2002	31,7
IEM	Porto Alegre – RS	2002	3
CEPEL	Rio de Janeiro – RJ	2002	16,3
LSF – IEEE / USP	São Paulo – SP	2003	6
CELESC	Florianópolis – SC	2003	1,4
Lab. Energia Solar / UFRGS	Porto-Alegre – RS	2004	4,8
LSF – IEE / USP (d)	São Paulo – SP	2004	3
Centro de Cultura e Eventos / UFSC	Florianópolis – SC	2004	10,9
CELESC	Lages – SC	2004	1,4
CELESC	Tubarão – SC	2004	1,4
Escola Técnica Pelotas	Pelotas – RS	2004	0,9
Lab. de Sementes / CEMIG	Belo Horizonte – MG	2005	3,2
FAE – UFPE	Recife – PE	2005	1,3
Clínica Harmonia	São Paulo – SP	2005	0,9
CEFET – MG	Belo Horizonte – MG	2006	3,2
EFAP	Sete lagos – MG	2006	3
Casa Eficiente / ELETROSUL	Florianópolis – SC	2006	2,3
PUC – MG	Belo Horizonte – MG	2006	2,1
Unicamp	São Paulo – SP	2007	7,5
Greenpeace	São Paulo – SP	2007	2,9
GEDAE	Belém – PA	2007	1,6
FAE – UFPE (B)	Recife – PE	2007	1,5
Private House	Recife – PE	2007	1
Motor Z	São Bernardo do Campo – SP	2008	2,5
Private House	São Paulo – SP	2008	2,5
Fundição Estrela	São Bernardo do Campo – SP	2008	14,7
Solaris	Leme – SP	2008	1
UFSC (Aeroporto) / TRACTEBEL	Florianópolis – SC	2009	2,1
UFSC (HU) / TRACTEBEL	Florianópolis – SC	2009	2
UFSC (Colégio Aplicação) / TRACTEBEL	Florianópolis – SC	2009	2
ELETROSUL	Florianópolis – SC	2009	12

Fonte: Produção do próprio autor

No âmbito nacional, inúmeros projetos estão sendo desenvolvidos a fim de fomentar e disseminar o uso da energia solar fotovoltaica, especialmente para a

Copa do Mundo de 2014, período em que o Brasil ficará na vitrine mundial e poderá apresentar-se como forte adepto às energias renováveis. O projeto Estádios Solares, coordenado pelo professor Ricardo Ruther, pretende transformar alguns dos estádios que receberão os jogos da Copa em pequenas usinas de energia conectadas à rede através da instalação de painéis solares fotovoltaicos em suas coberturas. Dentre os estádios que terão painéis solares estão o Maracanã (RJ), Mané Garrincha (DF), Arena Pernambuco (PE), Itaquerão (SP) e o Mineirão (MG), com destaque para o Maracanã, estádio que sediará a final da Copa do Mundo de 2014. O estádio terá um anel fotovoltaico de 2.380m^2 sobre a estrutura metálica que sustentará a nova cobertura, tendo uma potência de 400 kWp, gerando cerca de 529 MWh ano, o suficiente para alimentar 240 residências (AMÉRICA DO SOL, 2012).

Além dos estádios solares, outros projetos também estão em desenvolvimento, como o de modernização do aeroporto Hercílio Luz, em Florianópolis, SC. O projeto foi desenvolvido em parceria com a UFSC e quer aproveitar que o aeroporto passará por reformas, prevendo a instalação de módulos fotovoltaicos com uma capacidade total de 1,2 MWp. A estimativa é que as instalações solares no novo complexo aeroportuário custem apenas 5% do custo total da obra (AMÉRICA DO SOL, 2012). Segundo o estudo, bastaria a cobrança de apenas 25 centavos por passageiro que passasse pelo aeroporto durante um ano para cobrir os custos do investimento da usina solar (AMÉRICA DO SOL, 2012).

Outro projeto que está sendo desenvolvido em Santa Catarina é o MEGAWATT SOLAR, que consiste na implantação de um sistema fotovoltaico integrado ao edifício sede da ELETROSUL, em Florianópolis, utilizando a área do telhado e dos estacionamentos adjacentes, e que será conectado à rede da distribuidora de energia elétrica local. A usina solar terá a capacidade instalada de aproximadamente 1 MWp e o edifício sede da ELETROSUL será o primeiro prédio público brasileiro com geração de energia elétrica fotovoltaica conectada à rede elétrica em larga escala (ELETROSUL, 2012).

A geração de energia elétrica através de painéis solares fotovoltaicos também apresenta algumas desvantagens, dentre as quais pode-se citar o alto custo e o baixo rendimento das células fotovoltaicas.

3. GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

3.1. INTRODUÇÃO À ENERGIA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas são sistemas de conversão direta de energia solar em energia elétrica. Esse princípio de funcionamento foi demonstrado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou uma diferença de potencial entre dois eletrodos mergulhados num eletrólito, quando um dos eletrodos foi submetido à luz. A este fenômeno deu-se o nome de Efeito Fotoelétrico. Em 1905 Albert Einstein explica a física do efeito fotoelétrico, lhe rendendo o Prêmio Nobel em 1921. Apenas nos anos 50 começou a produção industrial de células solares, as quais eram utilizadas quase que exclusivamente como fonte de energia em programas espaciais e tinham uma eficiência de aproximadamente 6%. O estudo de aplicações terrestres de módulos fotovoltaicos teve início a pouco mais de quinze anos, rendendo resultados significativos. Atualmente sua eficiência chega a 20% para células monocristalinas e na ordem de 40% para células multi-junções em laboratório (DACOL, 2011).

3.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Um módulo fotovoltaico consiste na associação de várias células em série e/ou em paralelo, para obter os níveis de tensão e corrente de saída que forem desejados.

Neste trabalho serão utilizados os módulos Sunmodule SW130 Poly R6A, composto por 36 células de silício policristalinos associadas em série e 130 W de potência máxima. Na Figura 6 tem-se uma imagem dos módulos em questão e na Tabela 2 estão presentes seus principais parâmetros fornecidos pelo fabricante.

Figura 6- Painéis SW130 Poly R6A



Fonte: STEIN, Felipe. (TCC - 2012)

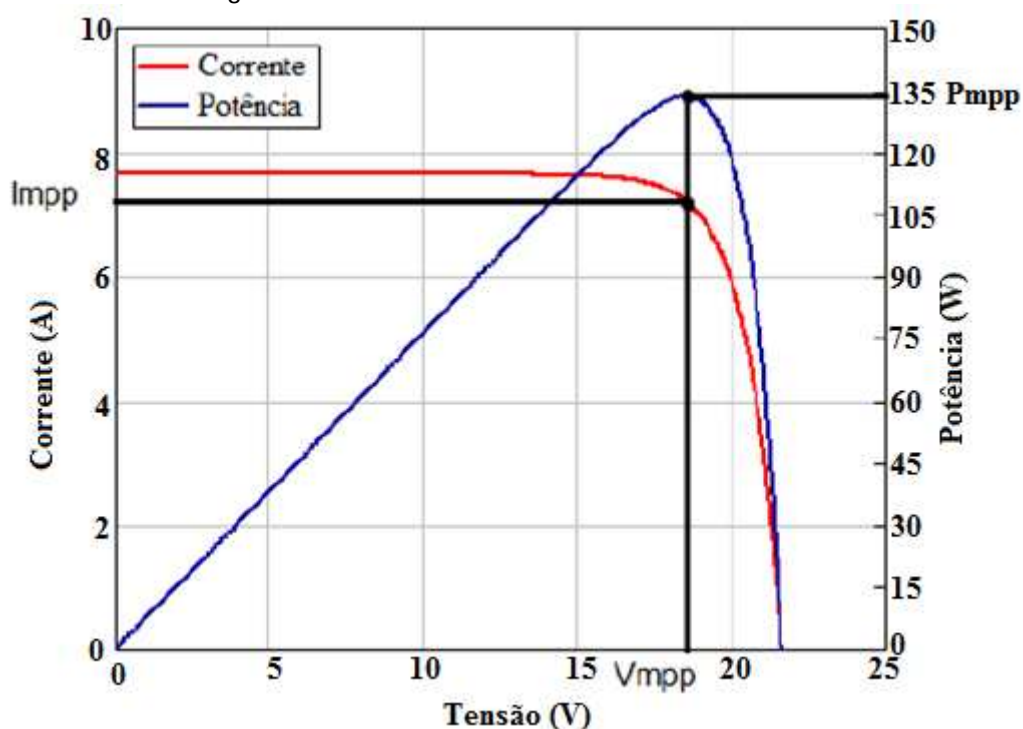
Tabela 2 - Parâmetros Nominais do Módulo SW130 poly R6A

$P_{max} = 130\text{ W}$	<i>Potência máxima</i>
$I_{SC} = 7,65\text{ A}$	<i>Corrente de curto – circuito</i>
$V_{OC} = 21,9\text{ V}$	<i>Tensão de circuito aberto</i>
$V_{mpp} = 17,7\text{ V}$	<i>Tensão no ponto de máxima potência</i>
$I_{mpp} = 7,38\text{ A}$	<i>Corrente no ponto de máxima potência</i>

Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 7 apresenta a característica de Tensão *versus* Corrente de um módulo fotovoltaico, através da qual nota-se que a potência não é constante, havendo um ponto no qual a potência gerada pelos painéis é máxima (MPP). Este ponto é visado pelo controle do conversor cc-cc conectado entre o conversor cc-ca e os painéis fotovoltaicos, sendo este rastreamento denominado de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). O conversor cc-cc da Figura 1 será responsável pelo processamento eficiente da energia gerada pelos PVs e é tema de outro projeto de TCC, o qual será desenvolvido pelo graduando em Engenharia Elétrica Ricardo Weihermann.

Figura 7- Curva Tensão versus Corrente de um PV



Fonte: STEIN, Felipe. (TCC - 2012)

Existem diversos métodos de MPPT descrito em (MARTINS, COELHO e SANTOS, 2011), os quais não serão detalhados neste trabalho.

Considerações teóricas, aqui não examinadas, demonstram que o limite máximo de rendimento energético das células de silício cristalinas é de 22% operando à 20 °C, porém na prática, verifica-se um rendimento de 12 a 14% devido à reflexão sobre a superfície. A baixa eficiência de painéis fotovoltaicos pode ser explicada também pelo fato de que aproximadamente 80% da radiação incidente nas células fotovoltaicas é transformada em calor (MEZAROBIA, 1998).

3.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NO FUNCIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

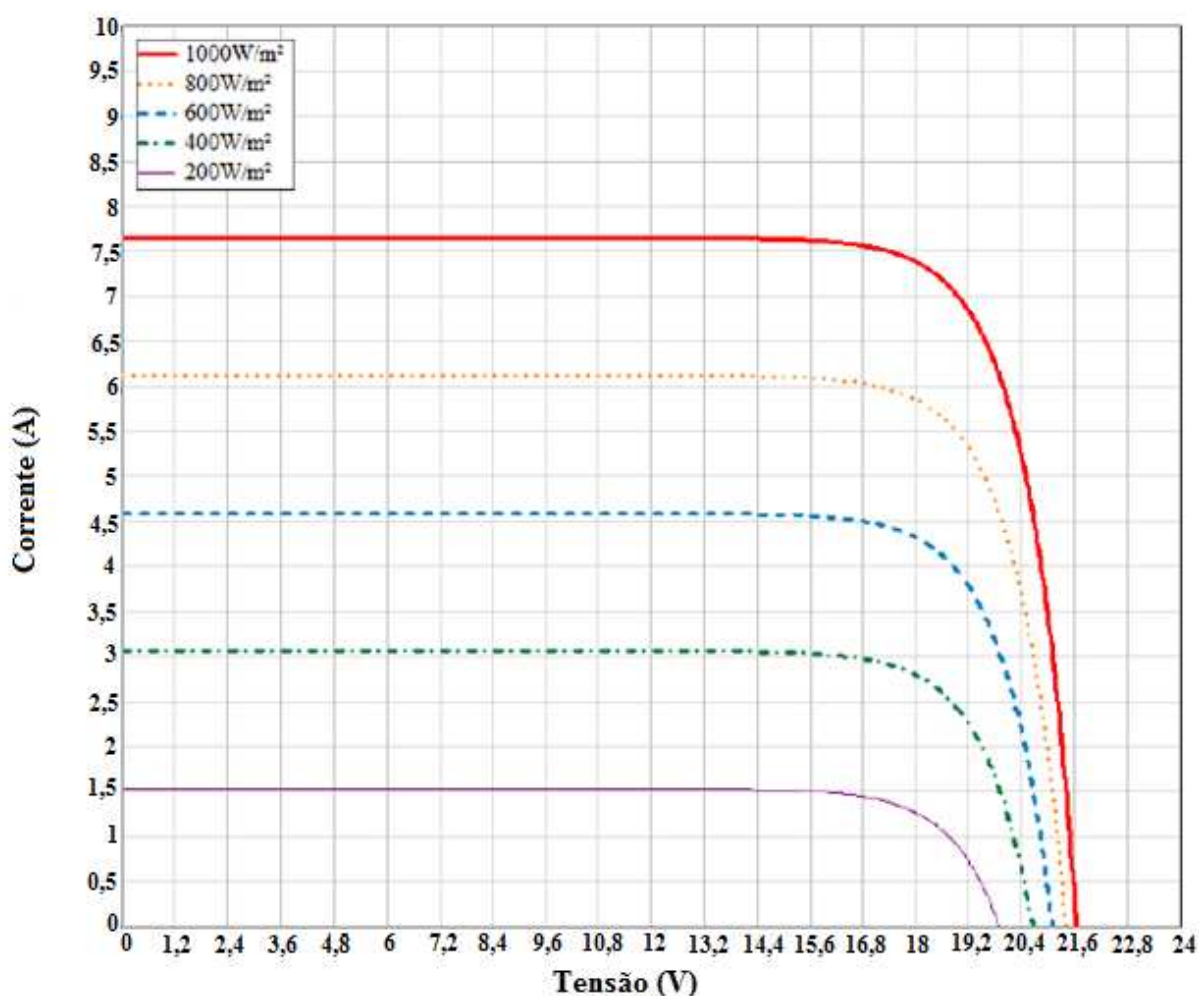
O funcionamento de um módulo fotovoltaico pode ser afetado basicamente por dois fatores, a variação da radiação solar, e a temperatura de operação.

3.3.1. Efeito da Variação da Radiação

A radiação solar é imprescindível para o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, sem a qual não existe corrente fotogerada.

A Figura 8 mostra o efeito da variação da radiação solar sobre a curva de Corrente *versus* Tensão do módulo em questão. Percebe-se maior efeito sobre a corrente, que diminui com a diminuição da radiação, em comparação com a tensão do painel.

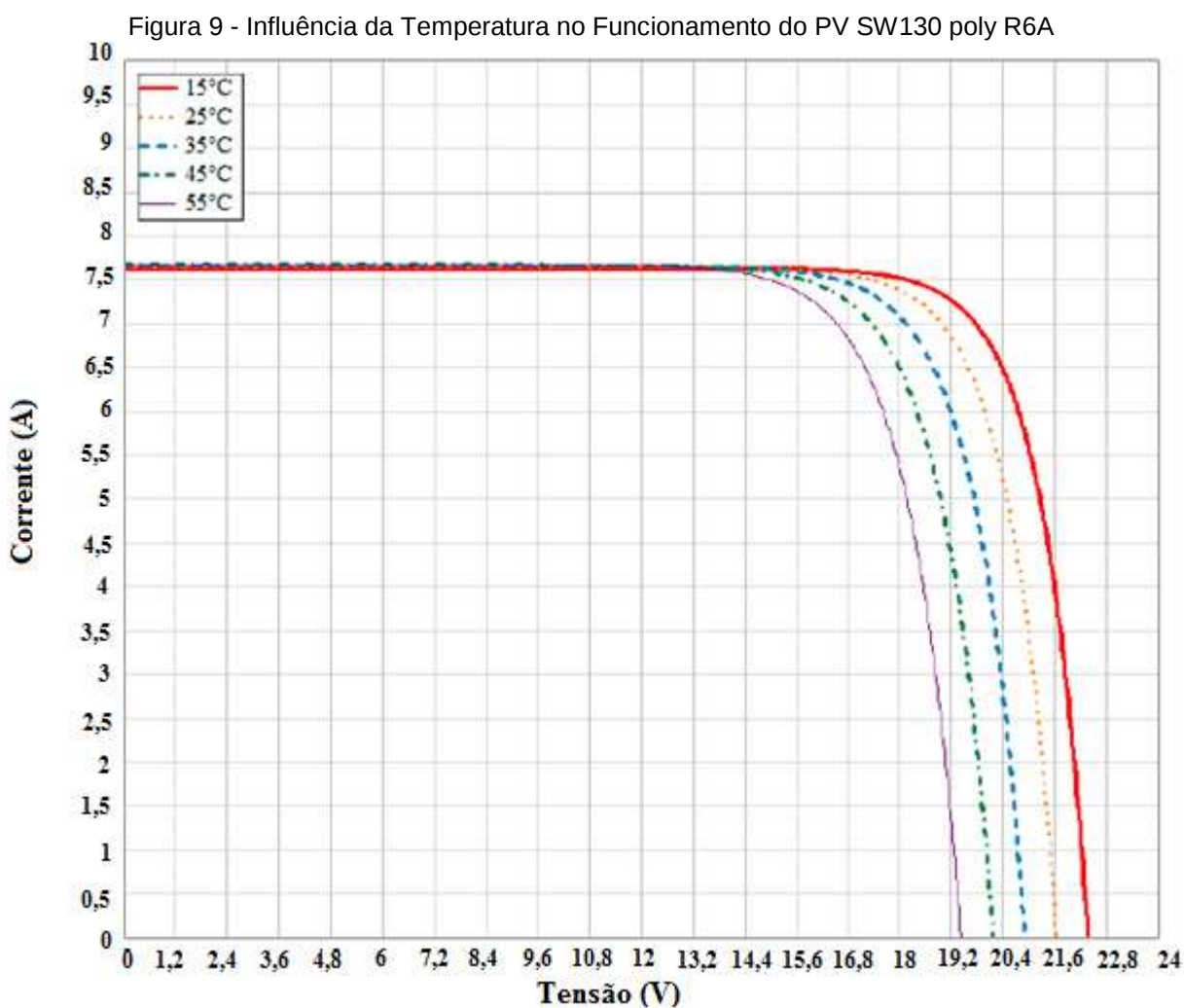
Figura 8 - Influência da Radiação no Funcionamento do PV SW130 poly R6A



Fonte: STEIN, Felipe. (TCC - 2012)

3.3.2. Efeito da Variação da Temperatura

A temperatura de operação interfere diretamente na eficiência do sistema e, na Figura 9, têm-se curvas características de painéis fotovoltaicos operando em diferentes temperaturas, na qual pode-se ver que a temperatura pouco afeta a corrente gerada pelo painel, porém afeta significativamente a tensão de MPP, que se localiza no “joelho” da curva.



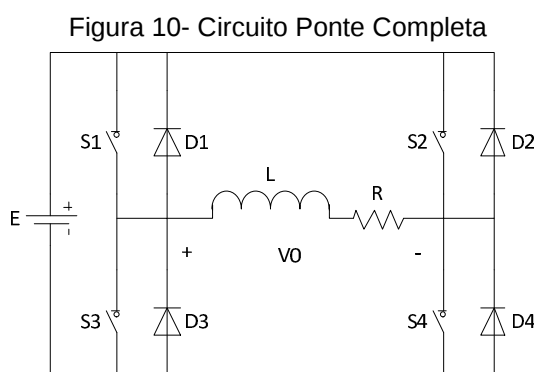
Fonte: STEIN, Felipe. (TCC - 2012)

4. ESTUDO DOS CONVERSORES CC-CA PROPOSTOS

A seguir serão propostas três topologias básicas de conversores cc-ca, sendo que a escolha da topologia a ser utilizada levará em conta a simplicidade, robustez, baixa manutenção e a adequação ao circuito de comando que será proposto.

4.1. CONVERSOR CC-CA EM PONTE COMPLETA

A estrutura idealizada do conversor cc-ca monofásico em ponte completa é apresentada na Figura 10. É recomendada a utilização deste conversor para altas potências, tendo em vista que o nível de tensão alternada de saída é alto quando comparado com outras topologias monofásicas e, conseqüentemente, a corrente é baixa, reduzindo os esforços nos semicondutores (BARBI e MARTINS, 2005).



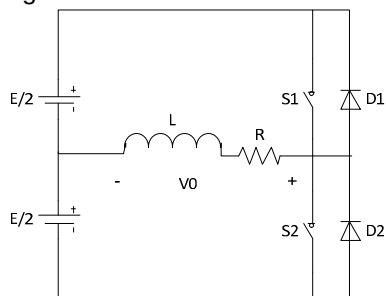
Fonte: produção do próprio autor

Neste conversor os semicondutores ficam submetidos à tensão E quando não estão conduzindo, ocorrendo também a necessidade do emprego de quatro interruptores e quatro diodos em antiparalelo, o que encarece o projeto, diminui a robustez e dificulta o comando, pois os interruptores não estão referenciados no mesmo ponto, necessitando de comando isolado. Portanto esta topologia não é interessante para esta aplicação.

4.2. CONVERSOR CC-CA EM MEIA-PONTE

O conversor cc-ca em meia-ponte é indicado para aplicações em baixa potência e alta tensão de entrada, tendo em vista que a tensão de saída é duas vezes menor que o nível de tensão na entrada. Isso significa que para a mesma potência de carga, a corrente que circula nos semicondutores é o dobro da corrente na entrada, quando comparada com a mesma corrente no conversor em ponte completa. Outro ponto negativo desta estrutura é a necessidade de se dividir a tensão de entrada, sendo mais comumente empregado um divisor capacitivo para tal, além de necessitar de comando isolado (BARBI e MARTINS, 2005).

Figura 11- Circuito em Meia-Ponte



Fonte: produção do próprio autor

4.3. CONVERSOR CC-CA PUSH-PULL

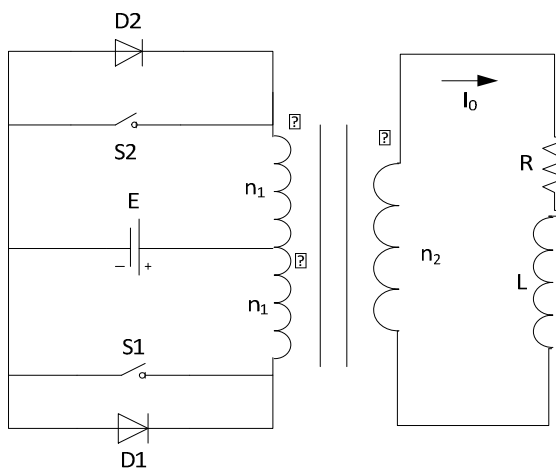
O conversor cc-ca push-pull possui algumas vantagens em relação às estruturas já citadas, as quais justificam a escolha do mesmo para esta aplicação, tais como:

- Emprego de apenas dois interruptores controlados;
- Circuitos de comando na mesma referência;
- Possibilidade de alterar a tensão de saída pela relação de espiras do transformador, sendo possível a conexão direta do secundário com a rede elétrica;

Um dos grandes inconvenientes do conversor push-pull é o fato da tensão reversa nos interruptores ser o dobro da tensão de alimentação. Portanto, esse

circuito é recomendado para aplicações em baixa tensão (BARBI e MARTINS, 2005), como é este caso.

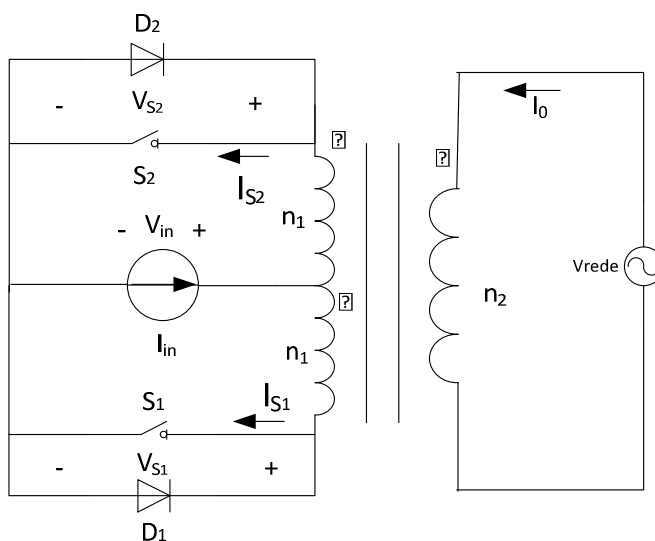
Figura 12- Circuito Push-Pull



Fonte: produção do próprio autor

A circuito do conversor cc-ca que será implementado encontra-se na Figura 13, através da qual nota-se que o secundário do transformador será conectado diretamente na rede elétrica. Isso provocará alterações nas formas de onda descritas em (BARBI e MARTINS, 2005), sendo que cada interruptor conduz em um semi-ciclo da rede. O circuito de comando será abordado no item 5.1.

Figura 13– Circuito Push-Pull Conectado na Rede



Fonte: Produção do próprio autor

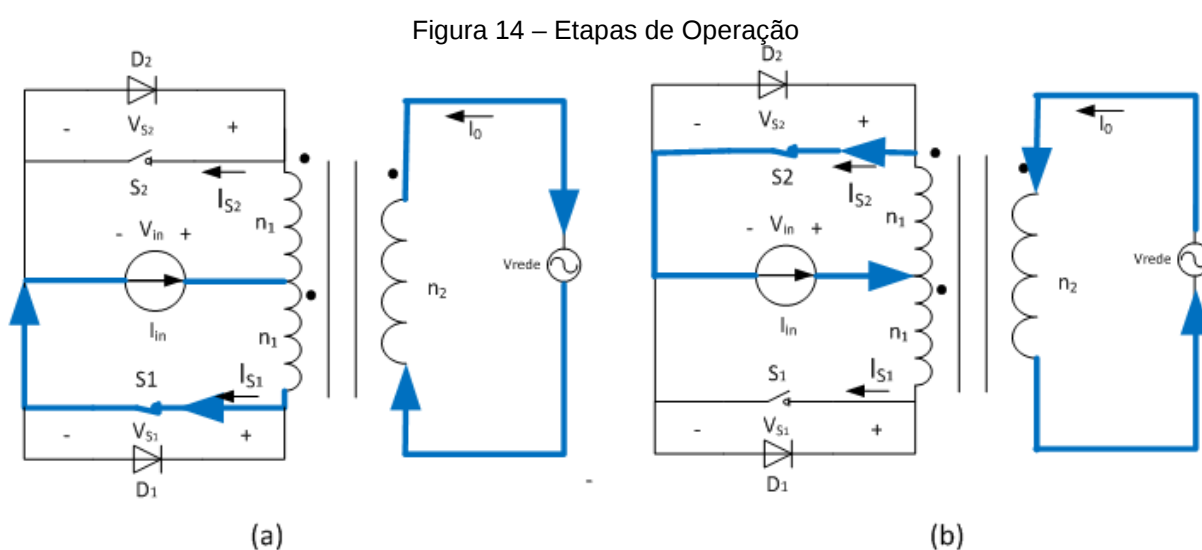
4.3.1. Princípio de Funcionamento

Para a descrição das etapas de operação do conversor será adotado o transformador ideal, os semicondutores também ideais (sem perda e tempo de comutação nulo) e corrente de entrada sem ondulação. Na Figura 15 encontram-se as formas de onda das etapas de operação.

1ª Etapa ($T_0 < t < T_s/2$, Figura 14 (a)): Esta etapa inicia em T_0 , quando a tensão da rede passa por zero. O interruptor S_2 que conduzia a corrente de entrada é comandado a bloquear enquanto o interruptor S_1 é comandado a conduzir, assumindo a corrente I_{in} . A tensão no interruptor S_2 é igual a duas vezes a tensão no enrolamento primário, que é senoidal.

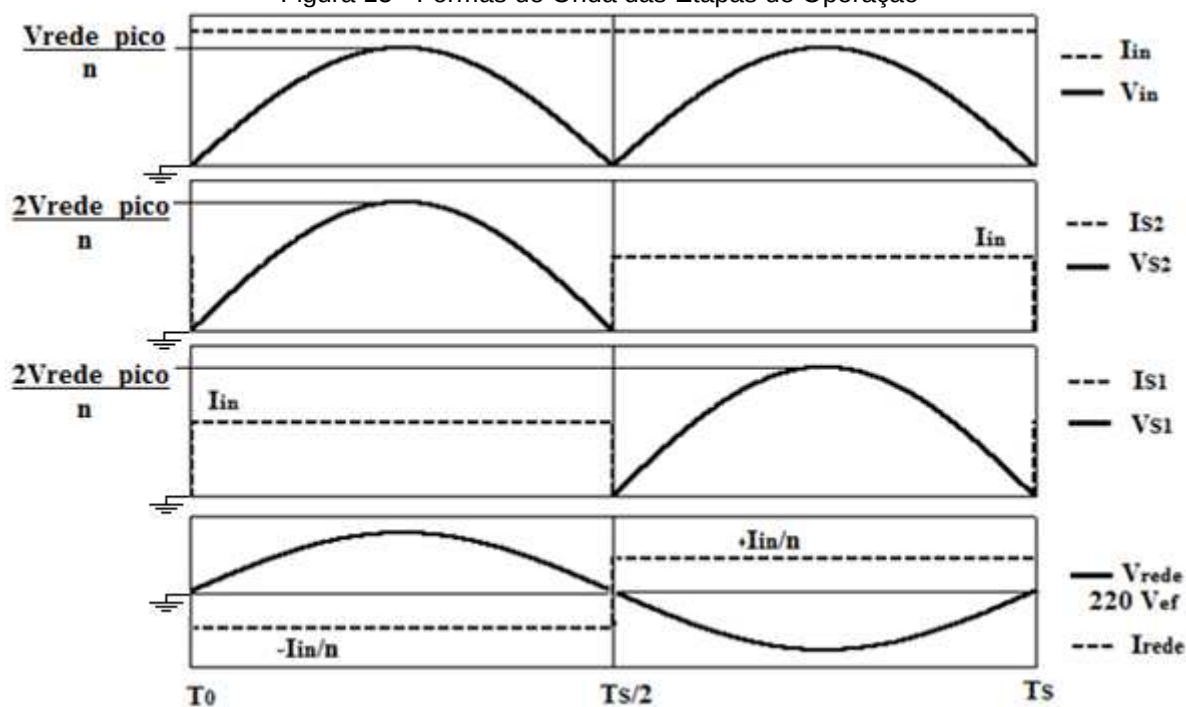
2ª Etapa ($T_s/2 < t < T_s$, Figura 14 (b)): Esta etapa tem início novamente quando a tensão da rede tem sua passagem por zero, no instante $T_s/2$. O interruptor S_1 é comandado a bloquear e o interruptor S_2 comandado a conduzir a corrente I_{in} . Esta etapa termina em T_s , quando a 1ª etapa volta a se repetir.

A tensão na fonte de alimentação V_{in} é igual a tensão dos enrolamentos primários retificada.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 15 - Formas de Onda das Etapas de Operação



Fonte: Produção do próprio autor

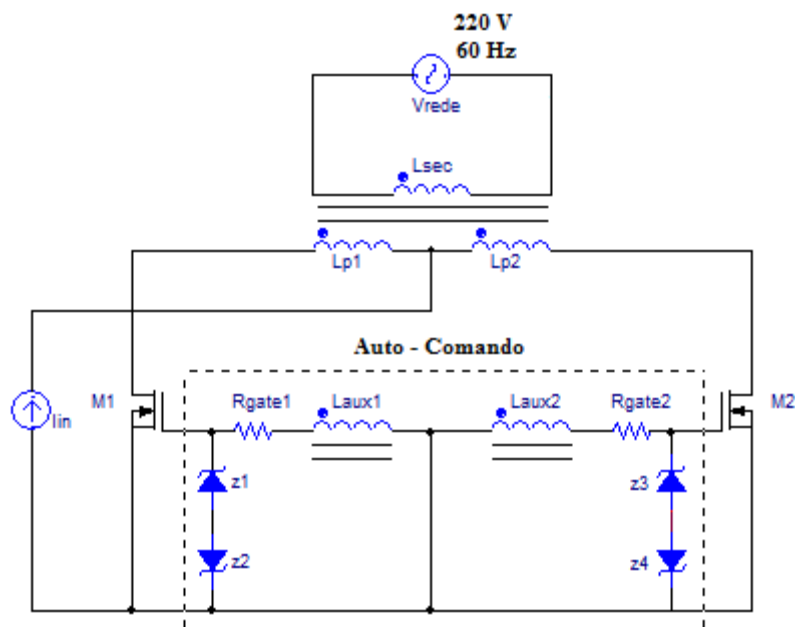
Como pode-se observar, a forma de onda da corrente entregue à rede não é senoidal, pois o transformador é conectado diretamente na rede elétrica, o que aumenta o conteúdo harmônico, degrada o fator de potência e diminui a qualidade da energia entregue à rede.

5. PROJETO FÍSICO DO CONVERSOR

5.1. DEFINIÇÃO DO CIRCUITO DE COMANDO

O circuito de comando é responsável por gerar os níveis de tensões necessárias para o comando dos interruptores. Visando a simplicidade, robustez e a fácil implementação, o circuito de comando proposto consiste basicamente em adicionar dois enrolamentos auxiliares no transformador do conversor que são ligados diretamente aos resistores de gatilho dos interruptores. Conforme é visto na Figura 16, cada circuito de comando é composto por dois diodos zener e um resistor. Os zeners são responsáveis pelo grampeamento da tensão de gatilho no nível máximo e mínimo escolhidos pelo projetista, neste caso 15 V e -8,2 V, respectivamente. O resistor é responsável pela rapidez da comutação e limitação da corrente reversa no zener.

Figura 16- Circuito de Comando Proposto

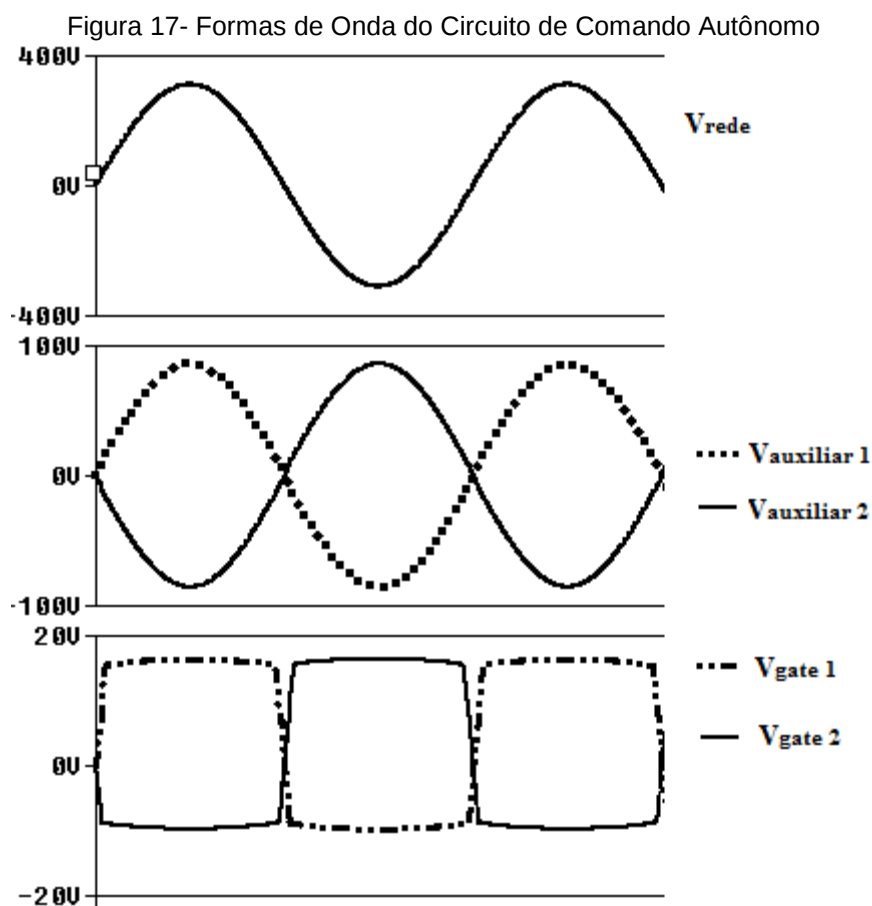


Fonte: Produção do próprio autor

O circuito de comando proposto tem a característica de ser autônomo, ou seja, quando o conversor é conectado na rede ocorre o carregamento das capacitâncias do *mosfet* pela fonte de alimentação até a tensão de gatilho atingir o

valor necessário para o disparo, iniciando assim automaticamente o chaveamento. As tensões nos enrolamentos auxiliares são defasadas de 180° e proporcionais à tensão de saída do conversor (rede). A comutação dos interruptores ocorre na passagem por zero da tensão da rede. Os enrolamentos são projetados para fornecerem uma tensão superior ao limite de entrada em condução dos interruptores.

A Figura 17 ilustra este fato, na qual se pode ver que durante o período de tempo em que a tensão de saída V_{rede} é positiva, tem-se tensão suficientemente alta aplicada no *gate* do *mosfet1* para que ele entre em condução. O mesmo efeito ocorre para o *mosfet2*, porém, no período de tempo em que a tensão da rede assume valores negativos.



Fonte: Produção do próprio autor

Para os diodos zener $z1$ e $z3$ do circuito de comando foi escolhido o componente **1N4744A**. Para $z2$ e $z4$ escolheu-se o **1N4738A**. Na Tabela 3 encontram-se suas principais características fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3- Características Diodos Zener

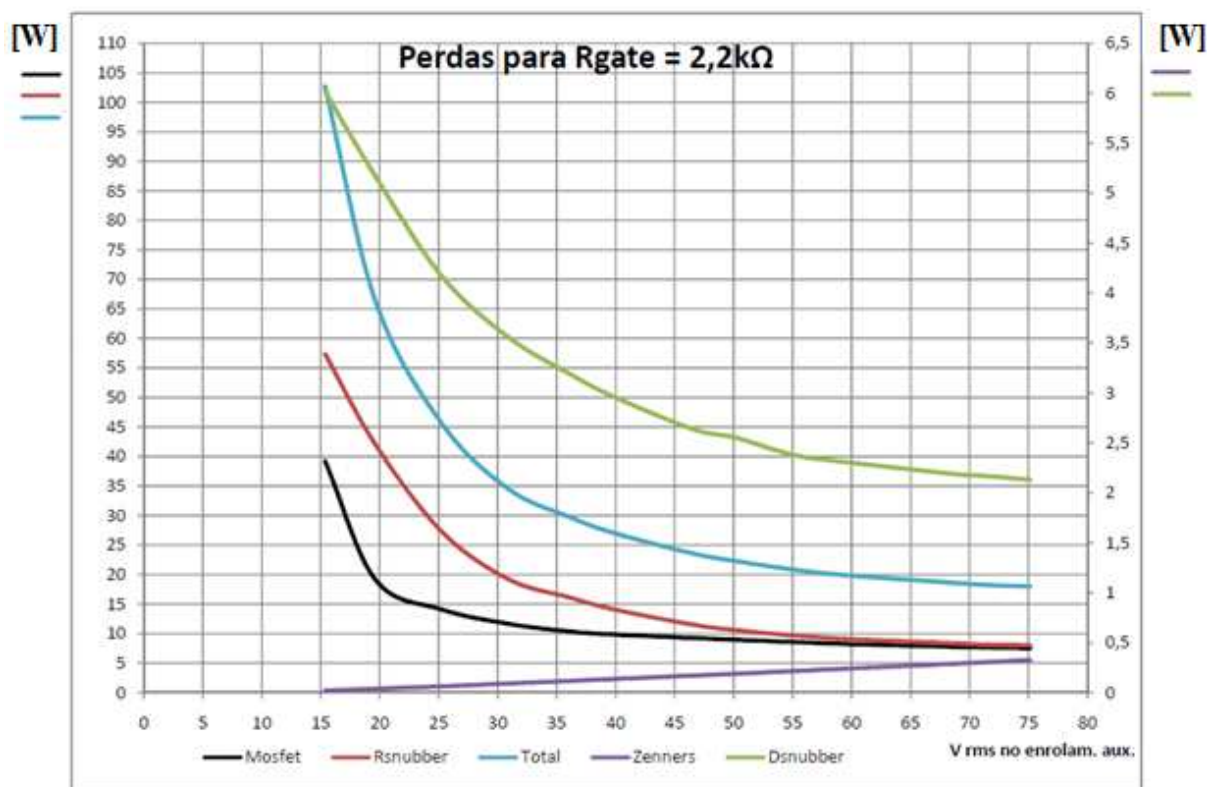
	Tensão Zener	Resistência Zener	Potência Zener
	[Vz]	[Rz]	[Pz]
1N4744A	15 V	14 Ω	1 W
1N4738A	8,2 V	4,5 Ω	1 W

Fonte: Produção do próprio autor

Para a escolha do nível de tensão eficaz nos enrolamentos auxiliares foram feitas simulações com variações paramétricas utilizando o *software Orcad PSpice 16.3* e, a partir delas, gerado o ábaco de perdas da Figura 18. Nele constam as perdas em apenas um braço do conversor e no circuito de comando somente de um interruptor. É possível observar que quanto maior a tensão eficaz nos enrolamentos auxiliares (eixo x), maiores são as perdas nos diodos zener e menores são as perdas totais no conversor, pois a comutação se torna mais rápida, porém maior o custo e volume do transformador. Portanto decidiu-se projetar o transformador com 60 volts eficazes em cada enrolamento auxiliar, pois a partir deste valor percebe-se pouca diminuição das perdas no conversor.

Como a tensão dos enrolamentos auxiliares é relativamente alta, deve-se limitar a corrente que circula pelos diodos zener a fim de não danificá-los, portanto, foram escolhidos os resistores de gatilho de 2,2 $k\Omega$, pois conseguiu-se bons resultados nas simulações com este valor de resistência.

Figura 18- Tensão Enrolamentos Auxiliares X Perdas



Fonte: Produção do próprio autor

5.2. ESFORÇOS NOS COMPONENTES E ESCOLHA DO INTERRUPTOR

Nesta etapa serão calculados, a partir das formas de onda e das etapas de operação do conversor (Figura 15), os esforços nos componentes do circuito. Para isso será considerado a corrente de entrada sem ondulação. Na Tabela 4 encontram-se as especificações para os cálculos. O sistema está sendo projetado para processar a energia proveniente de três PVs, sendo que cada um possui potência máxima de 130 W assim, considerando o conversor cc-cc com rendimento de 100%, a potência ativa de entrada utilizada nos cálculos do conversor cc-ca foi de 390 W.

O conversor cc-cc terá 10 volts em sua saída, sendo esta a tensão de entrada do conversor cc-ca. Por este fato tem-se nos enrolamentos primários um valor eficaz da tensão de 10 volts.

Tabela 4 - Especificações para o Cálculo dos Esforços

$f_s = 60 \text{ Hz}$	<i>Frequência de comutação</i>
$T_s = \frac{1}{f} = 16,66 \text{ ms}$	<i>Período de comutação</i>
$V_{p1_{ef}} = V_{p2_{ef}} = 10 \text{ V}$	<i>Tensão eficaz nos primários</i>
$V_{aux1} = V_{aux2} = 60 \text{ V}$	<i>Tensão eficaz nos enr. auxiliares</i>
$V_{sec_{ef}} = 220 \text{ V}$	<i>Tensão eficaz no secundário</i>
$n = \frac{V_{sec_{ef}}}{V_{p1_{ef}}} = 22$	<i>Relação de transformação</i>
$P_{in} = 390 \text{ W}$	<i>Potência de entrada no conversor</i>

Fonte: Produção do próprio autor

5.2.1. Esforços no Interruptor

Cada interruptor conduz por metade do período, logo:

$$I_{s1_{md}} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s/2} I_{in} dt = \frac{I_{in}}{2}$$

$$I_{s1_{md}} = I_{s2_{md}} = \frac{I_{in}}{2}$$

Onde:

$I_{s1_{md}}, I_{s2_{md}}$ – Valor médio da corrente nos interruptores

$$I_{s1_{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s/2} I_{in}^2 dt} = \frac{I_{in}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{s1_{ef}} = I_{s2_{ef}} = \frac{I_{in}}{\sqrt{2}} \quad (5.1)$$

Onde:

$I_{s1_{ef}}, I_{s2_{ef}}$ – Valor eficaz da corrente nos interruptores

Conforme a Figura 15, a tensão máxima no interruptor ($V_{s1_{pico}}, V_{s2_{pico}}$) é dada por:

$$V_{s1_{pico}} = 2 \cdot V_{in_{pico}} = 2 \cdot V_{p1_{pico}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 10$$

$$Vs1_{pico} = Vs2_{pico} = 28,28 V \quad (5.2)$$

O interruptor escolhido foi o *Mosfet IRFZ48N* da **International Rectifier®**, cujas especificações são vistas na Tabela 5.

Tabela 5- Especificações <i>Mosfet</i> IRFZ48N	
$V_{DSS} = 55 V$	Tensão Dreno-Source máxima
$R_{DS(on)} = 14 m\Omega$	Resistência de condução
$I_D = 64 A$	Corrente de dreno média @25 °C
$R_{jc} = 1,15 ^\circ C/W$	Resistência térmica junção-cápsula
$T_j = 175 ^\circ C$	Temperatura máxima na junção
Fonte: Produção do próprio autor	

5.2.2. Esforços nos Enrolamentos Primários do Transformador

Como o enrolamento primário está em série com o interruptor, tem-se:

$$Ip1_{ef} = Ip2_{ef} = Is1_{ef} \quad (5.3)$$

Onde:

$Ip1_{ef} = Ip2_{ef}$ – Valor eficaz da corrente em cada enrolamento primário

A tensão eficaz nos enrolamentos primários é definida pela relação de transformação e vale 10 V, conforme Tabela 4.

5.2.3. Esforços no Enrolamento Secundário do Transformador

O enrolamento secundário é ligado diretamente na rede, logo:

$$Vsec_{ef} = 220 V \quad (5.4)$$

A corrente de pico no enrolamento secundário é calculada por:

$$Isec_{pico} = \frac{I_{in}}{n} = \frac{39}{22} = 1,77 A$$

$$I_{sec_{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \left[\int_0^{T_s/2} (-I_{sec_{pico}})^2 dt + \int_{T_s/2}^{T_s} I_{sec_{pico}}^2 dt \right]}$$

$$I_{sec_{ef}} = 1,77 A \quad (5.5)$$

Onde:

$I_{sec_{pico}}$ – Valor de pico da corrente no secundário

$I_{sec_{ef}}$ – Valor eficaz da corrente no secundário

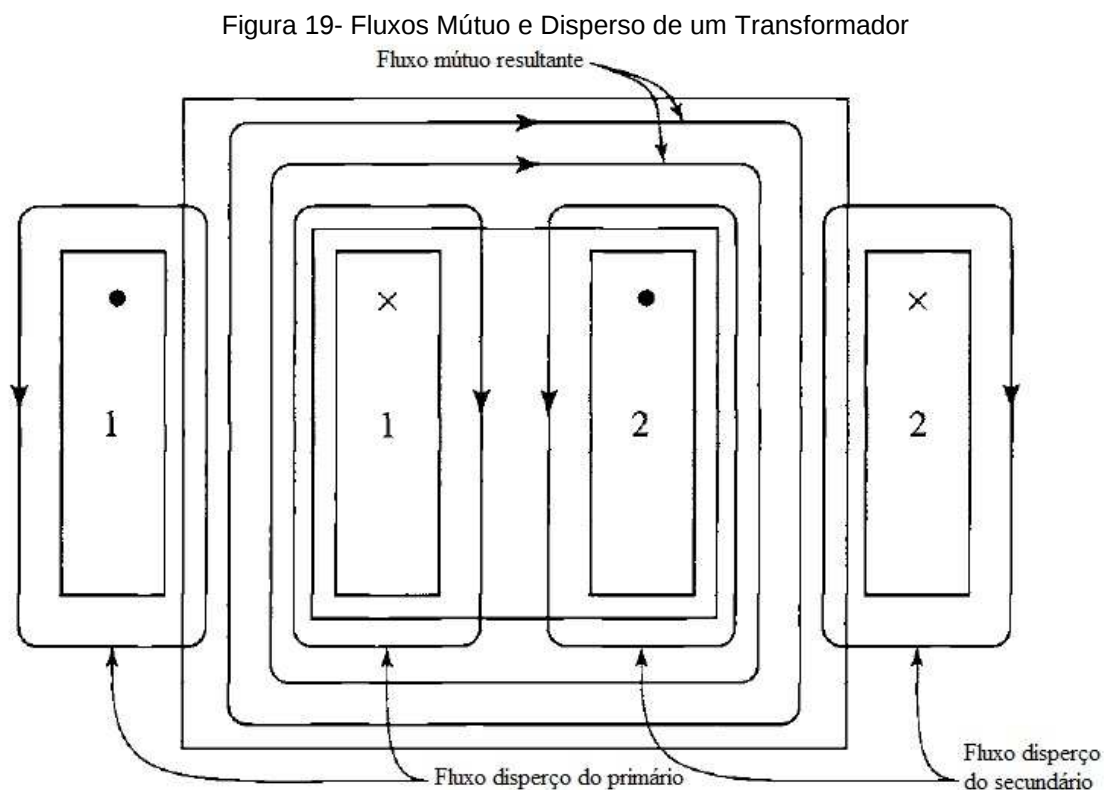
5.3. ESTUDO E PROJETO DO TRANSFORMADOR

5.3.1. Estudo do Transformador

Como foi visto no Capítulo 4, o conversor cc-ca push-pull possui uma estrutura galvanicamente isolada. Esta isolação é feita com um transformador que consiste, basicamente, de dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se um desses enrolamentos for conectado a uma fonte de tensão alternada, então, será produzido um fluxo alternado cuja amplitude e frequência dependerá da tensão aplicada e do número de espiras. O fluxo comum está enlaçado com o outro enrolamento, induzindo neste uma tensão cujo valor depende do número de espiras desse enrolamento, assim como da magnitude do fluxo comum e da frequência. Dessa forma, estabelecendo uma proporção adequada entre o número de espiras dos dois enrolamentos, qualquer relação de tensão pode ser obtida (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006).

Devido à alta permeabilidade dos materiais ferromagnéticos, eles são muito utilizados para acoplar os dois enrolamentos de um transformador de forma que o fluxo enlaçado fique em sua maior parte confinado no material ferromagnético (núcleo). Porém, a permeabilidade magnética do núcleo não é infinita, ou seja, há uma quantia do fluxo produzido pelos enrolamentos que não enlaça os dois enrolamentos. A esse fluxo dá-se o nome de fluxo disperso. A Figura 19 fornece um

melhor entendimento do fluxo disperso e do fluxo mútuo em um transformador monofásico.



Fonte: (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006)

5.3.1.1. Modelagem Matemática e Circuito Equivalente

Em um transformador ideal, quando uma tensão V_1 variável no tempo é aplicada nos terminais do primário, um fluxo φ é estabelecido no núcleo. A expressão matemática que relaciona essas duas grandezas é mostrada na equação (5.6), onde N_1 representa o número de espiras do enrolamento primário.

$$V_1 = N_1 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (5.6)$$

Como o fluxo concatena o secundário simultaneamente, é estabelecida uma tensão V_2 no secundário semelhante à tensão estabelecida no primário cuja expressão matemática é mostrada na equação (5.7), sendo N_2 o número de espiras do secundário.

$$V_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (5.7)$$

Da razão entre as equações (5.6) e (5.7), chega-se em:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.8)$$

Assim, conclui-se que um transformador transforma tensões na razão direta das espiras de seus enrolamentos.

Quando conectada uma carga no secundário, surge uma corrente i_2 em seu enrolamento. Como, em um transformador ideal, o fluxo não se altera com a presença de uma carga no secundário, a força magneto motriz (FMM) que atua no núcleo permanecerá desprezível. Assim, tem-se:

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = 0 \quad (5.9)$$

De onde vem:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.10)$$

Através das equações (5.8) e (5.10), obtém-se

$$V_1 \cdot i_1 = V_2 \cdot i_2 \quad (5.11)$$

Ou seja, a potência instantânea de entrada do primário é igual à potência instantânea de saída do secundário em um transformador ideal. Isto já era esperado uma vez que os elementos dissipativos de energia foram desconsiderados.

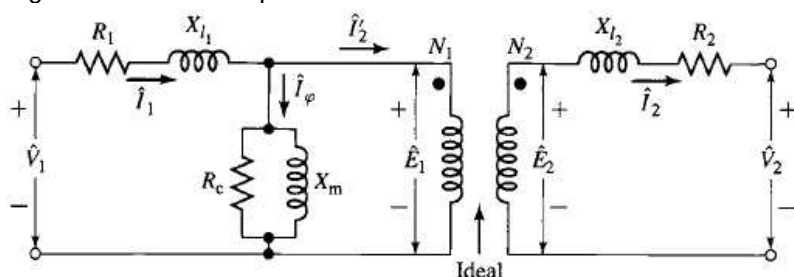
Porém, na análise do desempenho de transformadores, é necessária a utilização de um modelo mais completo que leve em consideração as não idealidades presentes no transformador como os efeitos provocados pelas resistências elétricas dos enrolamentos, os fluxos dispersos no núcleo e a corrente de excitação.

No enrolamento primário, o fluxo disperso induz uma tensão que se soma àquela produzida pelo fluxo mútuo e ele pode ser representado por uma indutância de dispersão L_1 (fluxo de dispersão no primário por unidade de corrente do primário).

Além disto, haverá uma queda de tensão na resistência R_1 do enrolamento primário que também deve ser considerada. Como a permeabilidade magnética do núcleo não é infinita, a corrente do primário precisa produzir o fluxo mútuo resultante, essa corrente responsável pela produção do fluxo mútuo recebe o nome de corrente de excitação I_ϕ , cuja magnitude pode ser da ordem de 6% da magnitude da corrente nominal desse enrolamento (OLIVEIRA, COGO e ABREU, 1984).

A corrente de excitação pode ser dividida em duas componentes, a de perdas no núcleo por correntes induzidas e histerese e a de magnetização que, efetivamente, produz o fluxo mútuo necessário para o funcionamento do transformador. Fazendo a mesma análise feita para o fluxo disperso no enrolamento primário e para sua resistência elétrica no enrolamento secundário, é possível, finalmente, obter um circuito equivalente de um transformador, esse circuito é mostrado na Figura 20.

Figura 20- Circuito Equivalente T de um Transformador Monofásico



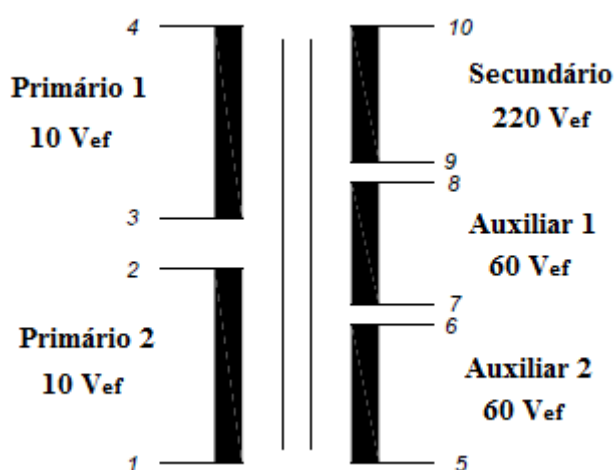
Fonte: (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006)

Na figura acima, $\hat{V}_1$ é a tensão de alimentação do primário, $\hat{I}_1$ é a corrente que flui no enrolamento primário, R_1 é a resistência elétrica do enrolamento primário, X_{l1} é a reatância de dispersão do primário, $\hat{I}_\phi$ é a corrente de excitação, R_c é a resistência representativa das perdas no núcleo, X_m é a reatância de magnetização, X_{l2} é a reatância de dispersão do secundário, $\hat{V}_2$ e $\hat{I}_2$ são, respectivamente, a tensão e a corrente elétrica que flui no secundário.

5.3.2. Projeto do Transformador

O diagrama elétrico do transformador a ser projetado encontra-se na Figura 21, através da qual nota-se que o mesmo possui cinco enrolamentos, sendo dois primários, um secundário e dois auxiliares.

Figura 21- Diagrama Elétrico do Transformador



Fonte: Produção do próprio autor

Para o projeto do transformador, por ser de baixa frequência, utilizou-se a metodologia apresentada em (MARTIGNONI, 1973).

Primeiramente calcula-se a potência que cada um dos enrolamentos processa a fim de se obter as especificações do transformador. Para isso foram desprezadas as ondulações de corrente devido à indutância magnetizante e não linearidades do circuito.

Considerando a corrente de entrada máxima ($I_{in} = 39 A$), a partir das equações apresentadas no item 5.2, a potência aparente em cada um dos enrolamentos primários é:

$$S_{p1} = S_{p2} = V_{p1_{ef}} \cdot I_{p1_{ef}} = 10 \cdot 27,57$$

$$S_{p1} = S_{p2} = 275,7 VA$$

A partir das equações (5.4) e (5.5), a potência aparente no enrolamento secundário é:

$$S_{sec} = V_{sec_{ef}} \cdot I_{sec_{ef}} = 220 \cdot 1,77$$

$$S_{sec} = 390 \text{ VA}$$

Portanto, tem-se as seguintes especificações para o transformador:

Tabela 6- Especificações do Transformador	
$S_{sec} = 390 \text{ VA}$	<i>Potência aparente no secundário</i>
$S_{p1} = S_{p2} = 275,7 \text{ VA}$	<i>Potência aparente nos primários</i>
$V_{sec_{ef}} = 220 \text{ V}$	<i>Tensão eficaz no secundário</i>
$V_{p1_{ef}} = V_{p2_{ef}} = 10 \text{ V}$	<i>Tensão eficaz nos primários</i>
$V_{aux1} = V_{aux2} = 60 \text{ V}$	<i>Tensão eficaz nos enr. Auxiliares</i>
$I_{sec_{ef}} = 1,77 \text{ A}$	<i>Corrente eficaz no secundário</i>
$I_{p1_{ef}} = I_{p2_{ef}} = 27,57 \text{ A}$	<i>Corrente eficaz nos primários</i>
Fonte: Produção do próprio autor	

5.3.2.1. Cálculo da Seção e Escolha da Bitola dos Condutores

Para se calcular a seção dos condutores é preciso fixar a densidade de corrente. Para transformadores até 500 VA recomenda-se uma densidade de corrente de 3 ampéres por milímetro quadrado ($d = 3 \text{ A/mm}^2$).

$$A_{p1} = A_{p2} = \frac{I_{p1_{ef}}}{d} = \frac{27,57}{3} = 8,9 \text{ mm}^2$$

$$A_{sec} = \frac{I_{sec_{ef}}}{d} = \frac{1,77}{3} = 0,572 \text{ mm}^2$$

Onde:

A_{p1}, A_{p2} - Seção dos condutores dos primários

A_{sec} - Seção dos condutores do secundário

Como o transformador será operado em baixa frequência, pode-se desprezar o “Efeito Skin”, no qual componentes alternadas de corrente circulam pela periferia dos condutores, ao invés de percorrerem toda a seção do condutor.

De acordo com uma tabela fornecida pelo fabricante de fios, para os enrolamentos primários decidiu-se pela utilização de dois fios em paralelo, um #10

AWG com área de cobre igual a $5,26 \text{ mm}^2$ e outro #11 AWG com área de cobre igual a $4,173 \text{ mm}^2$, totalizando em $9,43 \text{ mm}^2$ de área de cobre.

Para o enrolamento secundário decidiu-se o fio #19 AWG com área de cobre igual a $0,65 \text{ mm}^2$.

A corrente que vai percorrer o enrolamento auxiliar é muito pequena, portanto, será utilizado o fio #22 AWG com $0,33 \text{ mm}^2$ de área de cobre.

5.3.2.2. Escolha das Lâminas do Núcleo

Primeiramente calcula-se a seção magnética do núcleo (S_m) que irá concatenar o fluxo entre os enrolamentos. Para transformadores de dois primários e um secundário pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$S_m = 7,5 \cdot \sqrt{\frac{1,25 \cdot S_{sec}}{f}} = 7,5 \cdot \sqrt{\frac{1,25 \cdot 390}{60}}$$

$$S_m = 21,38 \text{ cm}^2$$

O próximo passo é o cálculo da seção geométrica do núcleo (S_g), que é o produto da largura (a) da coluna central do transformador, pelo comprimento (b) do pacote laminado. Esta grandeza é igual a seção magnética do núcleo acrescida de 10%, para compensar a espessura do material isolante entre uma lâmina e outra.

$$S_g = a \cdot b = 1,1 \cdot S_m$$

$$S_g = 23,51 \text{ cm}^2$$

Para as lâminas escolhidas tem-se:

$$a = 4 \text{ cm}$$

$$b = \frac{S_g}{a} \cong 6 \text{ cm}$$

Portanto o pacote deve ter comprimento igual ou superior a 6 cm para garantir o fluxo necessário para o acoplamento magnético. Na Tabela 7 tem-se o quadro resumo dos valores.

Tabela 7- Resumo das Lâminas Escolhidas

a	4 cm
b	6 cm
S_m	$21,38 \text{ cm}^2$
S_g	24 cm^2

Fonte: Produção do próprio autor

5.3.2.3. Cálculo do Número de Espiras

Para o cálculo do número de espiras adotou-se indução máxima nas lâminas (B_M) igual a 11.300 Gauss, valor comumente utilizado para lâminas de ferro silício.

$$N_{p1} = N_{p2} = \frac{Vp1_{ef} \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f} = \frac{10 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 11300 \cdot 25,9 \cdot 60}$$

$$N_{p1} = N_{p2} = 13 \text{ espiras}$$

Onde:

N_{p1}, N_{p2} - Número de espiras dos primários

$$N_{sec} = \frac{Vsec_{ef} \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f} = \frac{220 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 11300 \cdot 25,9 \cdot 60}$$

$$N_{sec} = 283 \text{ espiras}$$

Onde:

N_{sec} - Número de espiras do secundário

$$N_{aux1} = N_{aux2} = \frac{Vaux1 \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f} = \frac{60 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 11300 \cdot 25,9 \cdot 60}$$

$$N_{aux1} = N_{aux2} = 77 \text{ espiras}$$

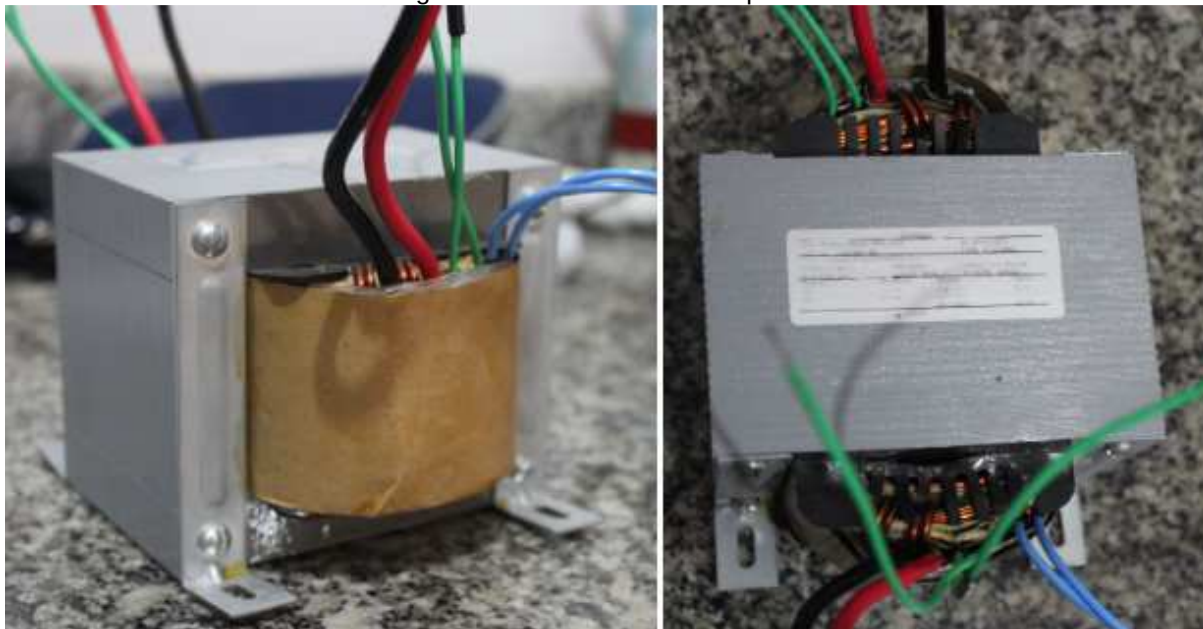
Onde:

N_{aux1}, N_{aux2} - Número de espiras dos enrolamentos auxiliares

Tendo concluído o projeto do transformador, foram feitos orçamentos com diferentes fabricantes, bem como estimado custos para a montagem do mesmo. Devido à baixa diferença de preço entre ambos, optou-se pela compra. Na Figura 22

e na Tabela 8 tem-se uma imagem do transformador adquirido e seus aspectos construtivos fornecidos pelo fabricante, respectivamente.

Figura 22- Transformador Adquirido



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 8- Aspectos Construtivos do Transformador

a	b	S_m	S_g	Primários			Secundário			Auxiliares		
				AWG	V_{ef}	I_{ef}	AWG	V_{ef}	I_{ef}	AWG	V_{ef}	I_{ef}
[cm]	[cm]	[cm ²]	[cm ²]		[V]	[A]		[V]	[A]		[V]	[A]
3,8	7,5	25,9	28,5	10 + 11	10	30	19	220	2	22	60	0,5

Fonte: Produção do próprio autor

Como se pode notar há pouca diferença construtiva entre o transformador projetado e o comprado, validando o projeto realizado.

5.3.3. Parâmetros do Transformador

Para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente do transformador utilizou-se a metodologia apresentada no Apêndice A.

Foi considerado o lado de alta tensão (220 V) como sendo o primário e o lado de baixa tensão (10 V) como secundário. Para o ensaio de curto-circuito desprezou-se os enrolamentos auxiliares, pois a potência processada por estes enrolamentos é

muito baixa em comparação com a potência do transformador e foi colocado em curto-circuito apenas um enrolamento de 10 V, pois no conversor eles funcionam alternadamente. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9- Parâmetros do Transformador

$R_C = 3,213 \text{ k}\Omega$	<i>Resistência de perdas no núcleo</i>
$L_{mag} = 2,245 \text{ H}$	<i>Indutância de magnetização</i>
$R_{p1_{perdas}} = R_{p2_{perdas}} = 6,85 \text{ m}\Omega$	<i>Resistência de perdas no cobre dos enrolamentos primários</i>
$R_{sec_{perdas}} = 3,316 \Omega$	<i>Resistência de perdas no cobre do enrolamento secundário</i>
$L_{p1_{dispersão}} = L_{p2_{dispersão}} = 6,22 \text{ }\mu\text{H}$	<i>Indutância de dispersão dos enrolamentos primários</i>
$L_{sec_{dispersão}} = 3,011 \text{ mH}$	<i>Indutância de dispersão do enrolamento secundário</i>

Fonte: Produção do próprio autor

5.4. PROJETO DO CIRCUITOSNUBBER

A indutância de dispersão do transformador push-pull torna necessária a utilização de um circuito *snubber* para evitar uma sobretensão sobre os interruptores no momento de sua abertura. Será feita aqui a definição dos componentes que formarão esta proteção.

Inicialmente o projeto foi feito utilizando a metodologia para *snubber* RCD proposta em (TODD, 1993). A fim de comprovar o método foram feitas simulações considerando os parâmetros do transformador obtidos no item 5.3.3, porém a metodologia não se mostrou válida, possivelmente, pelo fato da tensão nos interruptores não ser constante quando bloqueados. Então o ajuste do resistor ($R_{snubber}$) e do capacitor ($C_{snubber}$) foi feito baseado em simulações considerando modelos reais dos semicondutores e as dispersões do transformador. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 10:

Tabela 10- Parâmetros do Circuito *Snubber*

	$R_{snubber}$	$C_{snubber}$	$D_{snubber}$
Valor	3 Ω	220 μ F	—
Corrente eficaz [A]	1,7	3,8	3,5
Potência dissipada [W]*	8,7	5,81	0,8

* Considerando corrente máxima (39 A) na entrada

Fonte: Produção do próprio autor

O diodo escolhido foi o **MR754** da **ON Semiconductor®** por atender às especificações e disponibilidade no laboratório.

O capacitor escolhido foi o **B43504-A9227-M** de 220 μ F da **EPCOS®**, com RSE igual a 0,4 Ω . Considerando a corrente eficaz para o caso de máxima potência dos painéis solares, foi obtido segundo *datasheet* do componente:

$$I_{AC,max} = 3,02 \text{ A @100 Hz e } 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

A corrente eficaz que circula pelo capacitor é mostrada na Tabela 10, logo o fator de utilização é calculado como:

$$\frac{I_{AC,max}}{I_{AC,R}} = \frac{3,02}{3,8} = 1,25$$

A partir do gráfico da vida útil do capacitor em horas pelo fator de utilização do capacitor e considerando temperatura ambiente de 60 sua vida útil foi obtida como sendo de 100.000h. Como o conversor só opera no período diurno (apenas 12 horas por dia), o tempo de vida útil torna-se de 200.000h, que equivale aproximadamente a 23 anos.

Foi inserida em paralelo com o capacitor eletrolítico uma capacitância de 2,2 μ F de polipropileno para absorver os picos de corrente no instante da comutação, reduzindo assim a corrente eficaz que circula pelo capacitor eletrolítico.

Para o resistor foram utilizados cinco resistores de 15 Ω e 5 W em paralelo.

5.5. PERDAS NOS COMPONENTES

Para o cálculo das perdas nos componentes foi considerado corrente de entrada sem ondulação e o conversor operando com sua máxima potência, ou seja, $I_{in} = 39 \text{ A}$.

5.5.1. Perdas nos Interruptores

A potência dissipada em cada interruptor divide-se em perdas por condução e por comutação. Para o cálculo das perdas por condução considerou-se na junção temperatura igual a 110°C , o que determina acréscimo de 50% na $R_{DS(on)}$ fornecida em catálogo para temperatura de 20°C .

$$Pm1_{cond} = Pm2_{cond} = 1,5 \cdot R_{DS(on)} \cdot I_{S1_{ef}}^2 = 1,5 \cdot 0,014 \cdot 27,57^2$$

$$Pm1_{cond} = Pm2_{cond} = 15,97 \text{ W}$$

Onde:

$Pm1_{cond}, Pm2_{cond}$ - Perdas por condução em cada interruptor

A perda por comutação em cada interruptor é dada por:

$$P_{com} = V_{com} \cdot I_{com} \cdot f_s \cdot (T_r + T_f) \quad (5.12)$$

Onde:

V_{com} - Tensão no interruptor no instante da comutação

$I_{com} = 39 \text{ A}$ - Corrente no interruptor no instante da comutação

T_r - Tempo de subida da corrente no interruptor

T_f - Tempo de descida da corrente no interruptor

Como a comutação é lenta, pois a tensão no *gate* dos interruptores acompanha a envoltória senoidal do enrolamento auxiliar até ser grampeada pelo zener, T_r , T_f e V_{com} foram obtidos por simulação:

$$V_{com} = 2,20 \text{ V}$$

$$T_r = 140 \mu\text{s}$$

$$T_f = 100 \mu s$$

Substituindo na equação (5.12):

$$P_{com} = 2,20 \cdot 39 \cdot 60 \cdot (140\mu + 100\mu) = 1,24 \text{ W}$$

A perda total nos interruptores é:

$$\begin{aligned} P_{interruptores} &= 2 \cdot P_{m1_{cond}} + 2 \cdot P_{com} = 2 \cdot 15,97 + 2 \cdot 1,24 \\ P_{interruptores} &= 34,42 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Considerando que os dois interruptores dividirão o mesmo dissipador, temperatura na junção igual a 110°C, uma temperatura ambiente de 45°C e uma resistência térmica cápsula-dissipador (R_{CD}) de 0,5 °C/W tem-se:

$$\begin{aligned} T_d &= T_j - \frac{P_{interruptores}}{2} \cdot (R_{jc} + R_{cd}) = 110 - \frac{34,42}{2} \cdot (1,15 + 0,5) \\ T_d &= 81,61 \text{ °C} \end{aligned}$$

Onde:

T_d —Temperatura no dissipador

A resistência térmica do dissipador (R_{da}) é dada por:

$$\begin{aligned} R_{da} &= \frac{T_d - T_a}{P_{interruptores}} = \frac{81,61 - 45}{34,42} \\ R_{da} &= 1,06 \text{ °C/W} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Na Figura 23 tem-se o dissipador escolhido. Sua resistência térmica, segundo catálogo do fabricante **HS Dissipadores®**, é igual a 0,99 °C/W.

Figura 23- Dissipador dos Mosfet's



Fonte: Produção do próprio autor

5.5.2. Perdas no Transformador

As perdas no transformador estão concentradas nos enrolamentos (efeito joule) e no núcleo (correntes parasitas e histerese) (MARTIGNONI, 1973).

A perda núcleo do transformador foi obtida no ensaio de circuito aberto considerando que toda a potência consumida pelo transformador é dissipada por correntes parasitas e histerese no núcleo.

$$P_{n\acute{u}cleo} = 15,2 \text{ W}$$

Onde:

$P_{n\acute{u}cleo}$ - Potência dissipada no núcleo

A perda por efeito joule nos enrolamentos foi obtida a partir da Tabela 9 e das equações (5.4) e (5.5) como sendo:

$$P_{p1} = P_{p2} = R_{p1_{perdas}} \cdot I_{p1_{ef}}^2 = 0,00685 \cdot 27,57^2$$

$$P_{p1} = P_{p2} = 5,21 \text{ W}$$

$$P_{sec} = R_{sec_{perdas}} \cdot I_{sec_{ef}}^2 = 3,316 \cdot 1,77^2$$

$$P_{sec} = 10,4 \text{ W}$$

Onde:

P_{p1}, P_{p2} – Potência dissipada nos enrolamentos primários

P_{sec} - Potência dissipada no enrolamento secundário

Desconsiderando as perdas por efeito joule nos enrolamentos auxiliares, a potência total dissipada no transformador (P_{trafo}) é calculada por:

$$\begin{aligned} P_{trafo} &= 2 \cdot P_{p1} + P_{sec} + P_{núcleo} = 2 \cdot 5,21 + 10,4 + 15,2 \\ P_{trafo} &= 36 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Portanto calcula-se a eficiência do transformador (η_{trafo}) como sendo:

$$\begin{aligned} \eta_{trafo} &= \frac{S_{sec}}{S_{sec} + P_{trafo}} \cdot 100\% = \frac{390}{390 + 36} \cdot 100\% \\ \eta_{trafo} &= 91,55\% \end{aligned}$$

5.5.3. Perdas nos Circuitos *Snubbers*

As perdas nos circuitos *snubbers* variam com a corrente de entrada. Com os painéis fotovoltaicos operando com máxima potência as perdas no circuito *snubber* de um dos interruptores encontram-se na Tabela 10. As perdas totais são:

$$\begin{aligned} P_{Snubber's} &= 2 \cdot P_{r_{snubber}} + 2 \cdot P_{c_{snubber}} + 2 \cdot P_{d_{snubber}} \\ P_{Snubber's} &= 2 \cdot 8,7 + 2 \cdot 5,81 + 2 \cdot 0,8 \\ P_{Snubber's} &= 30,62 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.16)$$

5.5.4. Perdas nos Circuitos de Comando

No circuito de comando as perdas estão no resistor de gatilho e nos diodos zener. Desprezando a corrente drenada pela capacitância do *mosfet*, a corrente que circula pelos resistores e pelos zeners é dada por:

$$I_{gate1_{md}} = \frac{1}{T_s} \cdot \left[\int_0^{T_s/2} \frac{\sqrt{2} \cdot 60 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) - 15}{2200} dt + \int_{T_s/2}^{T_s} \frac{\sqrt{2} \cdot 60 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) - (-8,2)}{2200} dt \right]$$

$$I_{gate1_{md}} = I_{gate2_{md}} = -1,54 \text{ mA}$$

$$I_{gate1_{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \left[\int_0^{T_s/2} \left(\frac{\sqrt{2} \cdot 60 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) - 15}{2200} \right)^2 dt + \int_{T_s/2}^{T_s} \left(\frac{\sqrt{2} \cdot 60 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) - (-8,2)}{2200} \right)^2 dt \right]}$$

$$I_{gate1_{ef}} = I_{gate2_{ef}} = 22,58 \text{ mA}$$

Onde:

$I_{gate1_{md}}, I_{gate2_{md}}$ - Corrente média nos circuitos de gatilho

$I_{gate1_{ef}}, I_{gate2_{ef}}$ - Corrente eficaz nos circuitos de gatilho

Logo as perdas são dadas por:

$$\begin{aligned} P_{Rgate1} &= P_{Rgate2} = R_{gate1} \cdot I_{gate1_{ef}}^2 = 2200 \cdot (22,58m)^2 \\ P_{Rgate1} &= P_{Rgate2} = 1,12 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} P_{zener15} &= V_Z \cdot |I_{gate1_{md}}| + R_Z \cdot I_{gate1_{ef}}^2 = 15 \cdot 0,00154 + 14 \cdot 0,02258^2 \\ P_{zener15} &= 30,2m \text{ W} \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} P_{zener8,2} &= V_Z \cdot |I_{gate1_{md}}| + R_Z \cdot I_{gate1_{ef}}^2 = 8,2 \cdot 0,00154 + 4,5 \cdot 0,02258^2 \\ P_{zener8,2} &= 15m \text{ W} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Onde:

P_{Rgate1}, P_{Rgate2} - Potência dissipada nos resistores de gatilho

V_Z - Tensão zener (Tabela 3)

R_Z - Resistência zener (Tabela 3)

$P_{zener15}$ - Potência dissipada nos zeners de 15 V

$P_{zener8,2}$ - Potência dissipada nos zeners de 8,2 V

Portanto, as perdas totais nos circuitos de comando ($P_{comandos}$) são:

$$\begin{aligned} P_{comandos} &= 2 \cdot P_{Rgate1} + 2 \cdot P_{zener15} + 2 \cdot P_{zener8,2} = 2 \cdot 1,12 + 2 \cdot 30,2m + 2 \cdot 15m \\ P_{comandos} &= 2,33 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Por fim, através das equações (5.13), (5.15), (5.16), (5.20), calcula-se as perdas totais no conversor:

$$P_{total} = P_{interruptores} + P_{trafo} + P_{snubbers} + P_{comandos} = 34,42 + 36 + 30,62 + 2,33$$

$$P_{total} = 103,37 \text{ W} \quad (5.21)$$

Na Figura 24 as perdas estão representadas em um gráfico de pizza, através do qual nota-se que as maiores perdas encontram-se no transformador.

Figura 24 - Gráfico de Pizza das Perdas no Conversor



Fonte: Produção do próprio auto

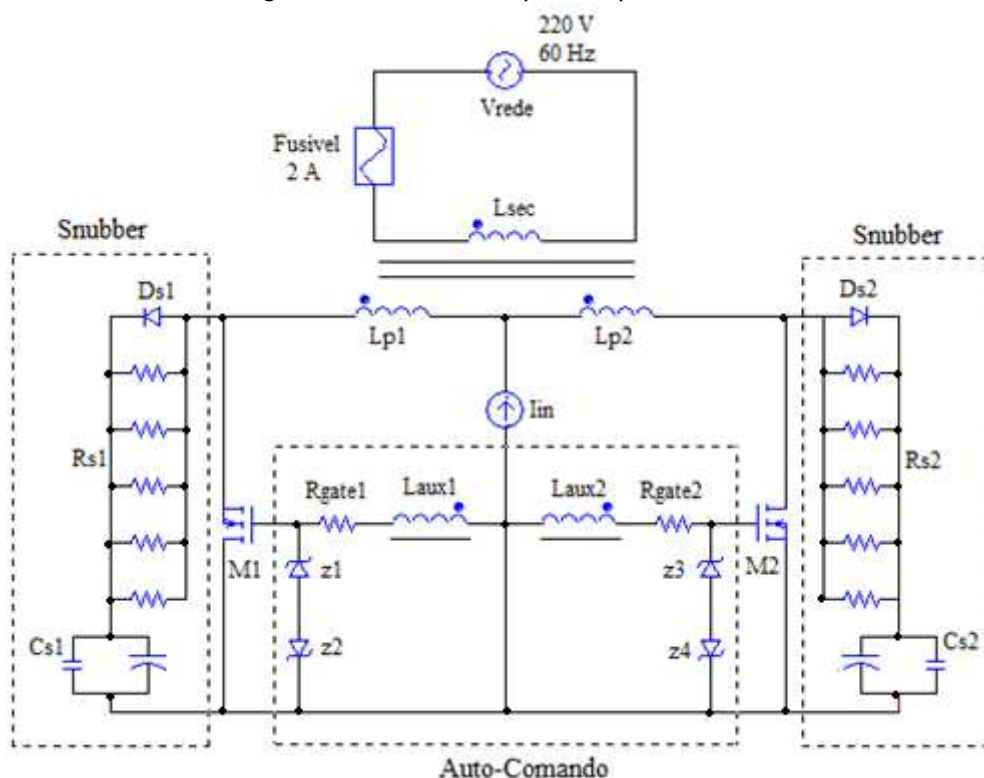
As perdas nos interruptores podem ser facilmente reduzidas substituindo o interruptor utilizado por interruptores com menor resistência de condução. Os *snubbers* apresentam perdas elevadas pelo fato do conversor ter característica de entrada em corrente e o circuito de comando apresentar um pequeno “tempo morto” durante a comutação, conforme Figura 17, gerando perdas adicionais às causadas pela indutância de dispersão do transformador.

6. ANÁLISE EXPERIMENTAL E POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para verificação dos estudos teóricos efetuados, foram realizadas diversas simulações numéricas do conversor com o auxílio do *software Orcad PSpice 16.3*. Os parâmetros utilizados nas simulações foram os mesmos definidos no projeto apresentado anteriormente, sendo considerados os parâmetros do transformador obtidos no item 5.3.3 e utilizados modelos completos dos interruptores fornecidos pelo fabricante, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos.

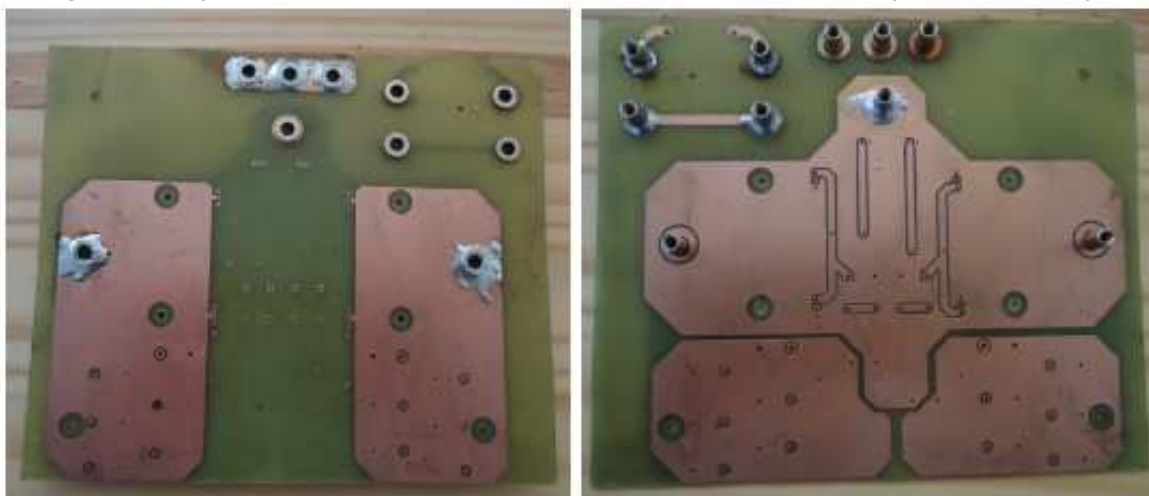
Após o desenvolvimento do projeto e análise detalhada do conversor por simulação numérica, efetuou-se no nPEE da UDESC a construção de um protótipo com o intuito de validar experimentalmente o estudo realizado. O circuito completo utilizado nas simulações e implementado pode ser visto na Figura 25. A placa do conversor foi projetada com as mesmas dimensões do dissipador. Nas Figuras 26 e 27 tem-se o layout do conversor prototipado e imagem do protótipo implementado, respectivamente. Percebe-se a posição dos resistores e dos diodos dos circuitos snubbers de forma a dissipar o calor no próprio cobre da placa.

Figura 25- Circuito Completo Implementado



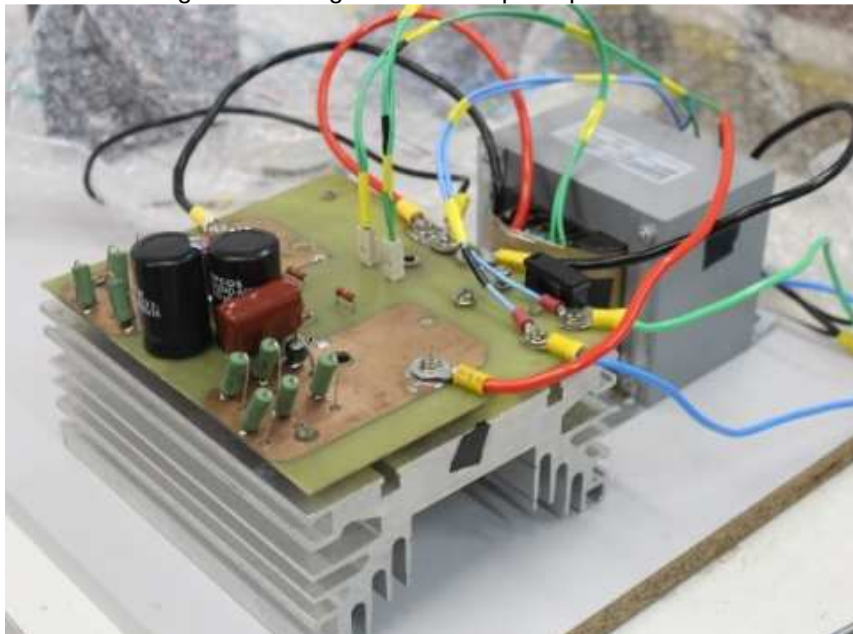
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 26- Layout da Placa do Conversor - à direita, Parte Inferior; à esquerda, Parte Superior



Fonte: Produção do próprio autor

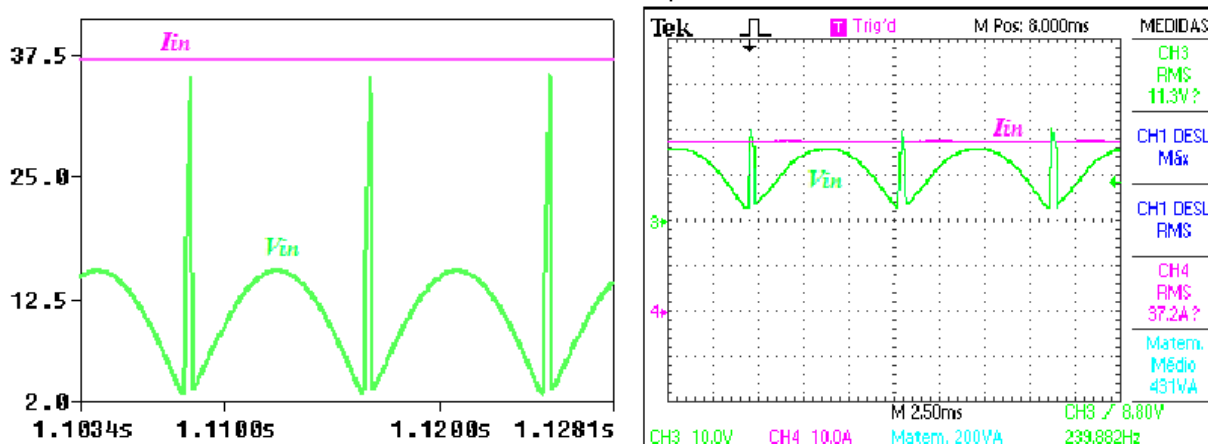
Figura 27- Imagem do Protótipo Implementado



Fonte: Produção do próprio autor

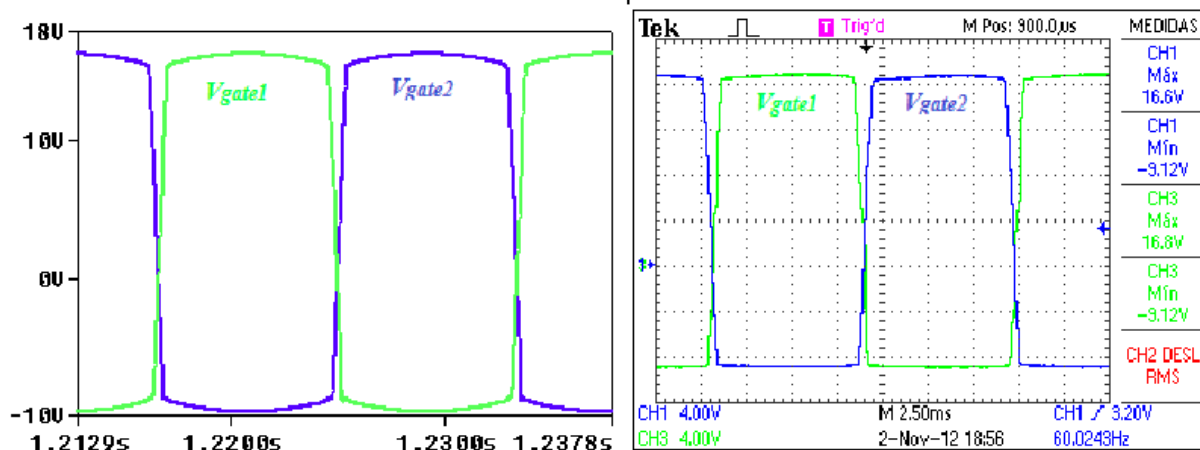
A seguir podem ser vistos os resultados obtidos por simulação e experimentalmente com o auxílio de um osciloscópio digital. Os resultados foram obtidos com corrente de entrada sem ondulação e igual a 37 A, pois foi o máximo que conseguiu-se obter com os equipamentos disponíveis no laboratório.

Figura 28 - Tensão e Corrente na Entrada do Conversor – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental



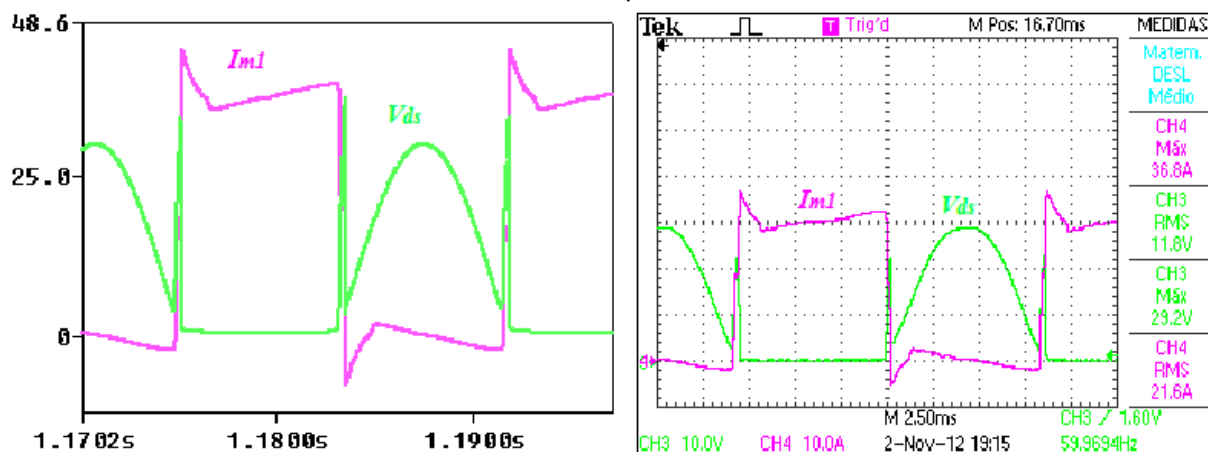
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 29 - Tensão nos Gatilhos dos Interruptores – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental



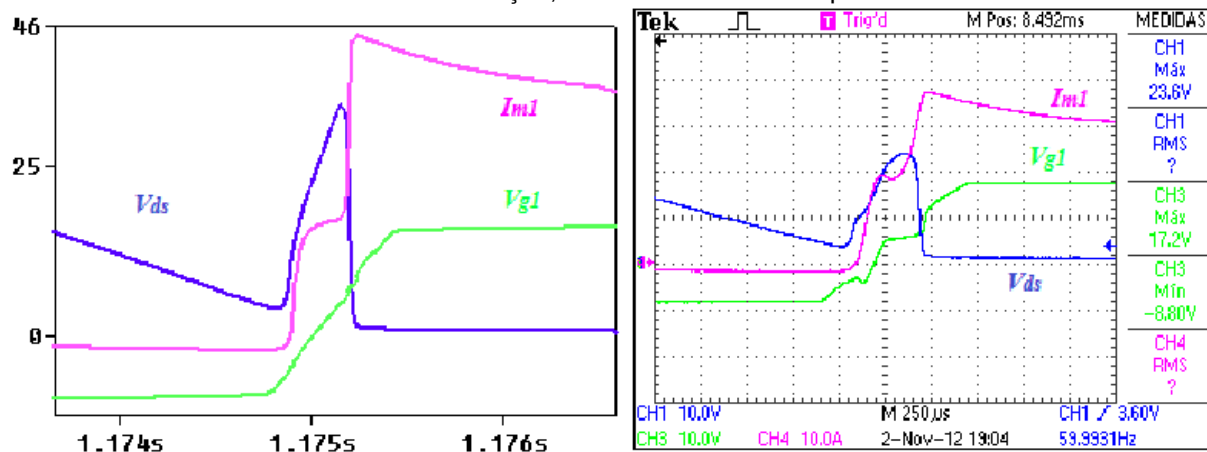
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 30 - Tensão e Corrente nos Interruptores – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental



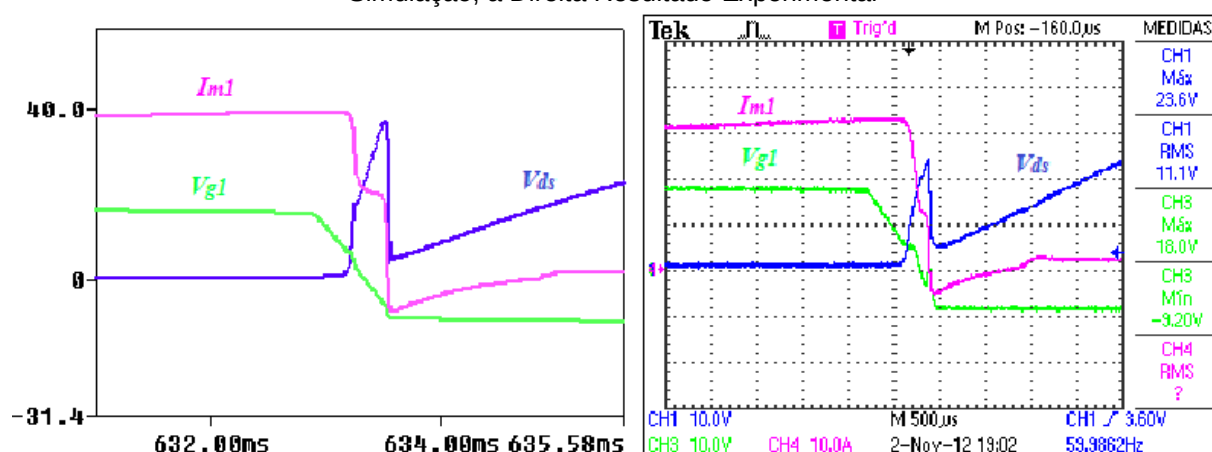
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 31 - Tensão e Corrente nos Interruptores (Detalhe da Entrada em Condução) – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental



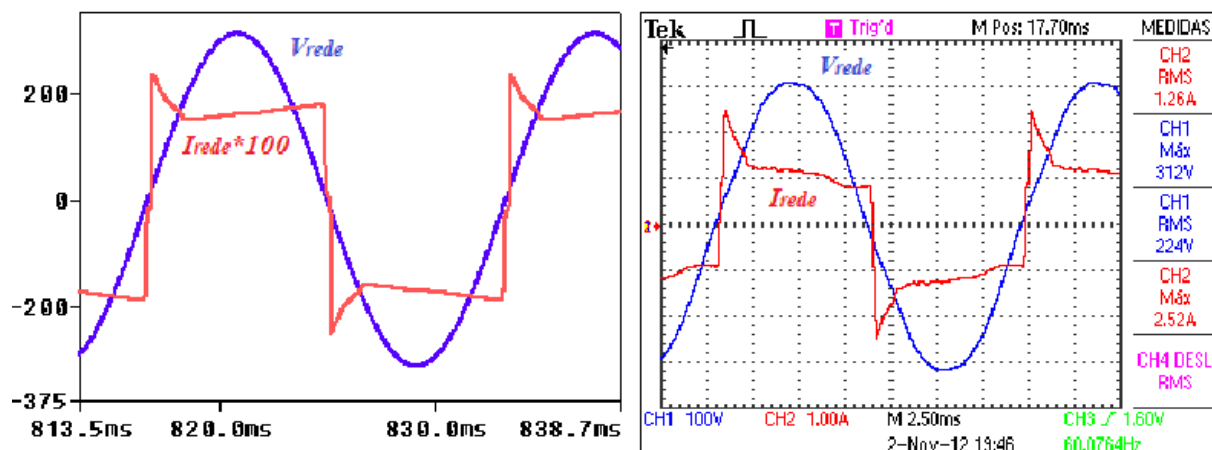
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 32 - Tensão e Corrente nos Interruptores (Detalhe do Bloqueio) – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental



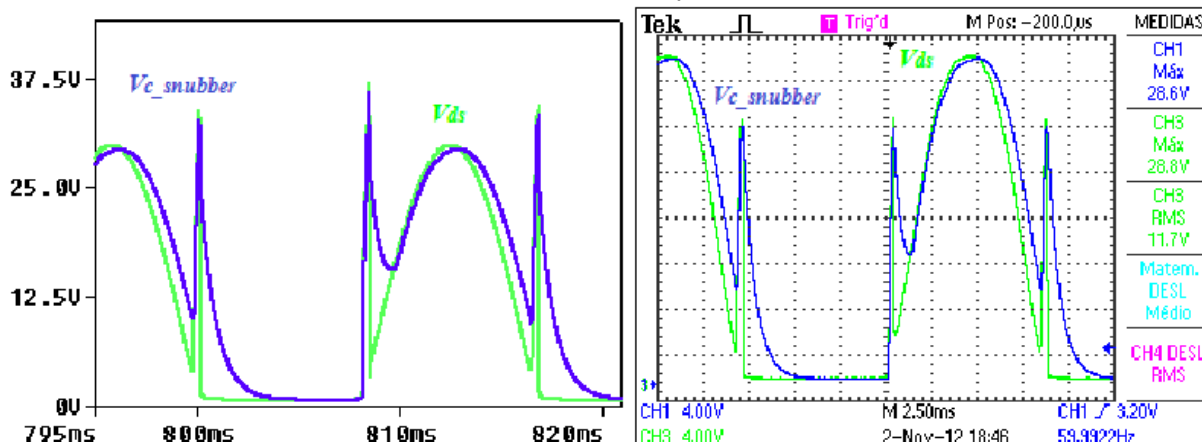
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 33 - Tensão e Corrente na Rede (Secundário do Trafo) – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 34 - Tensão no interruptor e no Capacitor do Snubber – à Esquerda Resultado de Simulação; à Direita Resultado Experimental



Fonte: Produção do próprio autor

Como pode-se observar, foram encontradas poucas divergências entre os resultados obtidos por simulação numérica e os experimentais, os quais mostraram-se muito satisfatórios. A comutação dos interruptores também foi satisfatória, concluindo-se que o circuito de comando autônomo proposto adapta-se bem ao conversor. Apesar da potência dissipada nos circuitos *snubbers*, não ocorreram sobretensões nos semicondutores, o que poderia colocar em risco alguns componentes. A diferença observada entre resultado experimental e de simulação do pico de tensão no interruptor (Figura 28) se deve, possivelmente, pela pequena diferença entre a indutância de dispersão real do transformador e a obtida nos ensaios de curto-circuito, pois o valor obtido não é exato e também pela indutância parasita existente no Layout do protótipo desenvolvido.

6.1. RENDIMENTO DO CONVERSOR

Após a análise do funcionamento do conversor, foram feitas medições através do **wattímetro WT230** com o objetivo de calcular seu rendimento e comparar com os cálculos e simulações. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 11, na qual o rendimento teórico foi obtido através dos cálculos desenvolvidos no Capítulo 5 para diferentes correntes de entrada.

Tabela 11- Resultados Experimentais Obtidos

I_{in} [A]	<i>Temperaturas</i> [°C]				<i>Potências</i> [W]		<i>F.P</i> <i>Rede</i>	% <i>Exp.</i>	% <i>Teórico</i>
	<i>Dissipador</i>	<i>Trafo</i>	<i>Rsnubber</i>	<i>Csnubber</i>	P_{in}	P_{out}			
16	28,6	55	50	45	175	126	0,93	72,0	77,1
20	33	54	51	47	212	153	0,91	72,2	77,7
25	31,4	60,6	68	49,5	288	209	0,90	72,6	77,1
30	36	64,2	76	51,8	323	243	0,86	75,2	76,1
37	37	68,4	82	53,6	430	303	0,87	70,5	73,7

Fonte: Produção do próprio autor

Como pode-se observar, os resultados obtidos experimentalmente para o rendimento do conversor foram parecidos com os valores teóricos obtidos, sendo que a diferença imagina-se ser pelas perdas no cabeamento e nas conexões, as quais não foram previamente adicionadas nos cálculos. Observa-se também que não houve superaquecimento em nenhum componente do conversor, sendo que as temperaturas foram medidas com temperatura ambiente de 25°C e após duas horas de testes, o que garante o estabelecimento do regime térmico.

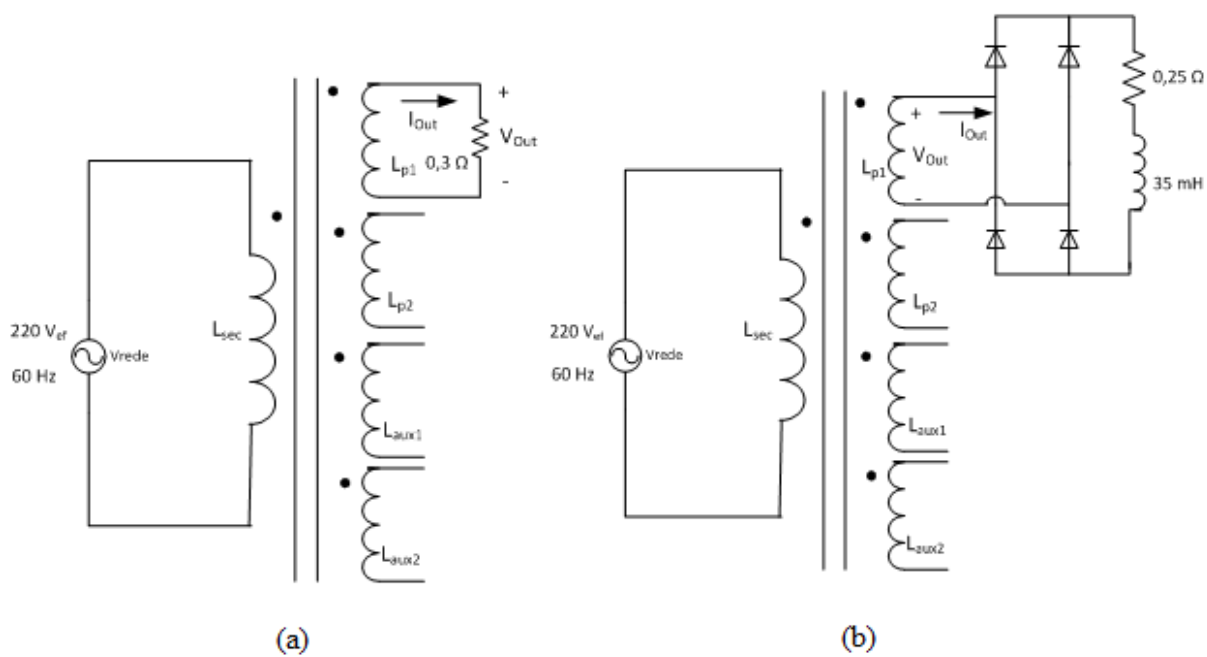
Experimentalmente foram feitos dois testes diferentes para obter a eficiência do transformador: o primeiro com carga R e potência nominal em um dos enrolamentos primários, conforme Figura 35(a); o segundo com retificador ponte-completa, carga RL e potência também nominal, conforme Figura 35(b). Objetivando a percepção de possíveis discrepâncias nos testes devido ao fato de no segundo teste a corrente que circula nos enrolamentos ter o formato quadrado, mediu-se em ambos a potência de entrada e saída nos pontos indicados na figura com o auxílio de um **wattímetro WT230 da Yokogawa®**. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 12, através da qual percebe-se que não houve divergências no rendimento do transformador, concluindo-se que não ocorre uma diminuição da eficiência do transformador, e do conversor como um todo, o fato da forma de onda da corrente no transformador ser quadrada.

Tabela 12 – Resultados Obtidos Experimentalmente para o Rendimento do Trafo

	P_{in}	$F.P_{in}$	P_{out}	$F.P_{out}$	%
Teste carga R	276	0,98	246	0,99	89,1
Teste carga RL	267	0,89	238	0,90	89,1

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 35 - Circuitos Utilizados nos Testes de Rendimento do Trafo



Fonte: Produção do próprio autor

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um breve estudo sobre a energia solar fotovoltaica no Brasil que, por sua vez, merece grande destaque, tendo em vista o vasto potencial que o País tem. Foram feitas, também, comparações com outras fontes de energia e destacados alguns projetos que estão sendo realizados, concluindo-se que esta fonte de energia tem um futuro promissor no País.

Após feito um estudo sobre o funcionamento dos painéis solares fotovoltaicos e comparadas algumas topologias de conversores cc-ca para a adequação da tensão por eles gerada com a rede elétrica, foi proposto um conversor cc-ca *push-pull* levando em conta a simplicidade, robustez, baixa manutenção, baixo custo e desempenho adequado.

O conversor proposto possui comando autônomo em baixa frequência, o que facilita o projeto de elementos magnéticos, não produz EMI e dispensa o uso de circuitos integrados, tornando-o simples e robusto.

Também foi realizado um estudo sobre transformadores abrangendo o princípio básico de funcionamento e suas principais equações. Primeiramente foi considerado o modelo ideal onde as perdas em elementos parasitas são ignoradas e, por fim, um modelo mais completo que leva em conta as principais não idealidades presentes no transformador. Ainda, foi abordado o projeto do transformador a ser utilizado no conversor e aplicados os ensaios no transformador adquirido para obtenção dos principais parâmetros do circuito equivalente.

Após apresentado o equacionamento completo do conversor, um protótipo de laboratório foi implementado e testado, obtendo-se resultados muito satisfatórios que comprovam os estudos teóricos realizados.

Devido ao tempo não ter sido hábil o suficiente, não foi possível a implementação do conversor cc-cc (Figura 1) para trabalhar junto com o cc-ca.

7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A Figura 24 apresentou as perdas no conversor em um gráfico de pizza, através do qual percebe-se maior potência dissipada no transformador e nos interruptores.

De forma a minimizar as perdas e aumentar o rendimento do conversor, sugere-se a inserção de interruptores em paralelo, reduzindo as perdas por condução nos *mosfets*. De forma a comprovar matematicamente o aumento na eficiência do conversor, foram feitos cálculos de perdas considerando dois *mosfets* idênticos em paralelo para cada interruptor e obteve-se um rendimento de aproximadamente 78,0%, considerando corrente de entrada igual a 37 A e que cada interruptor conduz metade da corrente total no braço do conversor. Portanto, observa-se um incremento de 4,3% no rendimento total do inversor.

Objetivando resultados ainda melhores, propõe-se a substituição do *mosfet* **IRFZ48N** por interruptores com menor resistência interna de condução ($R_{DS(ON)}$), como o **IRFS3207**, o que possibilitaria um rendimento próximo a 80% e reduziria o volume do dissipador, compensando o aumento do custo devido à substituição do interruptor.

Ainda, como não houve sobretensão nos interruptores na comutação (Figura 28) é possível melhorar o rendimento do conversor simplesmente readaptando os circuitos de snubbers de forma a aumentar o pico de tensão no interruptor no chaveamento, o que reduz a potência total dissipada no snubber e aumenta rendimento do conversor.

REFERÊNCIAS

AMÉRICA DO SOL. Aeroportos Solares. **América do Sol**, 2012. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/aeroporto-solares/>>. Acesso em: 22 Novembro 2012.

AMÉRICA DO SOL. Estádios Solares. **América do Sol**, 2012. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/estadios-solares/>>. Acesso em: 23 Novembro 2012.

AMÉRICA DO SOL. Potencial Brasileiro. **América do Sol**. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/potencial-brasileiro/>>. Acesso em: 16 Outubro 2012.

ANEEL. **ANEEL aprova regras para facilitar a geração de energia elétrica nas unidades consumidoras**, 17 abril 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=5457&id_area=90>. Acesso em: 24 abril 2012.

BARBI, I. **Eletrônica de Potência**. 6ª. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.

BARBI, I.; MARTINS, D. C. **Introução ao Estudo dos Conversores cc-ca**. Edição dos Autores. ed. Florianópolis: [s.n.], 2005.

BRAGA, L. Eike Batista Começa a Produzir Energia Solar. **Estadão**, 3 agosto 2011. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/negocios+energia,eike-batista-comeca-a-produzir-energia-solar,78695,0.htm>>. Acesso em: 12 junho 2012.

CASTRO, N. J. D.; PAES, K. E.; DANTAS, G. D. A. Perspectivas para a Geração Fotovoltaica no Brasil, Rio de Janeiro, p. 8, 2012. Disponível em: <http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/artigos/GESEL_fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 18 Outubro 2012.

DACOL, R. P. **Processamento Eletrônico de Energia Fotovoltaica**. UDESC. Joinville, p. 30. 2011. Publicação interna do nPEE.

ELETROSUL. SOL Megawatt Solar. **Eletrosul**, 2012. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/home/conteudo.php?cd=1150>>. Acesso em: 22 Novembro 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. **EBES**, 2012. Disponível em: <<http://www.ebes.com.br/web/post.php?id=3>>. Acesso em: 14 Outubro 2012.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. **Energia Solar: Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermoeletrica e Fotovoltaica**. Pernambuco: Editora Universitária da UFPE, 1995.

ITAIPU BINACIONAL. **Geração Itaipu Binacional**, 2012. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em: 15 Novembro 2012.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 1. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1973.

MARTINS, D. C.; COELHO, R. F.; SANTOS, W. M. D. **Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos: Revisão e Novas Propostas**. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência. Natal, p. 95. 2011. Mini-curso dado no XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP).

MEZARROBA, M. **Sistema de Bombeamento de Água com Energia Obtida de painéis Fotovoltaicos**. UFSC. Florianópolis, p. 134. 1998. Dissertação de Mestrado.

OLIVEIRA, J. C. D.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. D. **Transformadores Teorias e Ensaios**. Itajubá: Edgard Blucher Ltda, 1984.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar, São José dos Campos, p. 64, 2006. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>.

PRATI, L. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Gerado por Biodigestores**. UFPR. Curitiba, p. 83. 2010. Disponível em:< <http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/148.pdf> >. Trabalho de Conclusão de Curso.

REN21. **Renewables 2011 Global Status Report**. Paris, p. 116. 2011. Disponível em:< http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf >.

RUTHER, R. Potencial da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e Projetos Vitrine Estádios Solares, Florianópolis, p. 63, 2010. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/comissoes/cma/ap/ap20100316_ufsc_ruther.pdf>.

Acesso em: 22 junho 2012. Material do Senado e apresentado por Ricardo Rither.

RUTHER, R. Entrevista concedida à rádio CBN, 2011. Disponível em: <http://cbn.globoradio.globo.com/Player/player.htm?audio=2010%2Fnoticias%2Fruther_100405&OAS_sitepage=cbn/programas/jornaldacbn>. Acesso em: 12 Outubro 2012.

STEIN, F. G. **Conversão de Energia Solar Fotovoltaica com Rastreamento de Máxima Potência Aplicado ao Conversor Boost**. UDESC. Joinville, p. 78. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso.

STIVARI, S. M. S. et al. Patterns of Local Circulation in the Itaipu Lake Area: Numerical Simulations of Lake Breeze. **Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**, São Paulo, 12 Janeiro 2003. 37-50.

TODD, P. C. **Snubber Circuits: Theory, Design and Application**. [S.l.]: [s.n.], 1993. Artigo.

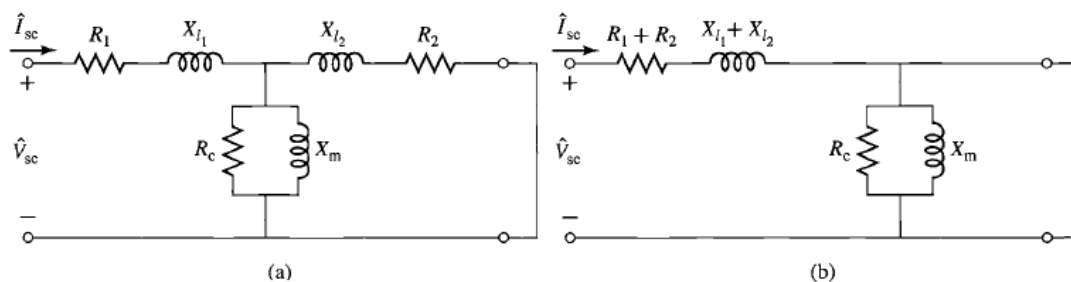
APÊNDICE A

Neste apêndice é apresentada uma metodologia para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente do transformador, consistindo basicamente em medir tensão e corrente no primário do transformador com o secundário em curto-circuito e com o secundário em circuito aberto. É proposto também um ensaio com carga nominal para avaliar o desempenho do transformador nestas condições e obter sua eficiência.

A.1 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

O ensaio de curto-circuito é utilizado para encontrar as resistências elétricas dos enrolamentos bem como a indutância de dispersão do transformador. Neste ensaio o secundário é colocado em curto-circuito e são medidas as formas de onda da tensão e da corrente no primário. Porém, estando o secundário em curto e aplicando a tensão nominal no primário, a corrente que circula é muito maior do que a corrente nominal do transformador. Assim, a tensão necessária para circulação das correntes nominais apresenta valores de aproximadamente 20% da tensão nominal (OLIVEIRA, COGO e ABREU, 1984). A Figura 36 mostra o circuito equivalente para ensaio de curto-circuito com as impedâncias do secundário refletidas ao primário.

Figura 36 - Circuito Equivalente com o Secundário em Curto-Circuito. (a) Modelo T. (b) Modelo L



Fonte: (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006)

A impedância de curto-circuito Z_{sc} vista pelo primário é:

$$Z_{sc} = R_1 + jX_{L_1} + \frac{(R_C || jX_m) \cdot (R_2 + jX_{L_2})}{(R_C || jX_m) + R_2 + jX_{L_2}} \quad (A.1)$$

Como a impedância do ramo de excitação é muito maior do que a impedância de dispersão do secundário (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006) (OLIVEIRA, COGO e ABREU, 1984), a equação (A.1) pode ser aproximada por:

$$Z_{sc} = R_1 + R_2 + j \cdot (X_{L_1} + X_{L_2}) \quad (A.2)$$

Esta aproximação leva ao circuito equivalente L, mostrado na Figura 36(b). Então, através do valor médio do produto (ponto a ponto) da tensão ($\hat{V}_{sc}$) pela corrente ($\hat{I}_{sc}$) obtém-se a potência ativa de entrada (P_{sc}) e, através dos valores eficazes de corrente (I_{sc}) e tensão (V_{sc}), os parâmetros desejados podem ser obtidos.

A.1.1 Resistência de Perdas no Cobre Refletida ao Primário do Transformador

A resistência de perdas no cobre refletida ao primário do transformador ($R_1 + R_2$) é obtida considerando-se que toda a potência absorvida pelo transformador no ensaio de curto-circuito é consumida sob a forma de perdas ôhmicas na resistência dos enrolamentos, ou seja:

$$R_1 + R_2 = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (A.3)$$

Considera-se então 50% da resistência para cada enrolamento e divide-se pela relação de transformação para refletir novamente para o secundário.

A.1.2 Indutância de Dispersão dos Enrolamentos Refletida ao Primário do Transformador

Analisando o circuito da Figura 36(b) percebe-se que:

$$|Z_{sc}| = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (A.4)$$

Então, através das equações (A.2) e (A.4), a indutância de dispersão dos enrolamentos refletida ao primário do transformador ($L_1 + L_2$) é obtida como segue, onde f representa a frequência de excitação a qual, para este caso, é de 60Hz.

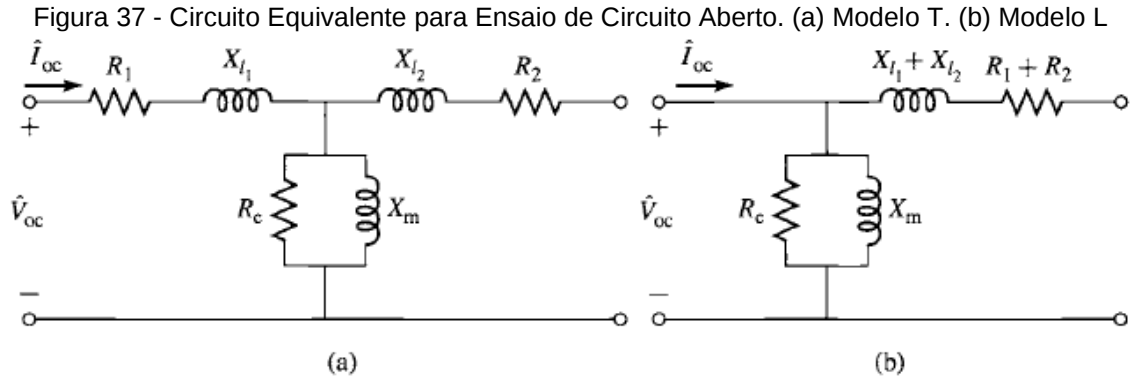
$$X_{L_1} + X_{L_2} = \sqrt{|Z_{sc}|^2 - (R_1 + R_2)^2} \quad (A.5)$$

$$L_1 + L_2 = \frac{X_{L_1} + X_{L_2}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (A.6)$$

Também considera 50% para cada enrolamento e reflete-se para o secundário através da relação de transformação.

A.2 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

O ensaio de circuito aberto é realizado com o secundário em aberto e a tensão nominal do transformador aplicada ao primário. Nessas condições uma corrente de excitação, menor que a corrente nominal, circula no primário. O circuito equivalente para este caso é mostrado na Figura 37.



Fonte: (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006)

A impedância vista pelo primário Z_{oc} para o circuito equivalente T é dada por:

$$Z_{oc} = R_1 + jX_{L1} + \frac{R_C \cdot (jX_m)}{R_C + jX_m} \quad (A.7)$$

Como a impedância do ramo de excitação é bem elevada, a queda de tensão na impedância de dispersão pode ser desprezada (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006) e a equação (A.7) pode ser reduzida a:

$$Z_{oc} = \frac{R_C \cdot (jX_m)}{R_C + jX_m} \quad (A.8)$$

A aproximação feita leva ao circuito equivalente modelo L, mostrado na Figura 37(b). Novamente, através do valor médio do produto (ponto a ponto) da tensão ($\hat{V}_{oc}$) pela corrente ($\hat{I}_{oc}$) obtém-se a potência ativa de entrada (P_{oc}) e, através dos valores eficazes de corrente (I_{oc}) e tensão (V_{oc}), os parâmetros desejados podem ser obtidos.

A.2.1 Resistência de Perdas no Núcleo do Transformador

A resistência de perdas no núcleo do transformador é obtida considerando que toda a potência consumida pelo transformador no ensaio de circuito aberto é dissipada por correntes parasitas e histerese no núcleo, ou seja:

$$R_C = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad (A.9)$$

A.2.2 Indutância de Magnetização do Transformador

Através da equação (A.8) descobre-se a reatância de magnetização do transformador (X_m), dada por:

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|Z_{oc}|}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_C}\right)^2}} \quad (A.10)$$

Em que:

$$|Z_{oc}| = \frac{V_{oc}}{I_{oc}} \quad (A.11)$$

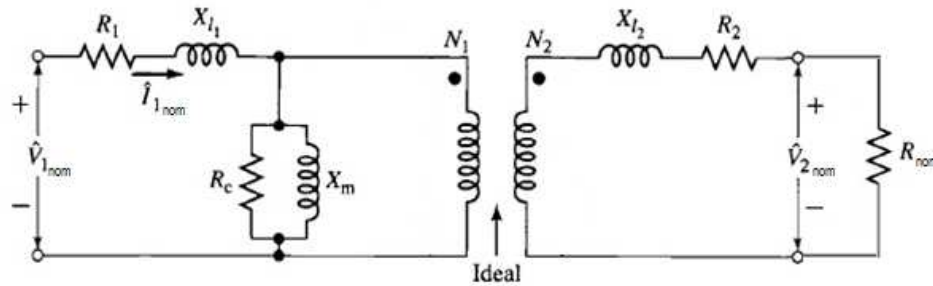
Finalmente, através da equação (A.10), a indutância de magnetização do transformador pode ser obtida:

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (A.12)$$

A.3 ENSAIO COM CARGA NOMINAL

O ensaio com carga nominal é realizado conectando a carga nominal do transformador no secundário e aplicando tensão nominal no primário. O circuito equivalente para este caso é mostrado na Figura 38 onde R_{nom} representa a resistência nominal do transformador.

Figura 38 - Circuito Equivalente para Ensaio com Carga Nominal



Fonte: Adaptado de (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006)

A.3.1 Eficiência de um Transformador

A eficiência de um transformador $\varepsilon\%$ é dada pela razão entre a potência de saída do(s) enrolamento(s) secundário(s) (P_{out}) e a potência de entrada no enrolamento do primário (P_{in}) com o transformador operando em carga nominal. Um transformador ideal tem 100% de eficiência porque ele libera toda a energia que recebe. Porém, devido às perdas no núcleo e no cobre, esse número na prática será menor do que 100%.

Equacionando tem-se:

$$\varepsilon\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (\text{A.13})$$

Onde as potências de entrada e de saída são aproximadas por:

$$P_{in} = V_{1nom} \cdot I_{1nom} \quad (\text{A.14})$$

$$P_{out} = \frac{V_{2nom}^2}{R_{nom}} \quad (\text{A.15})$$