

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

YURI MOISÉS SKROCH

**REGULADOR DE TENSÃO PARA AS MÁQUINAS SÍNCRONAS DOS
LABORATÓRIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS DO DEPARTAMENTO
ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2021

YURI MOISÉS SKROCH

**REGULADOR DE TENSÃO PARA AS MÁQUINAS SÍNCRONAS DOS
LABORATÓRIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS DO DEPARTAMENTO
ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA**

**VOLTAGE REGULATOR FOR SYNCHRONOUS MACHINES IN THE ELECTRICAL
MACHINE LABORATORIES OF THE ACADEMIC DEPARTMENT OF
ELECTROTECHNICS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Marcelo Barcik

CURITIBA
2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

YURI MOISÉS SKROCH

**REGULADOR DE TENSÃO PARA AS MÁQUINAS SÍNCRONAS DOS
LABORATÓRIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS DO DEPARTAMENTO
ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 08 de julho de 2021

Marcelo Barcik
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcio Aparecido Batista
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José da Silva Maia
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2021**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a memória de meu avô Waldomiro Ribas de Lima.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha irmã, pois sem eles não seria possível chegar até aqui.

À minhas filhas Jhenyfer e Yasmim que são a razão de tudo na minha vida.

A minha esposa Vanderléia que sempre esteve firme do meu lado me apoiando.

Ao meu orientador professor Marcelo Barcik que confiou e teve paciência.

Ao professor Alceu Badin pela ajuda na parte de eletrônica de potência.

RESUMO

SKROCH, M. Yuri. **Regulador de tensão para as máquinas síncronas dos laboratórios de máquinas elétricas do departamento acadêmico de eletrotécnica**. 2021. 077 f. TCC (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

Na universidade o aluno de Engenharia elétrica aprende vários conceitos relacionados à eletrônica de potência e ao funcionamento de geradores síncronos, entre outros. Esse trabalho tem como objetivo principal a aplicação desses conceitos através de um protótipo de um conversor CA-CC e que possa ser a base para a finalização em um próximo trabalho. Entre os diversos conversores existentes foi escolhido o *Forward* por melhor se adaptar aos níveis de tensão escolhidos. Como todo projeto que possui etapas de montagem e testes, depois de calculados todos os estágios foram simulados antes de se montar o protótipo final. O projeto final é formado por uma etapa de retificação de tensão na entrada que é fornecida para um conversor *Forward* que apresenta em sua saída uma tensão de 220 V e corrente de 0,2 A que são necessárias para a energização da bobina de campo do gerador síncrono que será conectado ao protótipo. O projeto contém um sistema de leitura da corrente de campo e da tensão de linha da saída do gerador e que é apresentado em um display. Conectando cargas diferentes na saída do gerador, o projeto possui uma malha de controle que atua diretamente na parte de chaveamento do *Mosfet* e que compensa os efeitos causados, mantendo a energização da bobina de campo do gerador sempre constante e com valor nominal. Devido à pandemia de COVID-19 não foi possível realizar os testes finais com o protótipo conectado diretamente no gerador, dessa forma, o projeto foi dividido em sub-circuitos e realizados testes individuais.

Palavras-chave: Conversor CA-CC. Sistemas de excitação. Retificadores de tensão. Conversor Forward.

ABSTRACT

SKROCH, M. Yuri. **Voltage regulator for synchronous machines in the electrical machine laboratories of the academic department of electrotechnics.** 2021. 077 f. TCC (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

At University, the Electric Engineer student learns many concepts related to power electronics and the operation of synchronous generators. This project has as main objective the application of these concepts through a prototype of a CA-CC converter that can be the basis for a next project. Among the many existing converters, Forward was chosen because it be adapts to the chosen voltage levels. Like any project with assembly and testing steps, the final prototype was only assembled after all stages of the project were calculated and simulated. The final prototype consists of a voltage rectification step at the input that is provided by a Forward converter that has a 220 V voltage and 0.2 A current at its output, which are necessary for energizing the generator field coil. The project contains a reading system for the field current and the voltage of the generator, which is shown on a display. Connecting different currents at the generator output, the project has a control loop that acts directly at the Mosfet switching part, keeping the field generator coil energized at a constant level and with a nominal value. Due to the COVID-19 pandemic, it was not possible to carry out the final tests with the prototype connected directly to the generator, so the project was divided into sub-circuits and individual tests carried out.

Keywords: AC-DC converter. Excitation systems. Voltage rectifiers. Forward converter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Circuito equivalente do gerador síncrono trifásico	18
Figura 2 - Diagrama fasorial para carga puramente resistiva	20
Figura 3 - Diagrama fasorial para carga puramente indutiva	20
Figura 4 - Diagrama fasorial para carga puramente capacitiva	20
Figura 5 – Modelo básico de um sistema de excitação	22
Figura 6 – Sistema de excitação com excitatriz rotativa CC	23
Figura 7 – Sistema de excitação com excitatriz auto excitada	23
Figura 8 – Sistema de excitação com excitatriz rotativa CA e retificador fixo não controlado.....	24
Figura 9 – Sistema de excitação sem escovas	24
Figura 10 – Excitação estática.....	25
Figura 11 – Representação simplificada do regulador de tensão automático...	26
Figura 12 – Gerador com Bobina Auxiliar	26
Figura 13 – Gerador com Excitatriz Auxiliar	27
Figura 14 - Retificador meia onda.....	28
Figura 15 - Retificador monofásico onda completa com filtro capacitivo	28
Figura 16 – Sinal de saída do retificador sem e com capacitor	29
Figura 17 – Retificador com NTC na entrada	31
Figura 18 - Representação de um conversor CC-CC.....	31
Figura 19 – Conversor FORWARD.....	32
Figura 20 - Formas de onda do conversor Forward	33
Figura 21 – Diagrama de blocos geral.....	34
Figura 22 – Compensador PI.....	35
Figura 23 – Placa do gerador síncrono.....	38
Figura 24 – Circuito Auxiliar.....	41
Figura 25 – Protótipo do circuito auxiliar.....	41

Figura 26 – Gráfico VF x IF	50
Figura 27 – Resposta em frequência do circuito em malha aberta	51
Figura 28 – Resposta em frequência do circuito em malha fechada	52
Figura 29 – Sensor de corrente de efeito HALL.....	53
Figura 30 – Sensor de corrente de efeito HALL.....	54
Figura 31 – Esquema elétrico do circuito.....	55
Figura 32 – Tensão de entrada do conversor.....	55
Figura 33 – Tensão sobre o <i>MOSFET</i>	56
Figura 34 – Tensão de saída do conversor	56
Figura 35 – Corrente de saída do conversor	56
Figura 36 – Protótipo de teste	57
Figura 37 – Forma de onda do PWM	58
Figura 38 – Tensão de saída do retificador	58
Figura 39 – Tensão sobre o MOSFET	59
Figura 40 – Tensão de saída sobre a carga	59
Figura 41 – Testes de laboratório	60
Figura 42 – Tensão de saída sobre a carga	61
Figura 43 – Protótipo final montado	63
Figura 44 – Esquema elétrico do PWM.....	64
Figura 45 – Forma de onda na saída do circuito de PWM.....	65
Figura 46 – Valores obtidos na saída do circuito de PWM	65
Figura 47 – Controle da tensão de linha	66
Figura 48 – Tensão de linha calibrada	67
Figura 49 – Retificador de entrada	68
Figura 50 – Conversor <i>FORWARD</i>	68
Figura 51 – Equipamentos e placa para a medição.....	69
Figura 52 – Corrente de saída do conversor	70

Figura 53 – Forma de onda na carga.	70
Figura 54 – Display para visualização.....	71
Figura 55 – Tensão de linha.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os países com maior produção de energia em 2015	18
Tabela 2 – Dados de projeto.....	37
Tabela 3 – Determinação da resistência da bobina de campo	49
Tabela 4 – Determinação da resistência da bobina de campo	49
Tabela 5 – Parâmetros do gerador síncrono.....	50
Tabela 6 – Componentes utilizados	53

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>BRUSHLESS</i>	Sistema de Excitação sem escovas
<i>BUZZER</i>	Componente de geração de ruídos sonoros
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DAELT	Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
DUTY CYCLE	Ciclo de trabalho
<i>EIA</i>	Energy International Administration
<i>FORWARD</i>	Conversor Buck isolado
<i>LCD</i>	Liquid Crystal Display
<i>MOSFET</i>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NTC	Negative Temperature Coefficient
<i>PUSH BUTTON</i>	Um tipo de chave usada em eletrônica
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation
RIPPLE	Ondulação de Saída
RPM	Rotação por minuto
RSE	Resistência Série
TWh	Tera Watts hora
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	TEMA	14
1.1.1	Delimitação do Tema	15
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	15
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
1.4	JUSTIFICATIVA.....	16
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	GERADORES SÍNCRONOS	18
2.1.1	SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS.....	21
2.1.1.1	Sistemas de excitação rotativo CC.....	22
2.1.1.2	Sistemas de excitação rotativo CA.....	23
2.1.1.3	Sistemas de excitação estáticos	25
2.1.2	REGULADORES DE TENSÃO AUTOMÁTICA	25
2.2	ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.....	28
2.2.1	RETIFICADORES DE TENSÃO	28
2.2.2	CONVERSORES CC – CC	31
2.2.2.1	Conversor Buck isolado	32
2.2.2.1.1	Funcionamento	32

2.2.3	SISTEMA DE CONTROLE.....	33
3	PROJETO E MONTAGEM	37
3.1	RETIFICADOR.....	38
3.2	CIRCUITO AUXILIAR DE ALIMENTAÇÃO	40
3.3	CONVERSOR CC-CC BUCK BOOST ISOLADO (<i>FORWARD</i>)	42
3.4	MALHA DE CONTROLE	48
3.5	MEDIÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE	52
3.5.1	Tensão	52
3.5.2	Corrente	53
3.6	SIMULAÇÃO DO PROJETO	54
3.7	MONTAGEM E TESTES DO PRÉ-PROTÓTIPO	57
3.8	TESTES NO GERADOR.....	61
4	PROTÓTIPO FINAL	63
4.1	CIRCUITO DE PWM.....	64
4.2	CIRCUITO DE CONTROLE DA TENSÃO DE LINHA.....	66
4.3	RETIFICADOR COM CONVERSOR CC-CC.....	67
4.4	CIRCUITO DE MONITORAMENTO	71
5	CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS.....	74
	ANEXO	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A energia elétrica nos tempos atuais é considerada como um serviço essencial e com isso a demanda faz com que a necessidade de geração de energia elétrica cresça cada vez mais.

De acordo com a estimativa feita pela *Energy International Administration* (EIA, 2017), através do documento “*International Energy Outlook*”, a geração de energia elétrica no mundo aumentará em 77% entre 2006 e 2030.

De acordo com a tabela 1, em 2015 a geração de energia elétrica mundial alcançou a quantia de 24255 TWh com China e Estados unidos sendo os maiores geradores.

Tabela 1 – Os países com maior produção de energia em 2015

Países Produtores	Quantidade produzida (TWh)	% da produção mundial
China	5844	24,1
EUA	4297	17,7
Índia	1383	5,7
Rússia	1066	4,4
Japão	1035	4,3
Canada	671	2,8
Alemanha	641	2,6
Brasil	582	2,4
França	563	2,3
Coréias	549	2,3
Resto do Mundo	7624	31,4
Mundial	24255	100

Fonte: EIA (2017)

No Brasil a previsão para o ano de 2021 é uma expansão de geração de 4.790,48W (Sala de Imprensa, 2021).

Junto com esse crescimento na demanda aumenta o número de geradores síncronos ou assíncronos conectados a rede.

1.1.1 Delimitação do Tema

Foi feito um estudo relacionado aos geradores síncronos dos laboratórios de máquinas elétricas do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) – laboratório C004 usando conhecimentos em máquinas elétricas e em eletrônica de potência para a elaboração de um regulador de tensão para os geradores síncronos.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Algumas vezes os discentes apresentam dificuldades em relacionar um assunto teórico com sua aplicação prática em um curso de engenharia elétrica.

Com esse projeto se pretende mostrar como um regulador de tensão atua em um conjunto didático com o gerador síncrono, de maneira que possa auxiliar no entendimento prático do seu funcionamento.

Foi construído um retificador monofásico e na sua saída, será conectada um conversor CC-CC controlado por transistor *MOSFET* que fornecerá para a bobina de campo do gerador síncrono uma tensão de 220 V e corrente de 0,2 A.

Para a certeza de seu correto funcionamento de acordo com os valores nominais do gerador, será inserido um sensor de corrente e um circuito para a medição da tensão de linha na saída do gerador e que terá seus resultados convertidos dentro de um microcontrolador.

Os valores reais de corrente de campo e de tensão de linha poderão ser consultados através de um sistema de chaves *PUSH BUTTON* e leitura em um display de cristal líquido.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Projetar e montar o protótipo de um regulador de tensão para a excitação de um gerador síncrono utilizado no laboratório C-004 da UTFPR.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar, simular e montar um retificador monofásico onda completa e um conversor CC-CC controlado por *MOSFET* que forneça a tensão de 220 V e corrente de 0,2 A;
- Realizar o ensaio a vazio do gerador síncrono;
- Projetar e montar a placa de circuito impresso;
- Testar todos os sub-circuitos de forma individual para confirmar o funcionamento geral;
- Deixar o projeto preparado para uma possível implementação final no futuro.

1.4 JUSTIFICATIVA

A maioria das empresas e indústrias que usam geradores síncronos já possui integrado um sistema de regulação eletrônica de tensão. A construção ajudará os alunos no entendimento do funcionamento do mesmo com a verificação do funcionamento real do sistema e acesso ao circuito.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foi projetado um retificador monofásico onda completa que forneceu uma tensão de saída para alimentar a entrada de um conversor CC-CC.

O conversor CC-CC foi escolhido após um estudo e projeto com os mais viáveis conversores CC-CC que existem, levando em conta fatores como custo e rendimento. Foi feito o projeto e determinado através de cálculos os componentes do retificador e do conversor CC-CC.

Para se confirmar os dados obtidos os circuitos foram simulados em software específico.

Foi realizado ensaio a vazio no gerador síncrono para a obtenção de alguns valores para o projeto da malha de controle.

Primeiramente foi montado e testado um pré-protótipo em laboratório e conectado ao gerador síncrono.

Após a confirmação do funcionamento foi projetada uma placa de circuito impresso definitiva para o protótipo final.

Para os testes finais a placa foi dividida em sub-circuitos e testados individualmente.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Foi estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1: introdução, objetivos, justificativa e procedimentos metodológicos;

Capítulo 2: estudo bibliográfico com a parte conceitual a respeito dos geradores síncronos, os tipos de excitação e os reguladores de tensão;

Capítulo 3: estudo conceitual referente a parte eletrônica do projeto, como retificadores e conversores CC-CC;

Capítulo 4: projeto dos circuitos propostos, simulação em software específico, montagem e o teste nos primeiros protótipos, adequando o projeto aos geradores do laboratório C-004, realização e resultado de ensaios no gerador síncrono a ser usado;

Capítulo 5: esquema elétrico do protótipo final, explicação do funcionamento;

Capítulo 6: considerações finais com comparações de resultados iniciais com finais e através de seu funcionamento justificar sua importância para os futuros discentes.

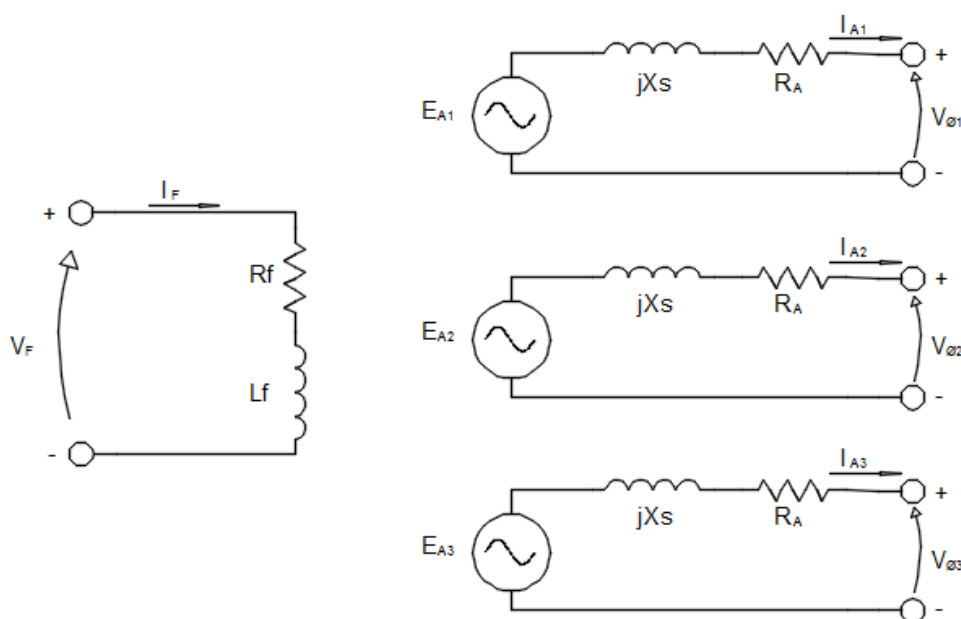
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GERADORES SÍNCRONOS

Geradores Síncronos são máquinas de corrente alternada que possuem frequência e velocidade constantes entre si. São formadas por dois elementos básicos: um enrolamento de campo (rotor) que é responsável por produzir um campo magnético de excitação e o enrolamento de armadura (estator), que é formado pelo conjunto de bobinas que produzem tensão devido ao movimento relativo entre os dois (ALTINO, LUCIANA, 1984).

É acoplado a uma máquina primária e sua principal função é transformar energia mecânica em energia elétrica. Possui um enrolamento colocado no estator que irá induzir tensão pelo movimento do rotor e este é alimentado por corrente contínua para gerar o campo magnético principal da máquina.

Figura 1 - Circuito equivalente do gerador síncrono trifásico



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na figura 1 é apresentado o circuito equivalente do gerador síncrono trifásico de polos lisos, onde R_A é a resistência de armadura, E_{A1} , E_{A2} e E_{A3} são as tensões geradas internamente no enrolamento do estator, jX_s é a reatância síncrona, $V_{\phi 1}$,

$V_{\phi 2}$ e $V_{\phi 3}$ são as tensões de armadura, R_f a resistência de campo, L_f a indutância de campo e V_f a tensão de campo.

Percorrendo a malha do circuito de armadura pode se chegar à equação da tensão interna gerada:

$$E_a = V_{\phi} + jX_s I_A + R_A I_A \quad (1)$$

A tensão interna de um gerador também pode ser dada por:

$$E_a = K\omega\phi \quad (2)$$

Onde K é a constante que representa os aspectos construtivos do gerador, ω é a velocidade de rotação do gerador em rad/s e ϕ é o fluxo magnético. Pela equação pode ser observado que a tensão interna é diretamente proporcional ao fluxo magnético e como esse depende da corrente de campo, pode se dizer que a tensão interna gerada está relacionada com a corrente de campo do rotor.

É necessária a aplicação de uma tensão CC no enrolamento de campo do gerador síncrono que pode ser feita através de fonte externa que forneça a tensão CC através de anéis coletores e escovas ou por fonte montada diretamente no eixo (CHAPMAN, STEPHEN, 2013).

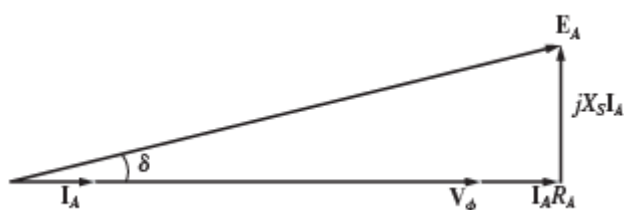
A frequência de um gerador síncrono é calculada em função de seu número de pólos e de sua rotação síncrona:

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \quad (3)$$

Sendo f a frequência a ser encontrada, p o número de polos e n o valor da rotação síncrona em rpm. Sempre é construído com número de polos pares e a cada rotação do gerador corresponde a um ciclo elétrico.

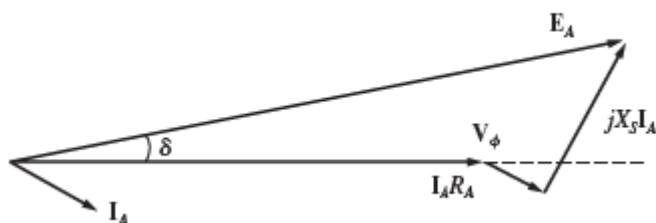
O gerador síncrono apresenta em sua saída um comportamento de acordo com a carga que é conectada. Nas figuras 2, 3 e 4 podem ser observados os diagramas fasoriais de um gerador síncrono para cargas puramente resistivas, capacitivas e indutivas.

gura 2 - Diagrama fasorial para carga puramente resistiva



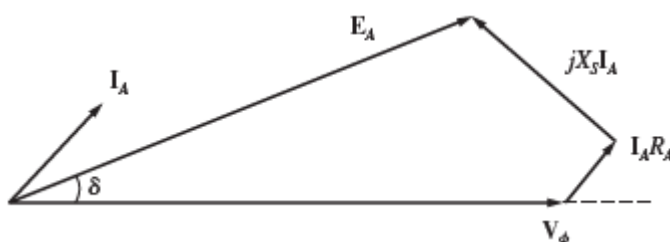
Fonte: CHAPMAN, 2013

Figura 3 - Diagrama fasorial para carga puramente indutiva



Fonte: CHAPMAN, 2013

Figura 4 - Diagrama fasorial para carga puramente capacitiva



Fonte: CHAPMAN, 2013

Quando conectado a uma carga puramente resistiva, a sua corrente de armadura I_A está em fase com sua tensão de terminal V_ϕ e conseqüentemente com a tensão no enrolamento da armadura. A tensão interna gerada E_A pode ser definida como:

$$\overset{\circ}{E}_A = \overset{\circ}{V}_\phi + \overset{\circ}{I}_A R_A + jX_S \overset{\circ}{I}_A \quad (4)$$

Ao conectar uma carga indutiva, a corrente de armadura se atrasa da sua tensão de terminal em θ graus e sua tensão interna gerada E_A pode ser determinada através de:

$$\overset{\circ}{E}_A = (\overset{\circ}{V}\overset{\circ}{\cos}\theta + \overset{\circ}{I}_A \overset{\circ}{R}_A) + j(\overset{\circ}{V}\overset{\circ}{\sin}\theta + \overset{\circ}{I}_A \overset{\circ}{X}_S) \quad (5)$$

Com uma carga capacitiva conectada ao gerador, sua corrente de armadura I_A fica adiantada em θ graus de sua tensão de terminal $V\phi$ e sua tensão interna gerada E_A pode ser encontrada por:

$$\overset{\circ}{E}_A = (\overset{\circ}{V}\overset{\circ}{\cos}\theta + \overset{\circ}{I}_A \overset{\circ}{R}_A) + j(\overset{\circ}{V}\overset{\circ}{\sin}\theta - \overset{\circ}{I}_A \overset{\circ}{X}_S) \quad (6)$$

2.1.1 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

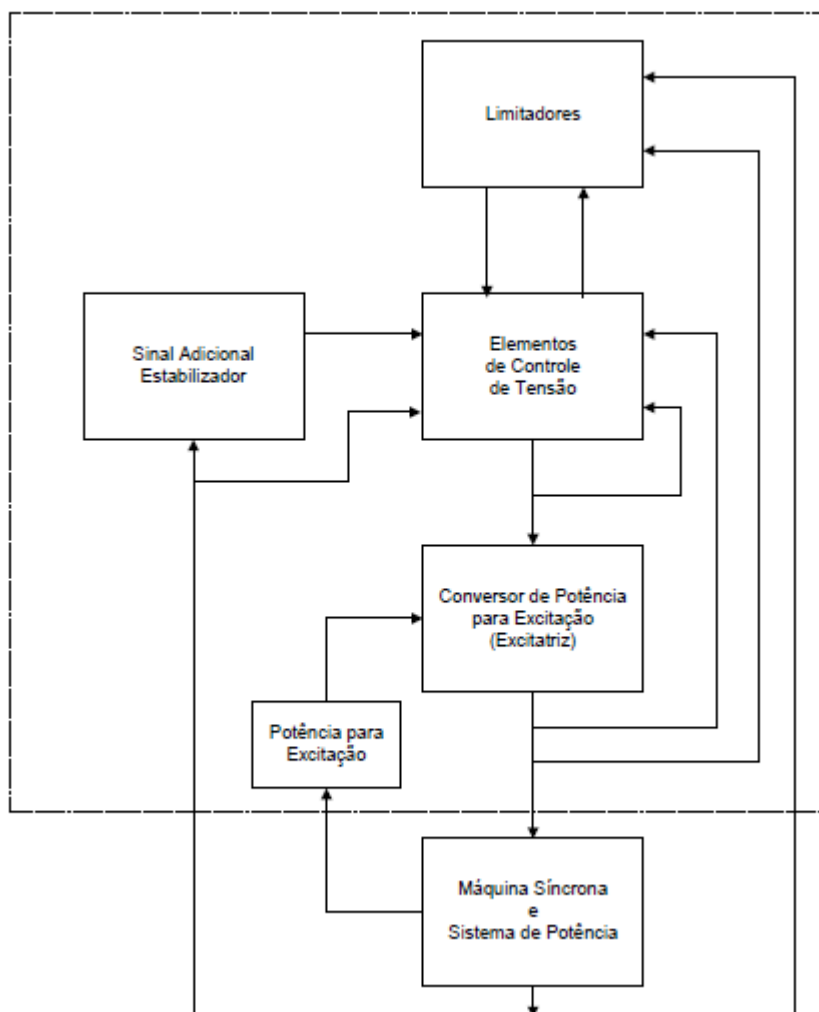
O sistema de excitação, ou a excitatriz, são aqueles que fornecem a corrente contínua para o enrolamento de campo e juntamente com um sistema de controle, fazem a regulação da tensão de terminal e da potência reativa entregues pelo gerador (NEVES, 2013).

O sistema de excitação compreende todos os equipamentos e dispositivos necessários ao suprimento da corrente do campo do gerador principal. São compostos por excitatriz, regulador de tensão, malhas de controle dos limitadores e pelo sinal estabilizador (BRASIL, CIGRÉ, 2011).

Podem ser do tipo rotativo de correntes alternada e corrente contínua, estático e sistemas mistos.

Na figura 5 é apresentado o diagrama de bloco geral de um sistema de excitação com seus elementos como limitadores, de controle de tensão, conversor de potência e a parte de controle.

Figura 5 – Modelo básico de um sistema de excitação



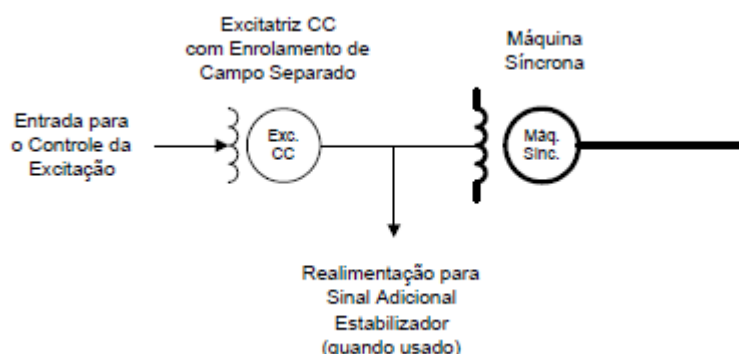
Fonte: CIGRÉ BRASIL, 2011.

2.1.1.1 Sistemas de excitação rotativo CC

Nesse tipo de sistema a corrente contínua fornecida ao enrolamento de campo pode ser obtida através de uma fonte de corrente contínua (CALSAN, MARCELO, 2011).

Na figura 6 podemos verificar o modelo desse tipo de excitação rotativo CC.

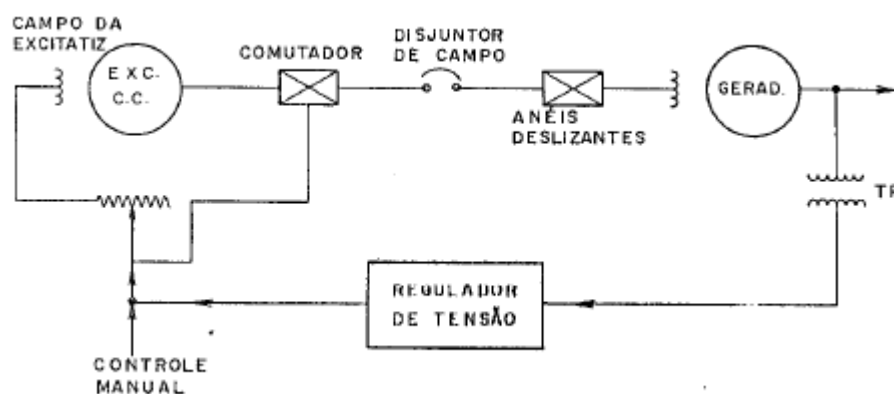
Figura 6 – Sistema de excitação com excitatriz rotativa CC



Fonte: CIGRÉ BRASIL, 2011.

Na figura 7 é apresentado o modelo do sistema de excitação com excitatriz de corrente contínua auto excitada. Perdeu espaço no mercado por possuir problemas tais como manutenção constante por causa do desgaste em escovas e problemas de comutação com geradores de grande porte. O regulador de tensão do circuito através de um transformador de potencial, compara a tensão da saída do gerador com uma tensão de referência e se necessário, aciona um dispositivo mecânico que irá ajustar a resistência do reostato (COSTA, SIMÕES, 2002).

Figura 7 – Sistema de excitação com excitatriz auto excitada

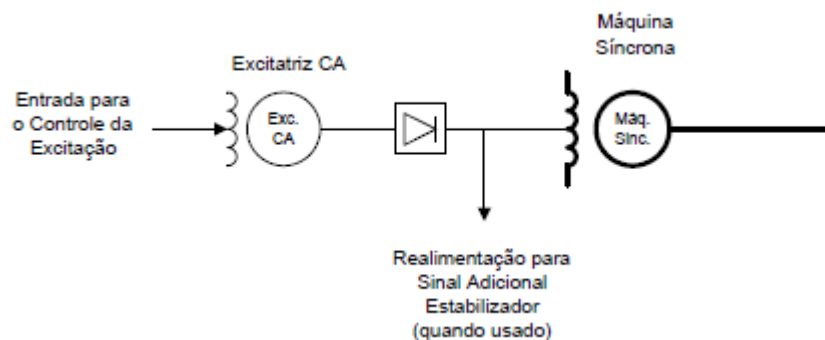


Fonte: COSTA, Simões, 2002.

2.1.1.2 Sistemas de excitação rotativo CA

Nesse tipo de excitação a corrente é produzida por um gerador de corrente alternada conectado com um retificador fixo que pode ser verificado na figura 8.

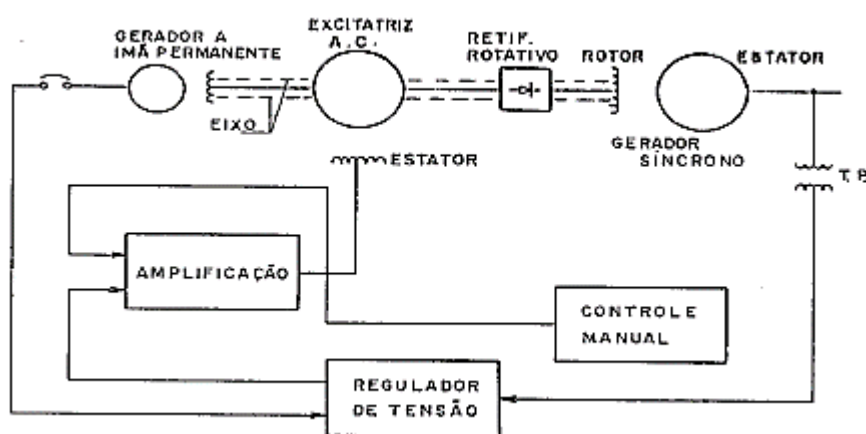
Figura 8 – Sistema de excitação com excitatriz rotativa CA e retificador fixo não controlado



Fonte: CIGRÉ BRASIL, 2011.

Um sistema de excitação muito utilizado é o sistema sem escovas ou *BRUSHLESS*. Possui um componente denominado excitatriz principal que tem sua armadura montada diretamente no eixo do gerador e que fornece tensão CA para um conjunto de diodos retificadores também montados no eixo do gerador como mostra a figura 9. O regulador de tensão monitora a tensão de saída e se necessário atua sobre a bobina de campo da excitatriz principal.

Figura 9 – Sistema de excitação sem escovas



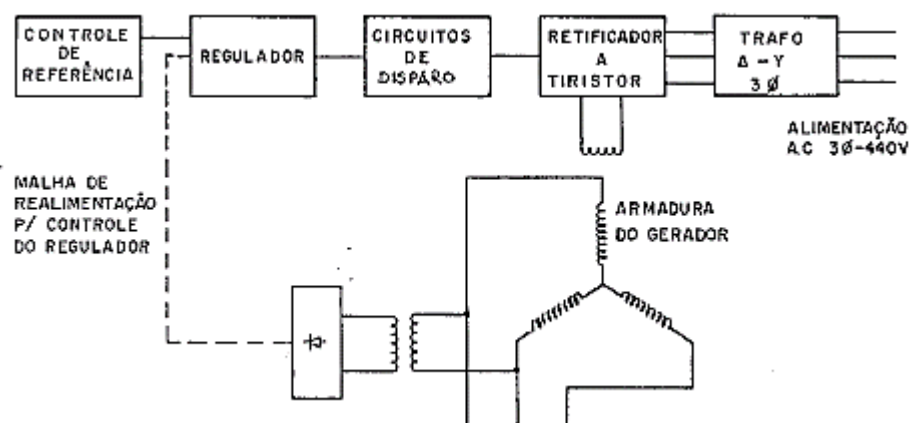
Fonte: COSTA, Simões, 2002.

É um sistema muito utilizado em locais de grandes turbo geradores que não necessitam de uma resposta rápida, mas necessitam de uma corrente de excitação associada a uma rotação elevada (BRASIL, CIGRÉ, 2011).

2.1.1.3 Sistemas de excitação estáticos

É o sistema que será usado no projeto em estudo e é caracterizado por ter um regulador de tensão monitorando a tensão de saída e quando necessário, controlar o disparo de transistores ou tiristores. Na figura 10 é mostrado o circuito completo.

Figura 10 – Excitação estática



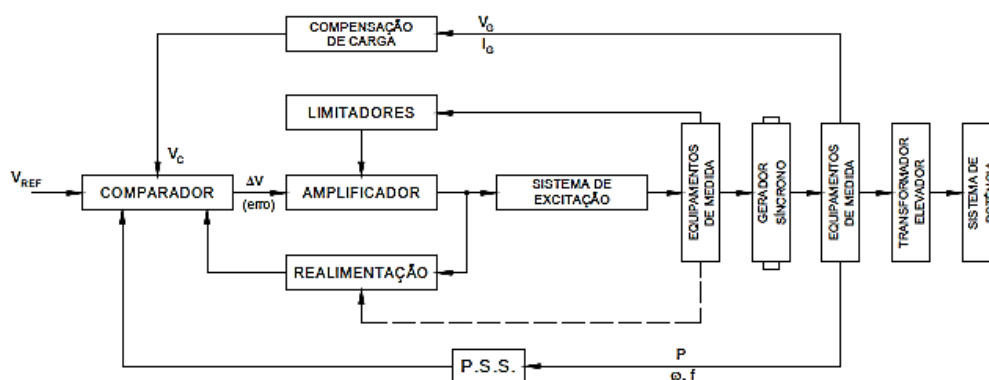
Fonte: COSTA, Simões, 2002.

O sistema de excitação alimenta e controla diretamente a corrente de campo sem dispositivos intermediários.

2.1.2 REGULADORES DE TENSÃO AUTOMÁTICA

São os responsáveis pelo monitoramento da tensão de saída e a atuação nos circuitos de disparo através da realimentação de tensão recebida dos terminais de armadura. Sua representação simplificada é apresentada na figura 11.

Figura 11 – Representação simplificada do regulador de tensão automático

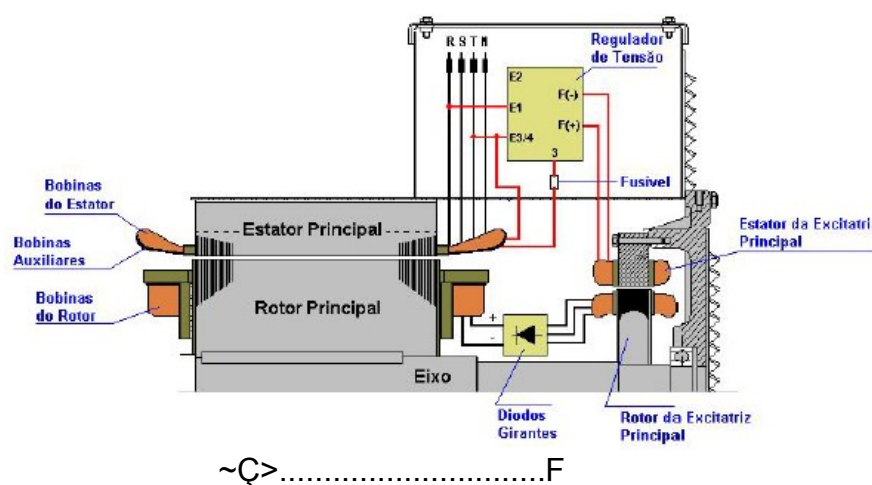


Fonte: CALSAN, Marcelo, 2011

Podem ser alimentados por bobina auxiliar, excitatriz auxiliar com ímãs permanentes, através da tensão de saída do próprio gerador ou da própria rede elétrica.

Pode ser alimentado pela tensão de saída do gerador síncrono e através de TP, retificar a tensão e aplicar no estator da excitatriz principal. Na figura 12 é apresentado o gerador com bobina auxiliar. É composto por um conjunto de bobinas alojadas nas ranhuras do estator e tem como função fornecer potência para o regulador de tensão que retifica e regula a tensão e aplica na bobina de campo da excitatriz principal (WEG,CURSO DT-5, 2017).

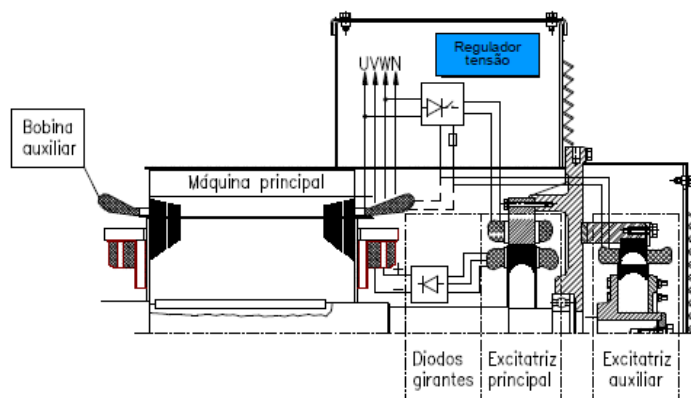
Figura 12 – Gerador com Bobina Auxiliar



Fonte: Weg, 2017.

Na figura 13 é apresentado o gerador com excitatriz auxiliar.

Figura 13 – Gerador com Excitatriz Auxiliar



Fonte: Weg, 2017.

Quando o regulador trabalha em conjunto com a excitatriz auxiliar a imãs permanentes conhecida como PMG, recebe a tensão trifásica gerada pela excitatriz, retifica e aplica no enrolamento de campo da excitatriz principal.

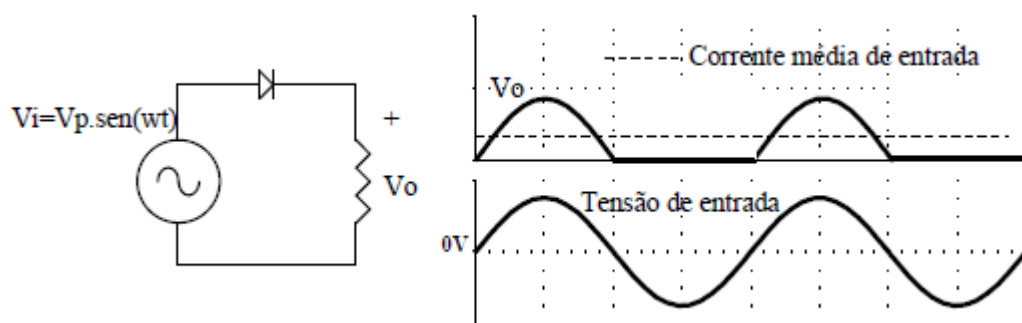
2.2 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

2.2.1 RETIFICADORES DE TENSÃO

Os retificadores são os circuitos responsáveis pela conversão de CA para CC com a ajuda de diodos e tiristores. Podem ser classificados como controlados ou não controlados, monofásicos ou trifásicos, meia onda ou onda completa.

Na figura 14 é mostrado a topologia do retificador monofásico meia onda. Essa topologia não é muito usada industrialmente por ter uma corrente média de entrada diferente de zero e por consequência satura elementos magnéticos presentes nos circuitos como indutores e transformadores. (POMÍLIO, JOSÉ, 2018).

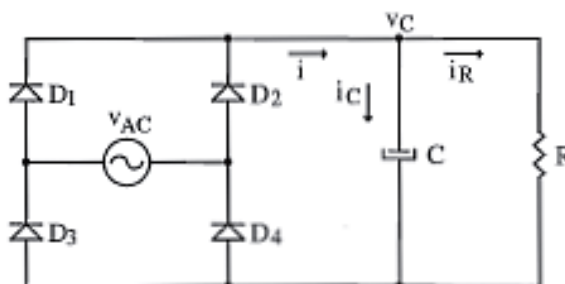
Figura 14 - Retificador meia onda



Fonte: POMÍLIO, José, 2018.

A topologia mais usada na prática é o retificador monofásico onda completa com filtro capacitivo e uso de diodos. Na figura 15 é apresentada essa topologia e é objeto desse estudo.

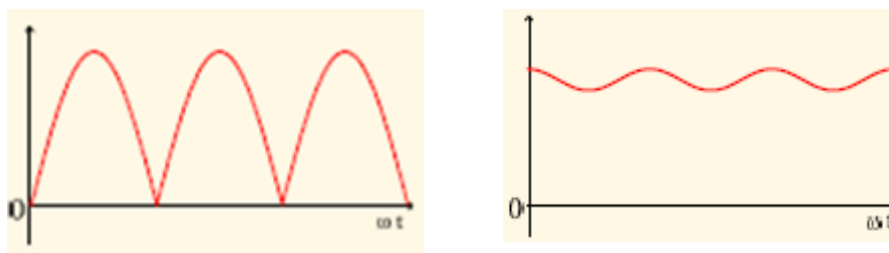
Figura 15 - Retificador monofásico onda completa com filtro capacitivo



Fonte: POMÍLIO, José, 2018

A cada semiciclo, dois diodos conduzem retificando o sinal. O capacitor serve para armazenar energia e diminuir o *RIPPLE* na saída. Nas figuras 16 é apresentado o sinal de saída do retificador sem e com capacitor.

Figura 16 – Sinal de saída do retificador sem e com capacitor



Fonte: BADIN, Alceu, 2018

Para o projeto de um retificador algumas informações iniciais são necessárias como: a tensão de saída desejada, tensão de pico de entrada máxima, tensão de pico de entrada mínima, frequência da rede, potência de saída, rendimento e tensão mínima no capacitor.

Com todas as informações necessárias, podem ser calculadas a potência de entrada, o tempo de condução do diodo, a corrente eficaz alternada, a corrente eficaz no capacitor, a corrente eficaz no diodo e a corrente média no diodo através de:

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} \quad (7)$$

Sendo P_{in} a potência de entrada, P_o a potência de saída e η o rendimento do retificador. É necessário o cálculo do tempo de condução dos diodos que influenciará diretamente depois para a determinação real do componente:

$$tc = \frac{\arccos\left(\frac{V_{C_{min}}}{V_{p_{min}}}\right)}{2\pi f} \quad (8)$$

Sendo tc o tempo de condução do diodo, $V_{C_{min}}$ a tensão mínima no capacitor, $V_{p_{min}}$ a tensão de pico de entrada mínima e f a frequência da rede elétrica.

Para o cálculo da corrente de pico nos diodos será necessário o uso da tensão de pico mínima, do valor da tensão mínima no capacitor e da capacitância:

$$I_p = \frac{(V_{pmin} - V_{Cmin})C}{tc} \quad (9)$$

Sendo I_p a corrente de pico e C o valor da capacitância. Com esse valor da corrente de pico pode ser encontrada a corrente eficaz nos diodos:

$$I_{Def} = I_p \sqrt{\frac{tc}{T}} \quad (10)$$

Sendo I_{Def} a corrente eficaz no diodo e T o período. Outra informação importante a ser obtida é a corrente média nos diodos:

$$I_{Dmed} = \frac{P_{in}}{2V_{Cmin}} \quad (11)$$

Sendo I_{Dmed} a corrente média no diodo. Para perfeita determinação do tipo de diodo a ser usado é necessário o cálculo da corrente eficaz:

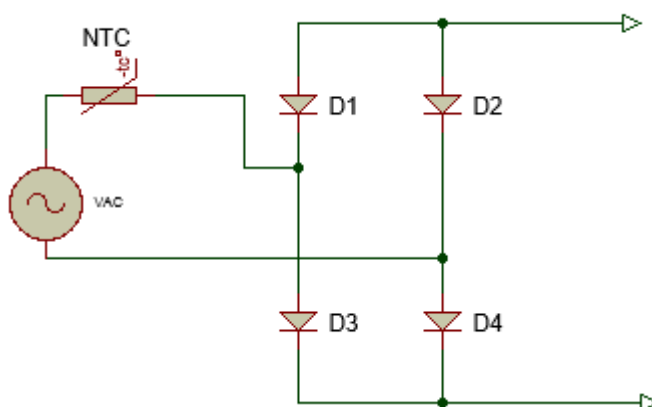
$$I_{Cef} = \sqrt{\left(\frac{P_{in}}{V_{Cmin}}\right)^2 + (I_{ef})^2} \quad (12)$$

Com I_{ef} sendo a corrente eficaz. O cálculo do capacitor de saída do retificador é realizado com as informações da potência de entrada P_{in} , da frequência da rede de energia elétrica f , da tensão de pico mínima sobre os diodos V_{pmin} e da tensão mínima sobre o capacitor V_{Cmin} :

$$C = \frac{P_{in}}{f(V_{pmin}^2 - V_{Cmin}^2)} \quad (13)$$

Outro fator a ser considerado é a chamada *Inrush Current* ou corrente de surto. Essa é a corrente que circula pelos diodos no momento que o retificador é ligado. Dependendo do valor da resistência série do capacitor pode alcançar valores elevados (MELLO, LUIZ, 1987). Uma solução para isso é a inserção de um termistor NTC na entrada do retificador conforme figura 17.

Figura 17 – Retificador com NTC na entrada

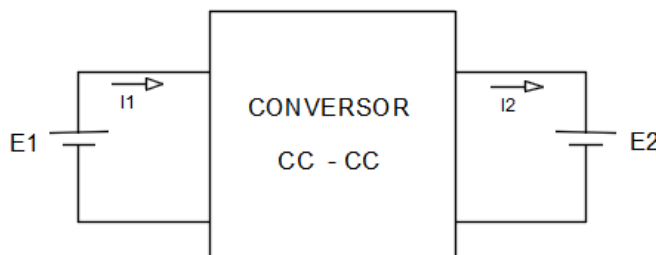


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

2.2.2 CONVERSORES CC – CC

Os conversores CC-CC são circuitos que transformam a tensão de entrada CC em uma tensão de saída CC. Na figura 18 é apresentada a representação do conversor CC com E1 sendo a tensão de entrada e E2 que pode ser representada por uma carga resistiva, ou um banco de baterias ou no caso em estudo a bobina de campo do gerador síncrono.

Figura 18 - Representação de um conversor CC-CC



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Podem ser designados como não isolados por não possuírem uma isolação elétrica entre entrada e saída ou isolados com a inserção de um transformador para o isolamento. Possuem vantagem sobre as fontes lineares por serem controlados e assim, apresentam um rendimento melhor.

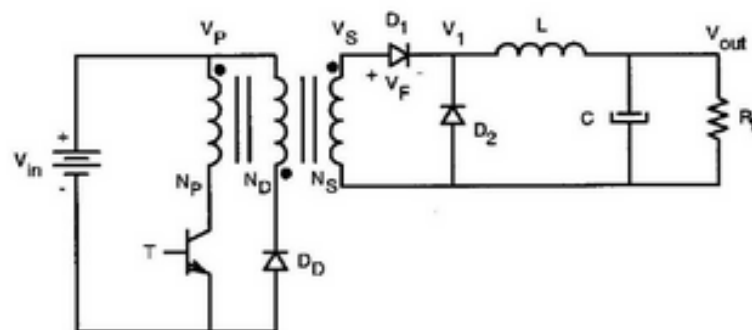
Os conversores estáticos CC-CC podem ser encontrados em diversas configurações, mas os mais utilizados são: *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*, *Cúk*, *Sepic* e *Zeta*.

Para a utilização no projeto em desenvolvimento, foi escolhido o modelo Buck-Boost isolado por apresentar as melhores características de resposta aos itens solicitados e ter isolação da saída em relação à entrada.

2.2.2.1 Conversor Buck isolado

É conhecido como *FORWARD*. É um conversor com isolamento entre a entrada e a saída. Seu circuito é mostrado na figura 19.

Figura 19 – Conversor FORWARD



Fonte: BARBI, IVO, 2001

É quase sempre usado no modo condução contínua e por existir uma pequena energia magnetizante que circula pelo núcleo possui um terceiro enrolamento para retirar essa energia a cada ciclo (PETRY, CLÓVIS, 2014).

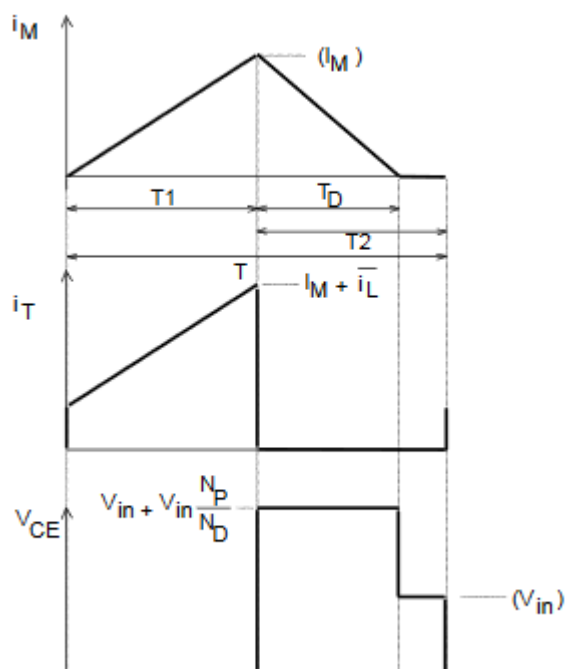
2.2.2.1.1 Funcionamento

Em uma primeira etapa o transistor T esta saturado, o diodo Dd se encontra bloqueado e a corrente circula através do diodo D1. No próximo estágio o transistor T bloqueia juntamente com o diodo D1 e a corrente circula através do diodo D2. A

energia acumulada no enrolamento desmagnetizante é devolvida à tensão de entrada através da condução do diodo Dd.

As formas de onda esperadas são mostradas na figura 20.

Figura 20 - Formas de onda do conversor Forward



Fonte: PETRY, Clóvis, 2014.

Pelo fato do conversor usado no projeto em estudo ser conectado diretamente na bobina de campo do gerador síncrono, foi escolhido não usar o indutor L e o capacitor de saída por suas funções serem supridas pelos valores de resistência e indutância da bobina de campo.

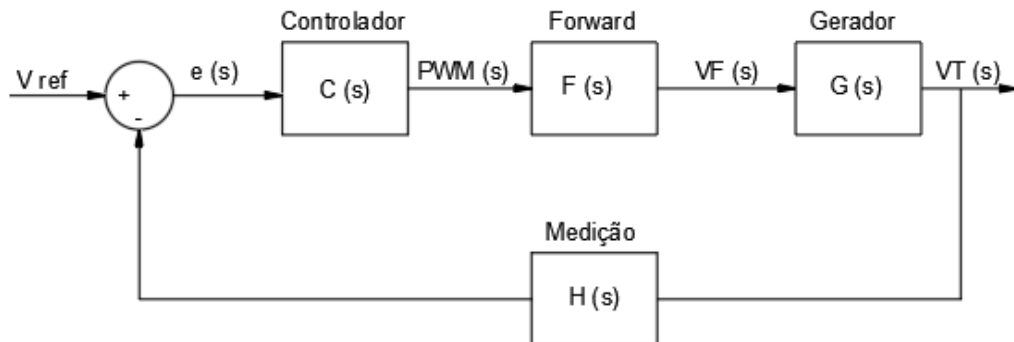
2.2.3 SISTEMA DE CONTROLE

Uma malha de controle é essencial para manter a tensão de saída constante e para corrigir alguns problemas relacionados a transitórios que possam surgir com o chaveamento do *MOSFET*.

Na figura 21 é apresentado o diagrama em blocos do projeto com o sistema de controle em malha fechada. A tensão de linha na saída do gerador é medida e reduzida para um valor que possa ser comparada com uma tensão de referência. Na

necessidade de ajuste, é enviado um sinal de erro para um controlador que normalmente pode ser PI ou PID. Esse faz uma correção da tensão aplicada na bobina de campo do gerador através do sinal enviado para o circuito de *PWM*.

Figura 21 – Diagrama de blocos geral



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Para se encontrar a função de transferência são considerados todos os elementos do circuito juntamente com a malha de realimentação:

$$\frac{VT}{V_{ref}} = \frac{C(s)F(s)G(s)H(s)}{1 + C(s)F(s)G(s)H(s)} \quad (14)$$

Para se obter a função de transferência final, cada componente dessa malha tem que ser modelado e incluído na equação final.

$C(s)$ é a função de transferência do controlador a ser usado que é o PI e pode ser descrita como:

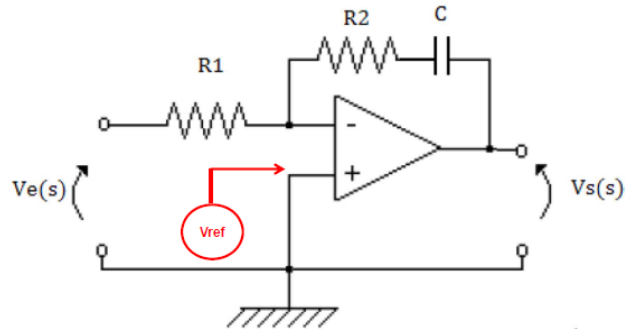
$$C(s) = \frac{Kp + Ki}{s} \quad (15)$$

Onde Kp é o ganho proporcional e Ki o ganho integral.

Na prática um compensador PI pode ser representado pela figura 22, onde é feito um arranjo com capacitor e resistores junto com um amplificador operacional

que normalmente esta inserido internamente em um circuito integrado responsável na maioria das vezes pelo sinal de *PWM*.

Figura 22 – Compensador PI



Fonte: BADIN, Alceu, 2018

A função de transferência do conversor *FORWARD* pode ser obtida através de manipulações matemáticas envolvendo as tensões de entrada e saída:

$$F(s) = \frac{V_i N_2}{V_s N_1 \left(1 + \frac{s^2}{\omega_0^2}\right)} \quad (16)$$

Sendo V_i a tensão de entrada, N_2 o número de espiras do enrolamento secundário, N_1 o número de espiras do enrolamento primário, V_s a tensão de referência e ω_0 sendo:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (17)$$

Para a modelagem do gerador síncrono é utilizado a sua operação em regime permanente e baseado no circuito equivalente da figura 1. Considerando a tensão de entrada como V_F e a tensão de saída como V_θ ou V_T , é feito a manipulação matemática onde se encontra uma equação envolvendo a indutância da bobina de campo L_F , a impedância da carga Z_L , a resistência de armadura R_A e a indutância do enrolamento da armadura L_A :

$$G(s) = \frac{V_T(s)}{V_F(s)} = \frac{\frac{L_F Z_L}{R_F L_A}}{s + \frac{(R_A + Z_L)}{L_A}} \quad (18)$$

Com a ajuda do software *MATLAB* pode se encontrar a função de transferência final do sistema completo necessário para o projeto do sistema de controle:

$$\frac{VT}{V_{ref}} = \frac{(L_A L_F N_2 V_i Z_L (K_i + K_p))}{(N_1 R_F V_S s \left(\frac{(L_A L_F N_2 V_i Z_L (K_i + K_p))}{(N_1 R_F V_S s \left(1 + \frac{s^2}{\omega_0^2} \right) \left(s + \frac{(R_A + Z_L)}{L_A} \right))} + 1 \right) \left(1 + \frac{s^2}{\omega_0^2} \right) \left(s + \frac{(R_A + Z_L)}{L_A} \right))} \quad (19)$$

Essa fórmula é útil para encontrar valores comerciais de componentes do compensador PI a partir de dados do gerador síncrono e outros obtidos através de ensaio a vazio.

3 PROJETO E MONTAGEM

Para o cálculo de todas as partes do projeto serão usados como base os dados apresentados na tabela 2. Na figura 23 é apresentada a placa do gerador síncrono do laboratório C-004 que será usado como referência para esse projeto.

Tabela 2 – Dados de projeto

Nome	Valor	Descrição
V_{in}	220 V	Tensão de entrada do retificador
$V_{in\ min}$	129 V	Tensão de entrada mínima do retificador
$V_{in\ max}$	311 V	Tensão de entrada máxima do retificador
ΔV_{AC}	0,2 V	Ripple de entrada do retificador
f_{in}	60 Hz	Frequência de entrada
V_o	220 V	Tensão de saída do conversor
I_o	0,5 A	Corrente de saída do conversor
ΔV_{crest}	0,37 V	Ripple do capacitor do retificador
V_d	1 V	Queda de tensão nos diodos
D_{min}	0,25	Ciclo de trabalho mínimo
D_{max}	0,4	Ciclo de trabalho máximo
f_s	30000 Hz	Frequência de chaveamento
R_1	0,9	Rendimento do retificador
R_2	0,8	Rendimento do conversor
K_p	0,3	Fator de utilização do primário
K_w	0,4	Fator de utilização da área da janela
J	350 A/cm ²	Densidade de corrente
B	0,2 T	Densidade de fluxo
μ_o	1,25664.10 ⁻⁶ H/m	Permeabilidade magnética
ΔV_o	11 V	Ripple na saída do conversor

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A tensão de entrada do retificador é de 220 V CA com valor máximo de 311 V. Para o projeto será considerado um valor de ripple de entrada do retificador de 0,2 V e de saída de 0,37 V, que vai ser a variação sobre o capacitor do retificador. Para o circuito de PWM que vai fornecer a tensão para o *MOSFET* realizar o chaveamento vai ser considerado um *DUTY CYCLE*, ou ciclo de trabalho de 0,4 e uma tensão de chaveamento de 30 kHz. O rendimento do retificador e do conversor

já considerando as perdas nos componentes é respectivamente de 0,9 e 0,8. Os valores de K_p , K_w , J e B são valores tabelados na literatura e usados em projetos desse tipo. Para o projeto ficou determinado que sua saída será para 220 V e corrente de até 0,5 A.

Figura 23 – Placa do gerador síncrono



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

O Gerador síncrono usado para os testes possui tensão nominal da bobina de campo de 220 V, corrente de campo nominal de 0,2 A e tensão de fase de saída de 220 V.

3.1 RETIFICADOR

Primeiro é calculado a potência de entrada e a potência de saída do conversor de acordo com as equações 20 e 21:

$$P_o = V_o * I_o = 220 * 0,5 = 110 W \quad (20)$$

Sendo P_o a potência de saída, V_o a tensão de saída e I_o a corrente de saída. A partir do resultado obtido calcula-se a potência de entrada:

$$P_{in} = \frac{P_o}{R_2} = \frac{110}{0,8} = 137,5 W \quad (21)$$

Sendo P_{in} a potência de entrada e R_2 o rendimento do conversor. A tensão de pico no capacitor (V_{pk_C}) é calculada através da equação 22 considerando a tensão mínima de entrada:

$$V_{pk_C} = \sqrt{2} * V_{in\ min} = \sqrt{2} * 129 = 182,43 V \quad (22)$$

Com $V_{in\ min}$ sendo a tensão mínima de entrada do retificador. A tensão mínima no capacitor (V_{min_C}) e a variação de tensão no capacitor (ΔV_C) são apresentadas nas equações 23 e 24 e importantes para o cálculo final do valor da capacitância:

$$V_{min_C} = (\sqrt{2} * V_{in\ min}) * (1 - \Delta V_{cret}) = (\sqrt{2} * 129) * (1 - 0,37) = 114,93 V \quad (23)$$

Sendo ΔV_{cret} o valor do *ripple* no capacitor do retificador.

$$\Delta V_C = V_{pk_C} - V_{min_C} = 182,43 - 114,93 = 67,5 V \quad (24)$$

Com esses valores até aqui calculados é possível determinar o valor do capacitor (C) de saída do retificador de acordo com a equação 25:

$$C = \frac{P_{in}}{f_{in} * (V_{pk_C}^2 - V_{min_C}^2)} = \frac{137,5}{60 * (182,43^2 - 114,93^2)} = 114,17 \mu F \quad (25)$$

Sendo f_{in} o valor da frequência de entrada no caso 60 Hz. O capacitor escolhido foi de 220 μF x 250V por ser o valor comercial disponível e por proporcionar um menor valor de *RIPPLE* na saída. Como a entrada é de 220 V e seu

valor máximo pode atingir o valor de 311 V, foram usados 2 capacitores de 220 μF x 250V em paralelo conectados em série com outros 2 capacitores de 220 μF x 250V em paralelo para se atender o requisito de tensão máxima nos componentes.

Para determinar o valor dos diodos da ponte retificadora calcula-se o tempo de condução (t_c) através da equação 26:

$$t_c = \frac{\text{Arco cos}\left(\frac{C}{V_{pk}k_C}\right)}{2*\pi*f_{in}} = \frac{\text{Arco cos}\left(\frac{114,17*10^{-6}}{182,43}\right)}{2*\pi*60} = 2,36 \text{ ms} \quad (26)$$

Pode-se calcular agora o valor da corrente de pico nos diodos (I_{p_d}) através da equação 27 usando o valor da capacitância calculada C, o valor do ripple no capacitor ΔV_c e do tempo de condução dos diodos t_c :

$$I_{p_d} = \frac{C*\Delta V_c}{t_c} = \frac{114,17*10^{-6}*67,5}{2,36*10^{-3}} = 3,27 \text{ A} \quad (27)$$

Para a determinação do diodo a ser utilizado é calculado o valor máximo de tensão em cima dos diodos ($V_{d_{max}}$):

$$V_{d_{max}} = \sqrt{2} * V_{in_{max}} = \sqrt{2} * 311 = 439,82 \text{ V} \quad (28)$$

Sendo $V_{in_{max}}$ o valor de tensão máxima na entrada no retificador.

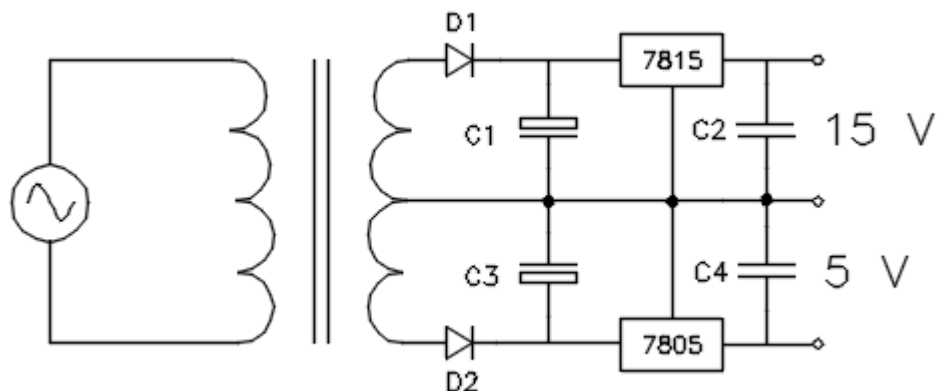
Foram escolhidos os diodos 6A6 que de acordo com o seu *datasheet* possuem tensão máxima reversa de 600 V, máxima tensão RMS de 420 V e corrente máxima de 6 amperes. Para a proteção contra a corrente de IN RUSH foi usado um NTC de 150 Ω na entrada do retificador.

3.2 CIRCUITO AUXILIAR DE ALIMENTAÇÃO

Para a alimentação do circuito integrado responsável pelo PWM do circuito e do circuito integrado microcontrolador foi confeccionado um circuito de fonte auxiliar com um transformador com um enrolamento primário que é conectado na mesma alimentação de entrada de 220 V e dois enrolamentos secundários: um enrolamento com saída para 5 V e 1 enrolamento com saída para 15 V. Com diodos D1 e D2 1N4148 para retificar, capacitores de filtro de entrada C1 e C3 nos valores de 100 μF ,

reguladores de tensão LM7805 e LM7815 e capacitores de saída C2 e C4 com valores de 100 nF como pode ser verificado na figura 24.

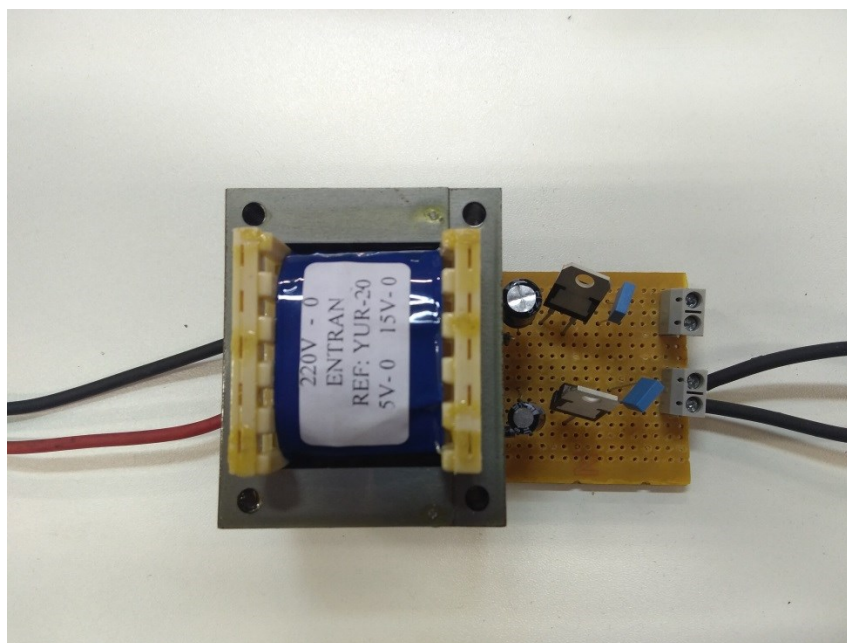
Figura 24 – Circuito Auxiliar



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na figura 25 é mostrada a imagem do pré-protótipo que foi usado para os testes.

Figura 25 – Protótipo do circuito auxiliar



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

3.3 CONVERSOR CC-CC BUCK BOOST ISOLADO (FORWARD)

Para o dimensionamento dos componentes para o conversor serão usados os dados contidos na tabela 2.

Primeiramente é escolhido o núcleo que será usado para a confecção do transformador através da equação 29:

$$A_e A_w = \frac{1,2 P_{out}}{K_p K_w J B f_s R_2} = \frac{1,2 * 110}{0,3 * 0,4 * 350 * 0,2 * 30000 * 0,8} = 6,55 \text{ cm}^4 \quad (29)$$

Sendo P_{out} a potência de saída, K_p o fator de utilização do primário, K_w o fator de utilização da área da janela do carretel do transformador, J a densidade de corrente, B a densidade de fluxo, f_s a frequência de chaveamento e R_2 o rendimento do conversor.

Consultando a tabela de núcleos do fabricante Thornton, foi escolhido o núcleo E-55 que possui área da seção do núcleo (A_e) de $3,54 \text{ cm}^2$.

Teoricamente o transformador do conversor Forward não necessita de entreferro, mas na prática precisou ser usado. Primeiro se calcula a energia acumulada no enrolamento primário durante a etapa de magnetização do transformador (ΔW):

$$\Delta W = \frac{P_{out}}{f_s R_2} = \frac{110}{30000 * 0,8} = 4,58 \text{ mJ} \quad (30)$$

E o valor do entreferro (δ) pode ser calculado através da equação 31, sendo A_e a área da seção transversal do núcleo e μ_o o valor da permeabilidade do ar:

$$\delta = \frac{2\mu_o \Delta W}{B^2 A_e} = \frac{2 * 1,25664^{-6} * 4,58^{-3}}{0,2^2 * 354} = 0,81 \text{ mm} \quad (31)$$

Como na montagem o entreferro ocupa os dois lados do núcleo, através da equação 32 é determinado quanto tem que ser colocado de cada lado:

$$lg = \frac{\delta}{2} = \frac{0,81^{-3}}{2} = 0,405 \text{ mm} \quad (32)$$

Próximo passo é determinar o número de espiras no enrolamento primário (N_p) com alguns valores obtidos anteriormente:

$$N_p = \frac{V_{in \min} D_{max}}{A_e B f_s} = \frac{129 * 0,4}{3,54^{-4} * 0,2 * 30000} = 28 \text{ espiras} \quad (33)$$

Sendo $V_{in \min}$ o valor da tensão mínima na entrada do conversor e D_{max} o valor da razão cíclica máxima. O cálculo das espiras do enrolamento secundário (N_s) é apresentado na equação 34 com V_d sendo a queda de tensão nos diodos:

$$N_s = 1,1 N_p \frac{(V_{out} + V_d D_{max})}{V_{in \min} D_{max}} = 1,1 * 28 * \frac{(220 + 1 * 0,4)}{129 * 0,4} = 115 \text{ espiras} \quad (34)$$

Para o cálculo do enrolamento terciário ou de desmagnetização (N_t) é usado o mesmo valor encontrado para o enrolamento primário:

$$N_t = N_p = 28 \text{ espiras} \quad (35)$$

Após o cálculo dos enrolamentos, pode-se calcular qual é a seção dos condutores e para isso é necessário a determinação da profundidade de penetração (Δ):

$$\Delta = \frac{15}{\sqrt{f_s}} = \frac{15}{\sqrt{30000}} = 0,87 \text{ mm} \quad (36)$$

Após consultar a tabela de fios de cobre que está no anexo é verificado que o fio 19 AWG satisfaz a condição de diâmetro especificado. Para o cálculo da seção do condutor do enrolamento primário primeiramente é necessário a determinação do valor da corrente de pico devido a magnetizante (I_p') que é apresentada na equação 37 e sendo Δi_L o valor da variação de tensão sobre o indutor de saída:

$$I_{p'} = \Delta iL \frac{Ns}{Np} = 0,05 * \frac{115}{28} = 0,205 A \quad (37)$$

A partir desse valor pode-se calcular a indutância magnetizante do primário (L_{mp}) e com dados encontrados anteriormente:

$$L_{mp} = \frac{V_{in \min} D_{max}}{f_s I_{p'}} = \frac{129 * 0,4}{30000 * 0,205} = 9,548 mH \quad (38)$$

Pode-se calcular a partir dos dados obtidos a corrente eficaz de primário apresentada na equação 39 onde I_o é o valor da corrente de saída:

$$I_{p_{ef}} = \sqrt{\left(I_o \frac{Ns}{Np}\right)^2 D_{max} + 2I_o \frac{Ns V_{in \min} D_{max}^2}{Np L_{mp} f_s} + \left(\frac{2V_{in \min}}{L_{mp}}\right)^2 \frac{D_{max}^3}{3f_s^2}} = 1,43 A \quad (39)$$

Pode-se encontrar a seção do condutor do enrolamento primário (S_p) com o valor da corrente eficaz do primário $I_{p_{ef}}$ encontrada dividida pela densidade de corrente J utilizada no projeto:

$$S_p = \frac{I_{p_{ef}}}{J} = \frac{1,43}{350} = 0,0041 cm^2 \quad (40)$$

Consultando a tabela de fios de cobre determina-se o uso do fio 20 AWG e por ter o valor menor do que o diâmetro máximo será utilizado somente um fio para esse enrolamento. Para se determinar a seção do condutor do enrolamento secundário é preciso primeiro encontrar o valor da corrente eficaz do secundário ($I_{s_{ef}}$) com os dados da potência de saída P_{out} e da tensão de saída V_{out} :

$$I_{s_{ef}} = \frac{P_{out}}{\sqrt{2} V_{out}} = \frac{110}{\sqrt{2} * 220} = 0,354 A \quad (41)$$

Com esse valor encontrado, pode-se determinar o valor da seção do condutor do enrolamento secundário (S_s):

$$S_s = \frac{I_{sef}}{J} = \frac{0,354}{350} = 0,10 \text{ mm}^2 \quad (42)$$

Consultando-se a tabela de fios de cobre que está no anexo encontra-se mais adequado para o uso nesse enrolamento o fio AWG 27.

Para encontrar a seção do condutor no enrolamento terciário determina-se primeiramente a corrente de pico (I_t):

$$I_t = \frac{V_{in \min} D_{max} N_p}{L_m p f_s N_t} = \frac{129 * 0,4 * 28}{0,00955 * 30000 * 28} = 0,205 \text{ A} \quad (43)$$

Em seguida, como demonstrado na equação 44, encontra-se o valor da indutância magnetizante do terciário (L_{mt}) com os valores encontrados para o número de espiras do enrolamento terciário N_t , a corrente de pico I_t encontrada e os valores da densidade de fluxo B utilizada:

$$L_{mt} = \frac{N_t B A_e}{I_t} = \frac{28 * 0,2 * 3,54}{0,205} = 9,65 \text{ mH} \quad (44)$$

Com esses valores pode-se determinar a corrente eficaz de terciário (I_{tef}) que será importante para a se determinar a correta seção do fio a ser utilizado:

$$I_{tef} = \frac{V_{in \min}}{f_s L_{mt}} \sqrt{\frac{D_{max}^3}{3}} = \frac{129}{30000 * 9,65^{-3}} * \sqrt{\frac{0,4^3}{3}} = 0,074 \text{ A} \quad (45)$$

Depois de calculada a corrente eficaz de terciário I_{tef} divide-se esse valor pela densidade de corrente J utilizada e encontra-se o valor da seção do enrolamento terciário (S_t):

$$S_t = \frac{I_{tef}}{J} = \frac{0,074}{350} = 0,02 \text{ mm}^2 \quad (46)$$

Condição que pode ser atendida, de acordo com a tabela de fios de cobre que está no anexo, pelo fio AWG 33.

Para a confecção do transformador é importante também saber o valor da indutância magnetizante do secundário e para a determinação desse valor primeiro tem ser calculado o valor da corrente de pico no enrolamento secundário (I_s) que é apresentado na equação 47:

$$I_s = I_o + \frac{\Delta iL}{2} = 0,5 + \frac{0,05}{2} = 0,525 A \quad (47)$$

Através da equação 48 é calculado o valor da indutância magnetizante do secundário (L_{ms}):

$$L_{ms} = \frac{N_s B A_e}{I_s} = \frac{115 * 0,2 * 3,54}{0,525} = 15,509 mH \quad (48)$$

Para se determinar qual *MOSFET* será utilizado, é necessário encontrar os valores da corrente de pico e da corrente eficaz. No caso, a corrente de pico (I_t) é a mesma que do enrolamento primário:

$$I_t = I_s \frac{N_s}{N_p} + \frac{\Delta i L N_s}{2 N_p} = 0,525 * \frac{115}{28} + \frac{0,05 * 115}{2 * 28} = 2,259 A \quad (49)$$

A corrente eficaz na chave é a mesma do enrolamento primário no valor de 1,43 A. A tensão máxima sobre a chave ($V_{t\ max}$) pode ser obtida utilizando os valores de tensão de entrada máxima $V_{in\ max}$, o número de espiras do enrolamento primário N_p e número de espiras do enrolamento terciário N_t :

$$V_{t\ max} = V_{in\ max} + V_{in\ max} \frac{N_p}{N_t} = 311 + 311 * \frac{28}{28} = 713,65 V \quad (50)$$

A chave escolhida é a FQPF8N80C que possui as seguintes características de acordo com o seu datasheet:

- $V_{DS} = 800 V$
- $I_D = 8 A$
- $R_{DSon} = 1,55 \Omega$
- $R_{tjc} = 2,1 \text{ }^\circ\text{C/W}$
- Máxima tensão entre *DRAIN* e *SOURCE*;
- Corrente eficaz direta;
- Resistência de condução direta;
- Resistência térmica entre junção e cápsula.

Para se determinar qual será o diodo de desmagnetização, usa-se como corrente de pico o mesmo valor que do enrolamento terciário, no caso 0,205 A. A corrente eficaz é a mesma encontrada para o enrolamento terciário no valor de 0,074 A.

Para se encontrar o valor da corrente média no diodo de desmagnetização primeiro se calcula o tempo de desmagnetização do transformador (T_o) através da equação 51:

$$T_o = \frac{LmtIt}{V_{in\ min}} = \frac{0,00965 * 2,259}{129} = 13,48 \mu s \quad (51)$$

Com esse valor do tempo T_o encontrado, calcula-se a corrente média no diodo de desmagnetização (I_{ddm}):

$$I_{ddm} = \frac{V_{in\ min} T_o^2}{Lmt2T} = \frac{129 * (13,48^{-6})^2}{0,00965 * 2 * 33,33^{-6}} = 0,042 A \quad (52)$$

Para se determinar precisamente qual diodo a ser utilizado, calcula-se máxima tensão reversa ($V_{dd\ max}$):

$$V_{dd\ max} = V_{in\ max} + V_{in\ max} \frac{Nt}{Np} = 311 + 311 * \frac{28}{28} = 713,65 V \quad (53)$$

Neste caso pelos valores encontrados e consultando o datasheet foi utilizado o diodo UF4007 com as seguintes características:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| - $V_{RRM} = 1000 V$ | - Máxima tensão reversa; |
| - $I_F = 1 A$ | - Corrente eficaz direta; |
| - $I_p = 30 A$ | - Corrente de pico; |
| - $T_{j\ max} = 150 ^\circ C$ | - Máxima temperatura de junção; |

A corrente de pico no diodo de saída D1 é a mesma encontrada para o enrolamento secundário no valor de 0,525 A. A corrente eficaz também é a mesma

do enrolamento secundário no valor de 0,354 A. A corrente média (I_{d1m}) pode ser calculada através da equação 54:

$$I_{d1m} = I_o D_{max} = 0,5 * 0,4 = 0,2 A \quad (54)$$

Na equação 47 é apresentada a forma de se calcular a máxima tensão reversa sobre o diodo D1 ($V_{d1 max}$):

$$V_{d1 max} = V_{in max} \frac{N_s}{N_t} = 311 * \frac{115}{28} = 1465,53 V \quad (55)$$

Para o cálculo do diodo de circulação D_2 , é usado como corrente de pico a mesma corrente encontrada para o enrolamento secundário no valor de 0,525 A. A corrente média (I_{d2m}) é encontrada através de:

$$I_{d2m} = I_o \frac{T_o}{T} = 0,5 * \frac{13,48^{-6}}{33,33^{-6}} = 0,20 A \quad (56)$$

A máxima tensão reversa no diodo D_2 ($V_{d2 max}$) pode ser encontrada com os valores da tensão de entrada máxima $V_{in max}$, do número de espiras do enrolamento secundário N_s e do número de espiras do enrolamento primário N_p :

$$V_{d2 max} = V_{in max} \frac{N_s}{N_p} = 311 * \frac{115}{28} = 1465,53 V \quad (57)$$

3.4 MALHA DE CONTROLE

Para esse projeto em estudo o conversor FORWARD não possui indutor e nem capacitor de saída pelo fato que como o circuito será ligado diretamente na bobina de campo do gerador, essa já apresenta valores de indutância e resistência.

Para se obter alguns valores do gerador síncrono foi feito um ensaio com o gerador a vazio para se obter a resistência do enrolamento de campo.

Foi feito a injeção de valores de tensão contínua na bobina de campo do gerador e medido a corrente de campo que serve para se obter o valor da

resistência da bobina de campo e os resultados para a corrente de campo podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3 – Determinação da resistência da bobina de campo

Tensão Aplicada (V)	Corrente de campo (mA)
20	23,1
30	34,2
40	46
50	57,3
60	68,6
70	80,4
80	92
90	102,8
100	114,4

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com esses valores pode ser calculada a resistência de campo para cada medição e no final se obter um valor médio como pode ser observado na tabela 4.

Tabela 4 – Determinação da resistência da bobina de campo

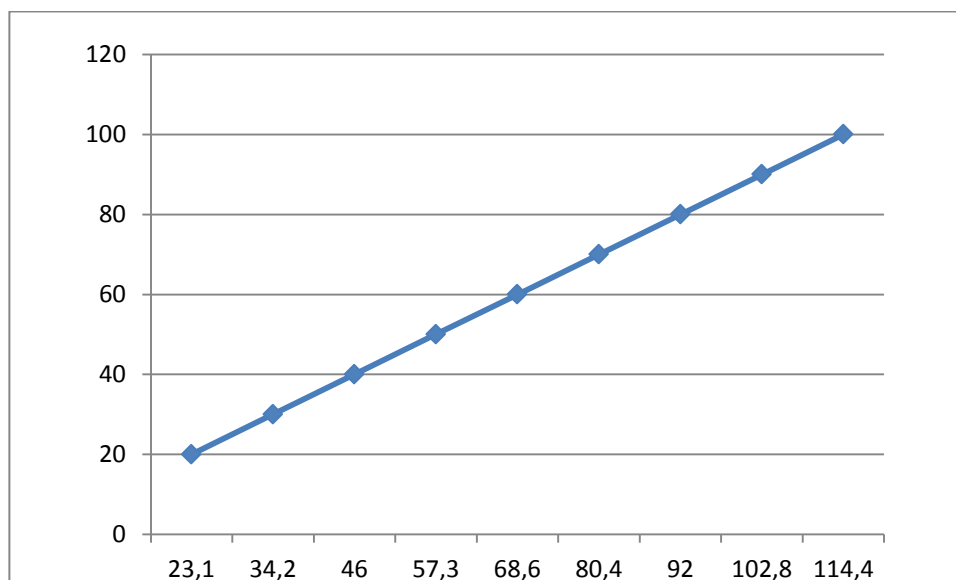
Tensão Aplicada (V)	Resistência de campo (Ω)
20	865,80
30	877,19
40	869,57
50	872,60
60	874,64
70	870,65
80	869,57
90	875,49
100	874,13
Valor Médio	872,18

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com os dados obtidos com a tensão de campo VF e a corrente de campo IF pode-se confeccionar o gráfico da figura 26 que mostra que a resistência do

enrolamento de campo apresenta um comportamento linear no decorrer do tempo e que pode ser confirmado pelos resultados da tabela 4.

Figura 26 – Gráfico VF x IF



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Foi medida a tensão de linha do gerador e o valor encontrado foi 428V para uma tensão de campo aplicada de 218V para o gerador trabalhando a vazio. Conectando três reostatos com resistência setada em 300Ω foi encontrada uma tensão de linha de 259V e uma corrente de 0,44A.

Com os valores medidos e alguns cálculos obteve-se todos os parâmetros do gerador necessários para o cálculo da malha de controle que pode ser observado na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros do gerador síncrono

	Descrição	Valor
LA	Indutância da bobina da armadura	110mH
RA	Resistência da bobina da armadura	4,52 Ω
RF	Resistência da bobina de campo	872,18 Ω
LF	Indutância da bobina de campo	1,11mH
ZL	Carga utilizada	300 Ω

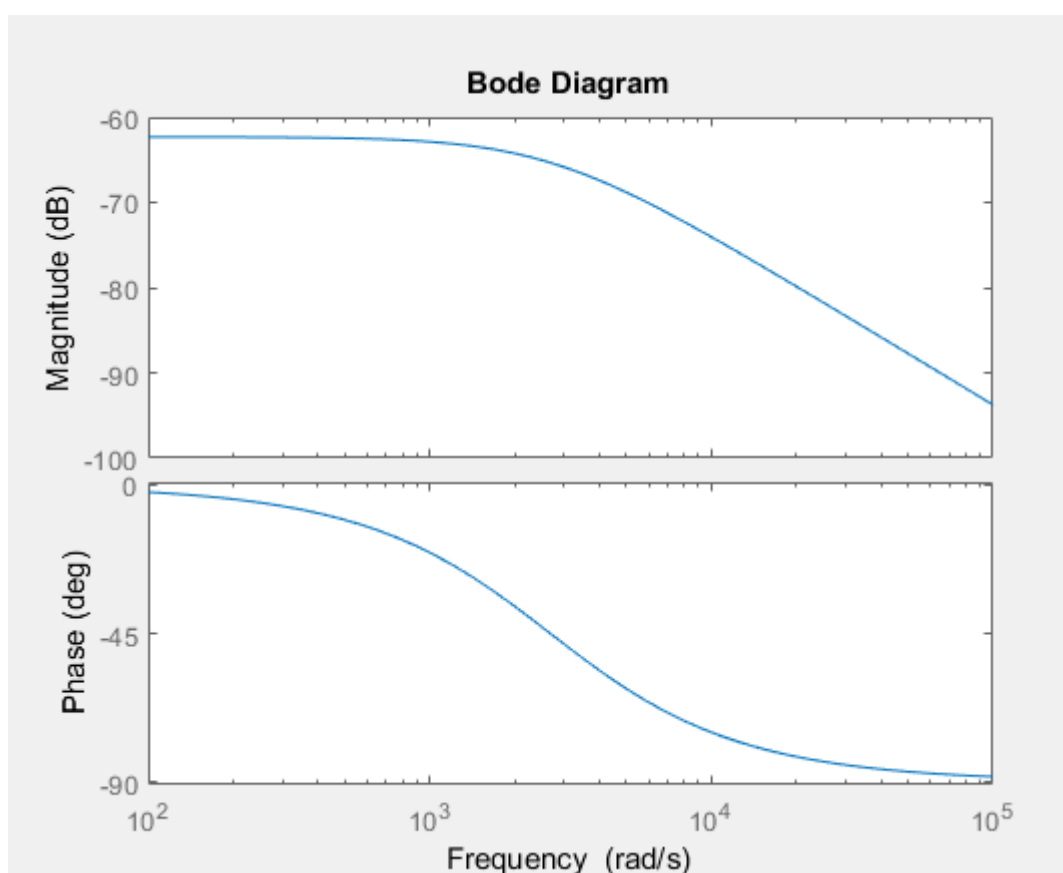
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com os valores obtidos e aplicados na equação 18 é possível determinar a função de transferência do gerador síncrono:

$$G(s) = \frac{0,0035}{s + 2678,36} \quad (58)$$

Com ajuda do software *MATLAB* pode ser plotado o gráfico da resposta em frequência do circuito em malha aberta como pode ser observado na figura 27.

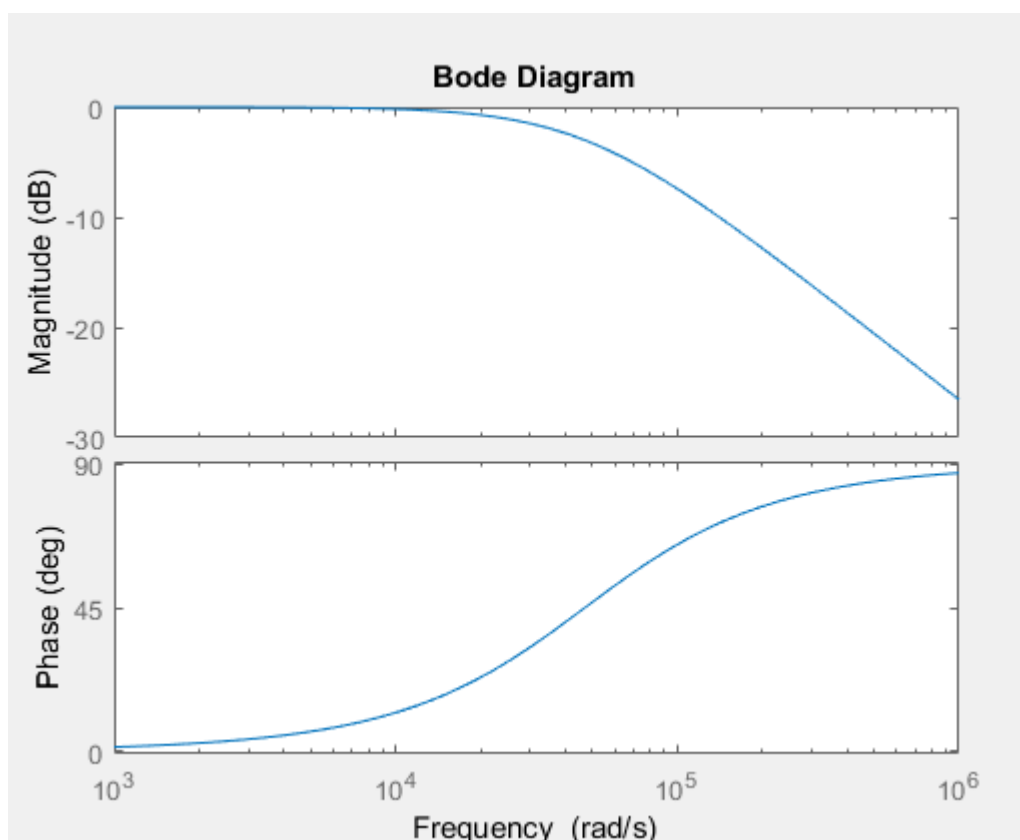
Figura 27 – Resposta em frequência do circuito em malha aberta



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com o circuito em malha fechada é refeita a função de transferência e calculado os componentes do compensador PI apresentado na figura 22 e encontrado os valores de 274896Ω para R2, 12Ω para R1 e 1,40nF para C. A princípio serão usados valores comerciais para R2 de 270kΩ e 1nF para C.

Como um dos objetivos do compensador é ter uma defasagem positiva é possível verificar uma boa melhora após a inserção do mesmo na malha de controle.

Figura 28 – Resposta em frequência do circuito em malha fechada

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

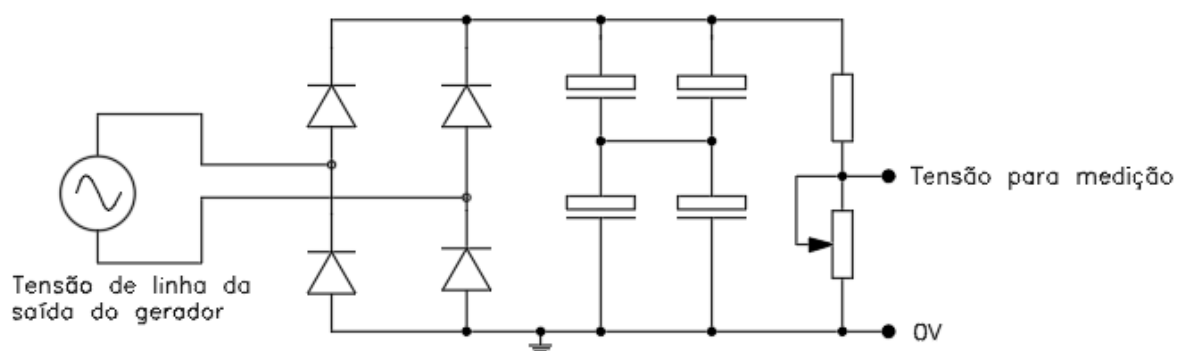
Para a confirmação do resultado simulado e para os devidos acertos em componentes do compensador é necessário o teste diretamente no gerador e fica como sugestão de um trabalho futuro.

3.5 MEDIÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE

3.5.1 Tensão

Para a medição de tensão será amostrado um valor diretamente de duas fases da saída do gerador conhecida como tensão de linha e enviado para um retificador. Depois de transformado para um valor CC, será aplicado em um divisor resistivo que irá enviar um valor adequado para um microcontrolador que através de programação interna irá converter esse valor e enviar para um display de cristal líquido.

Figura 29 – Sensor de corrente de efeito HALL



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Como a saída do gerador é trifásica, foi considerada para o projeto uma tensão de linha máxima de 500V. Após alguns cálculos os componentes a serem utilizados estão na tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Componentes utilizados

Quantidade	Componente	Valor
4	Diodo	1N4007
4	Capacitor	220 uF/250 V
1	Resistor	150k / 2W
1	Trimpot	10k

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

3.5.2 Corrente

Para a medição de corrente será usado um sensor de corrente de efeito HALL apresentado na figura 30. Esse sensor tem como característica fornecer em sua saída 185mV para cada ampere que é lido na entrada. Esse valor é enviado para o microcontrolador que converte esse valor através de programação interna e envia o resultado para um display de cristal líquido.

Figura 30 – Sensor de corrente de efeito HALL



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

3.6 SIMULAÇÃO DO PROJETO

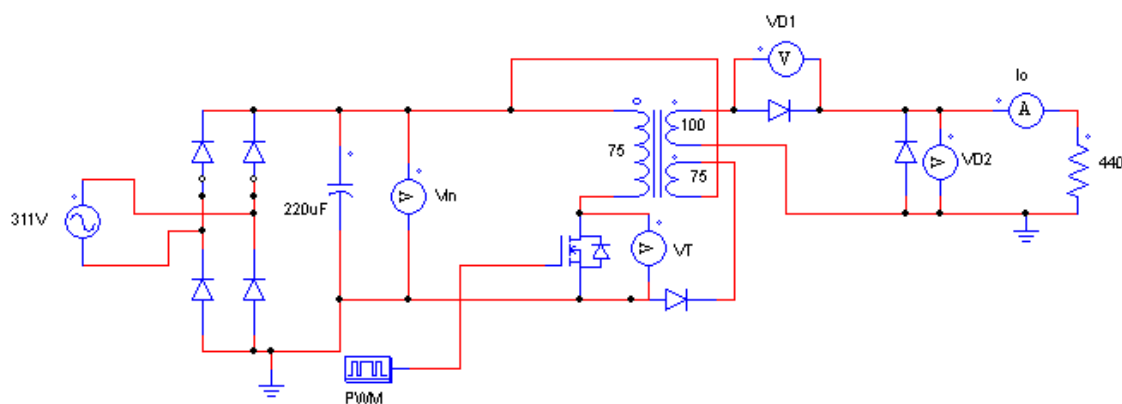
Um dos problemas encontrados após o cálculo dos componentes foi a tensão elevada encontrada nos diodos D1 e D2 devido aos valores iniciais usados para as espiras do transformador. Com um ajuste manual feito com a ajuda do software de simulação PSIM, foi alterado o número de espiras do transformador, para se obter menor tensão em cima dos componentes que além de ser mais seguro para se realizar os testes, ficou mais fácil de encontrar componentes com valores comerciais para a compra.

Os enrolamentos ficaram com valor de 75 espiras para o primário e o terciário e com 100 espiras para o enrolamento secundário. Com esses ajustes, a tensão sobre os diodos ficou no máximo em 600 V e assim foi utilizado o diodo UF4007 para D1 e D2.

Como mencionado anteriormente, o conversor FORWARD do projeto em questão não possui indutor e nem capacitor de saída pelo fato que como o circuito será ligado diretamente na bobina de campo do gerador, essa já apresenta valores de indutância e resistência.

Na figura 31 é apresentado o esquema elétrico do circuito a ser simulado no software PSIM sem a malha de controle.

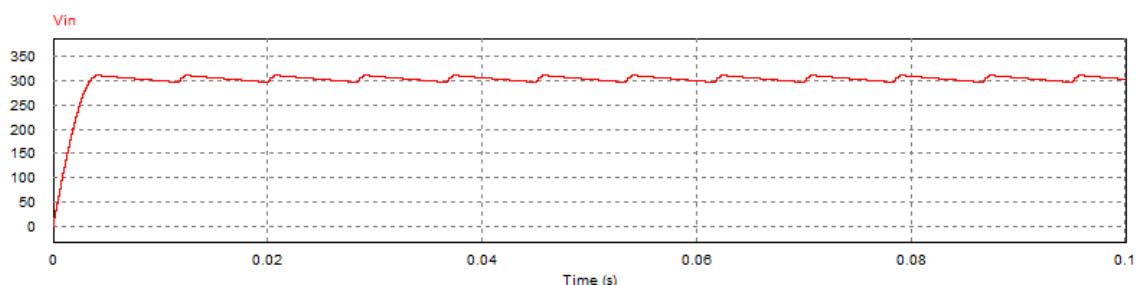
Figura 31 – Esquema elétrico do circuito



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na figura 32 é possível verificar a tensão de entrada do conversor com valor de pico em 311 V.], valor esse que pode ser calculado multiplicando os 220V da entrada por raiz de 2.

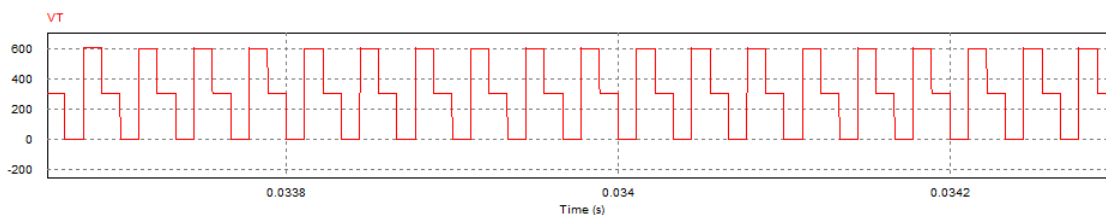
Figura 32 – Tensão de entrada do conversor



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A tensão sobre a chave é mostrada na figura 33 e seu valor médio ficou em torno de 300 V. O resultado gráfico é usual em componentes que operam no chaveamento em circuitos.

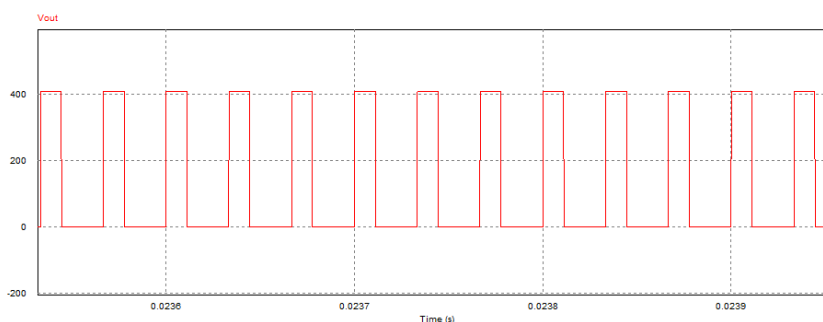
Figura 33 – Tensão sobre o MOSFET



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Foi feita a simulação baseado nos valores de tensão máxima de 311 V e com a carga na saída com valor nominal de 440 Ω . Através da figura 34 é possível constatar que o valor médio da tensão de saída atingiu os valores calculados.

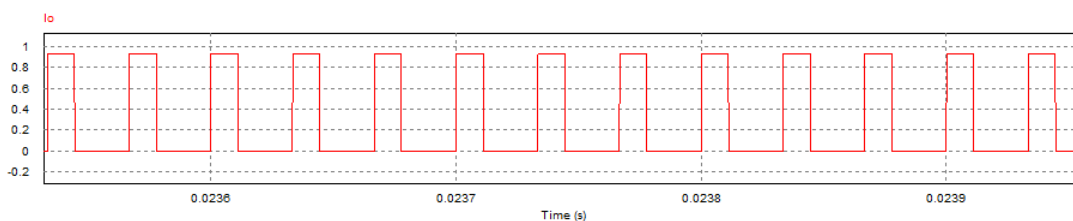
Figura 34 – Tensão de saída do conversor



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Outro gráfico importante para o projeto em estudo é o da corrente de saída e que é mostrado na figura 35. Foi encontrado em simulação o valor médio de 0,52 A bem próximo de 0,5 A calculado.

Figura 35 – Corrente de saída do conversor



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Foi encontrado em simulação o valor médio de 0,52 A bem próximo de 0,5 A calculado.

3.7 MONTAGEM E TESTES DO PRÉ-PROTÓTIPO

O retificador e o conversor foram montados na mesma placa do pré-protótipo que é apresentada na figura 36. Os componentes utilizados são os encontrados na parte de projeto.

Figura 36 – Protótipo de teste

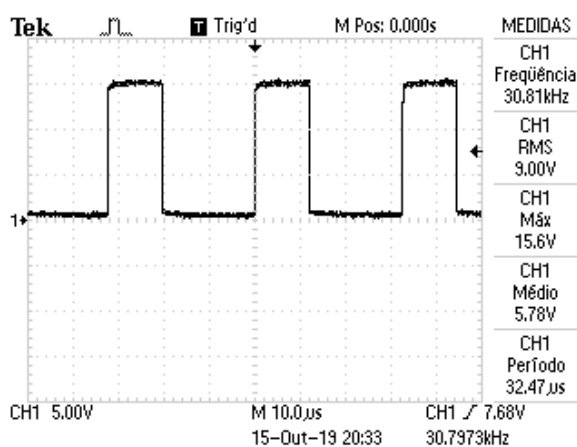


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A primeira parte a ser testada é o circuito do PWM, este que fornece um sinal quadrado com frequência de 30 kHz para o *MOSFET* e com a ajuda de um osciloscópio apresentou a forma de onda observada na figura 37.

Na figura a razão cíclica esta praticamente no máximo e foi necessário reajustá-la quando conectado ao conversor. O resultado obtido era o esperado e importante para o funcionamento do *MOSFET* que usa esse sinal para o chaveamento dentro do circuito do conversor.

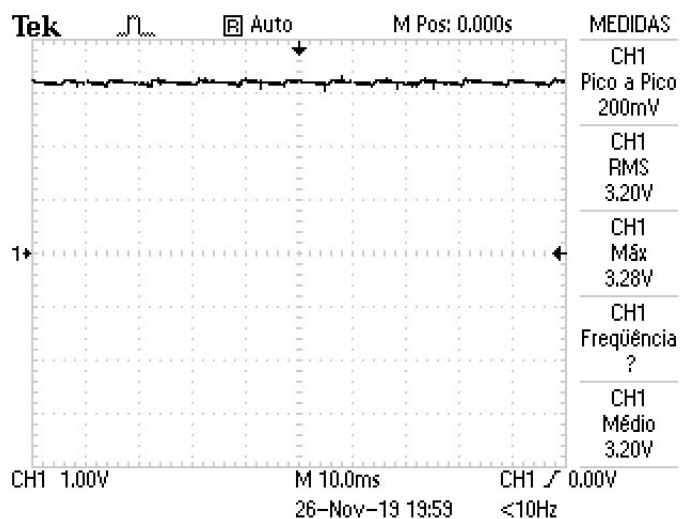
Figura 37 – Forma de onda do PWM



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Para as próximas medições foi usada outra ponta de prova para osciloscópio com capacidade de medição de até 1000 V e com relação de medida de 100:1. Assim foi possível a medição da tensão de saída do retificador que ficou bem próximo do valor usado nos cálculos e que é mostrado na figura 38.

Figura 38 – Tensão de saída do retificador



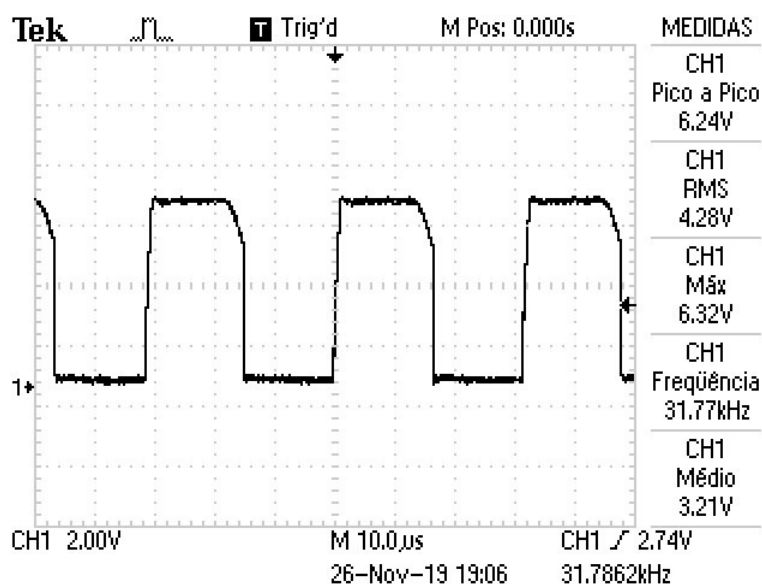
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Como a potência de saída do conversor foi calculada em 110 W e resistência nominal de 440 Ω, foram usados 2 resistores de 1kΩ em paralelo e com potência de 100 W cada para se aproximar do valor desejado. Com isso pode-se

conectar o circuito completo e com auxílio de um *VARIAC*, aumentando-se aos poucos a tensão de entrada até chegar ao valor de 220 V.

Um componente muito importante para ser monitorado é o *MOSFET* e sua tensão máxima encontrada foi de 624 volts, bem próxima do valor de simulação de 600 V. Sua forma de onda é mostrada na figura 39.

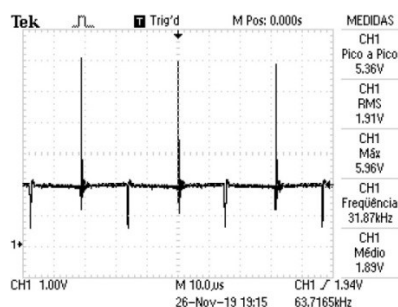
Figura 39 – Tensão sobre o MOSFET



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A tensão de saída do conversor medida sobre a carga ficou abaixo do esperado em laboratório na faixa de 189 V e que é mostrada na figura 40, pode ser explicado pelo fato da resistência da carga não ser o valor exato além de possíveis perdas nos enrolamentos do transformador.

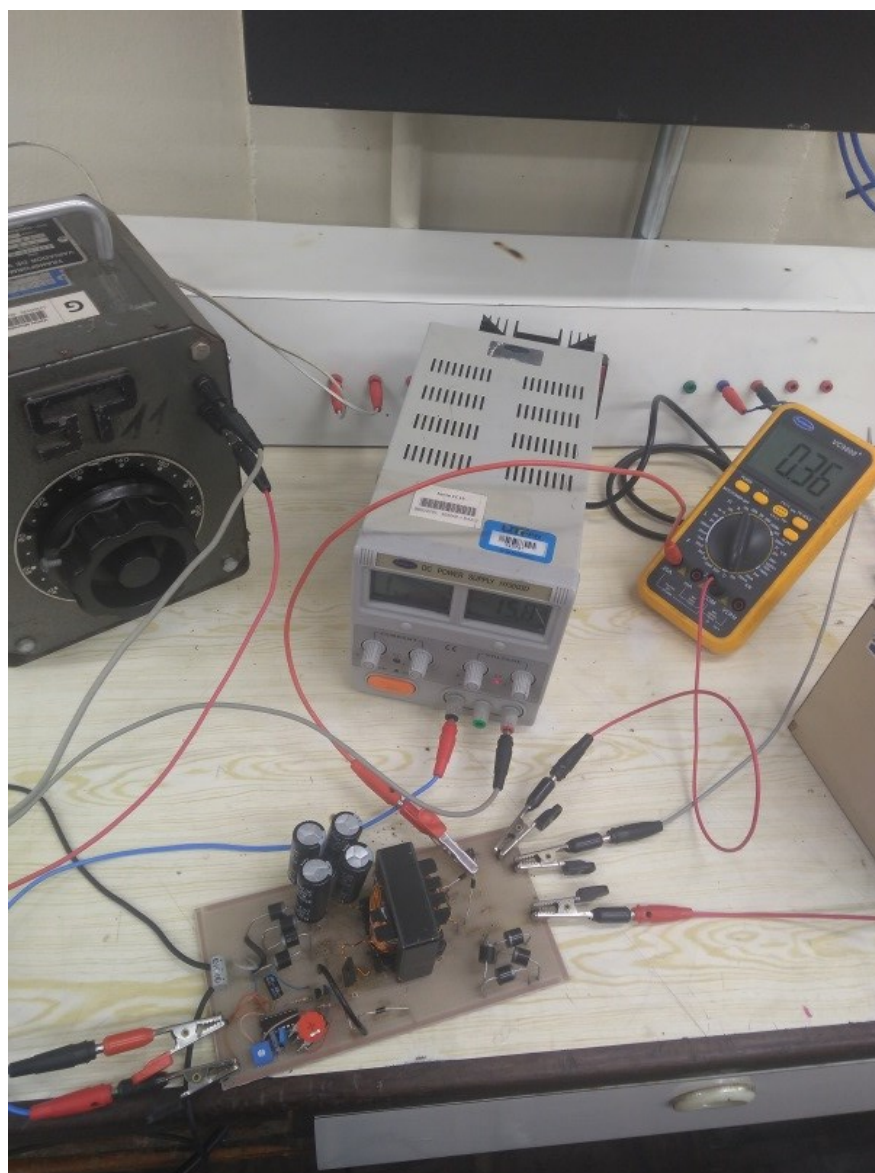
Figura 40 – Tensão de saída sobre a carga



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na figura 41 é apresentada uma imagem dos testes em laboratório aonde a corrente de campo chegou a 0,36 A com a entrada de tensão em 220V. Valor próximo do esperado considerando o valor das resistências utilizadas.

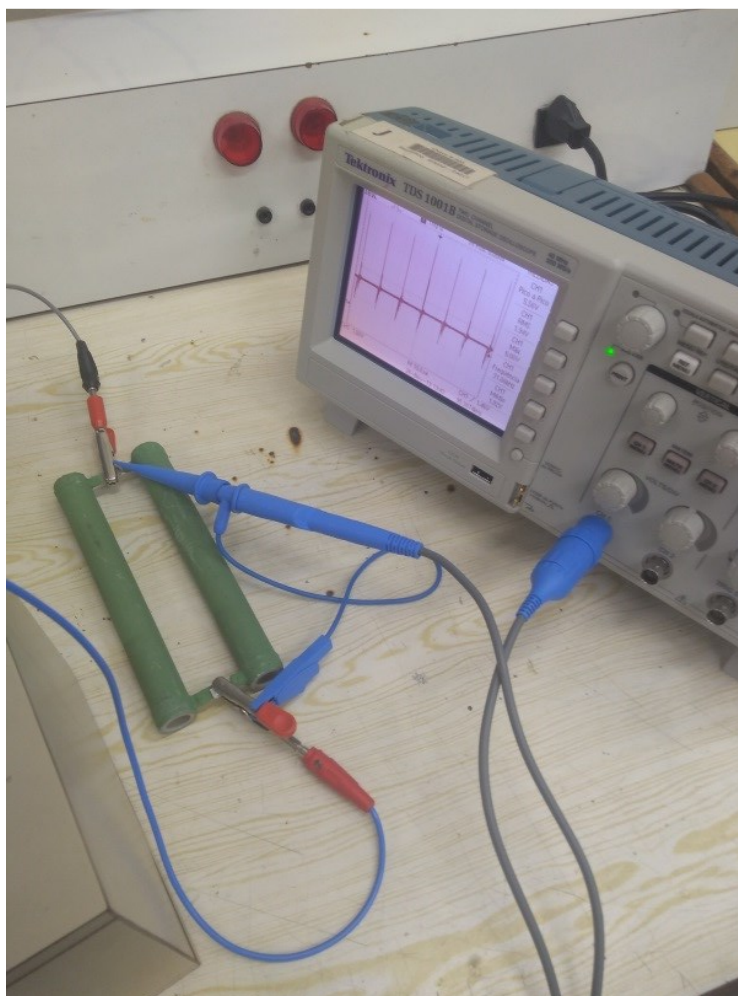
Figura 41 – Testes de laboratório



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na figura 42 é apresentada a medição da tensão de saída sobre a carga, com a ponta especial para osciloscópio com capacidade de medição de até 1000V.

Figura 42 – Tensão de saída sobre a carga



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Como os resultados obtidos foram perto do esperado, o próximo passo é o teste do pré-protótipo conectado ao gerador.

3.8 TESTES NO GERADOR

Antes de se conectar o protótipo ao gerador foram feitos alguns testes para conhecê-lo melhor. Ligando-se a máquina primária e alimentando a bobina de campo do gerador através de um VARIAC e uma ponte retificadora, foram encontrados os valores para corrente de campo de 0,2 A, tensão de linha na saída de 428 V. Usando como carga três lâmpadas incandescentes de 100 W na saída foi medida a tensão de linha de 356 V. Mudando a carga para três reostatos de 300 Ω cada, ajustados para o valor máximo, a tensão de linha diminuiu para 259 V.

Conectando o pré-protótipo ao gerador e através de um VARIAC para controlar a tensão de entrada, foi atingido o valor de 225 V e uma corrente de campo de 0,21A. Com essa confirmação o próximo passo é o projeto da placa de circuito impresso, a montagem e o teste.

4 PROTÓTIPO FINAL

Após a verificação do funcionamento do pré-protótipo conectado ao gerador é possível a confecção da placa de circuito impresso do projeto final. Com o auxílio do software Proteus foi feito o projeto da placa e após a montagem de todos os componentes, o resultado final é apresentado figura 43.

Pela impossibilidade atual de entrar nas dependências da universidade por causa da pandemia de COVID-19, a placa final será dividida por setores e esses testados individualmente cada um em ambiente caseiro. Com o auxílio de um autotransformador 220/127V, um Variac monofásico 220V, de uma fonte CC, um mini osciloscópio digital, um multímetro e um alicate amperímetro serão testados o bloco de PWM, responsável pela geração do sinal de chaveamento do *MOSFET*, o circuito que contém o retificador e o conversor FORWARD, a parte de monitoramento da tensão de linha da saída do gerador e da corrente de campo que inclui a visualização através de um Display LCD e o teste e calibração do circuito de redução do valor da tensão de linha da saída do gerador. A parte da malha de controle ficou prevista no projeto da placa mas fica como sugestão para um projeto futuro os testes e os ajustes dos valores ideais dos componentes.

Figura 43 – Protótipo final montado

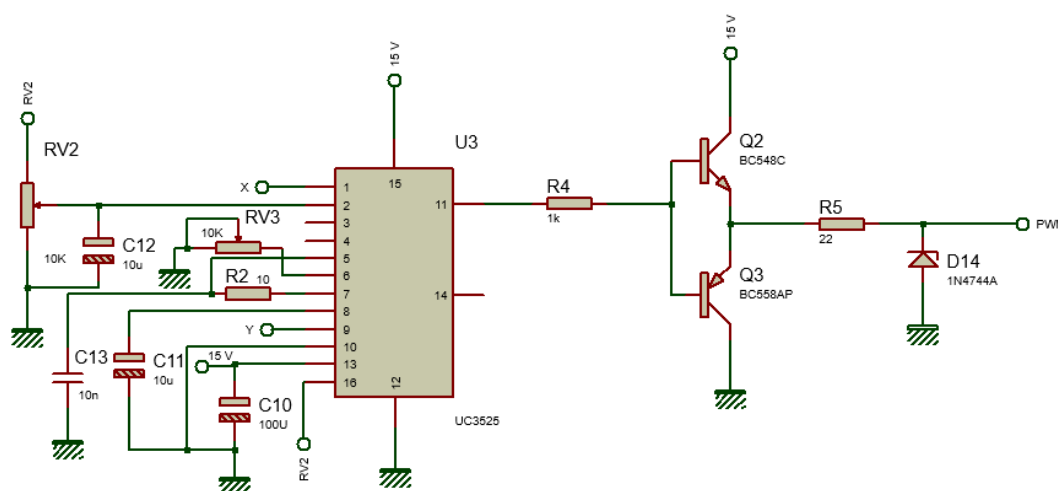


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.1 CIRCUITO DE PWM

Na figura 44 é apresentado o esquema elétrico do circuito montado com o componente principal sendo o circuito integrado SG3525 e com seus componentes periféricos necessários de acordo com o seu datasheet. Possui dois trimpots para ajustes, o RV2 muito utilizado para o controle da tensão de referência interna para o uso na malha de controle e o RV1 que vai ser utilizado para a definição da frequência de chaveamento do circuito. Outro componente a ser destacado é o diodo zener de 15V e 2W que através dele o sinal será aplicado ao terminal do MOSFET.

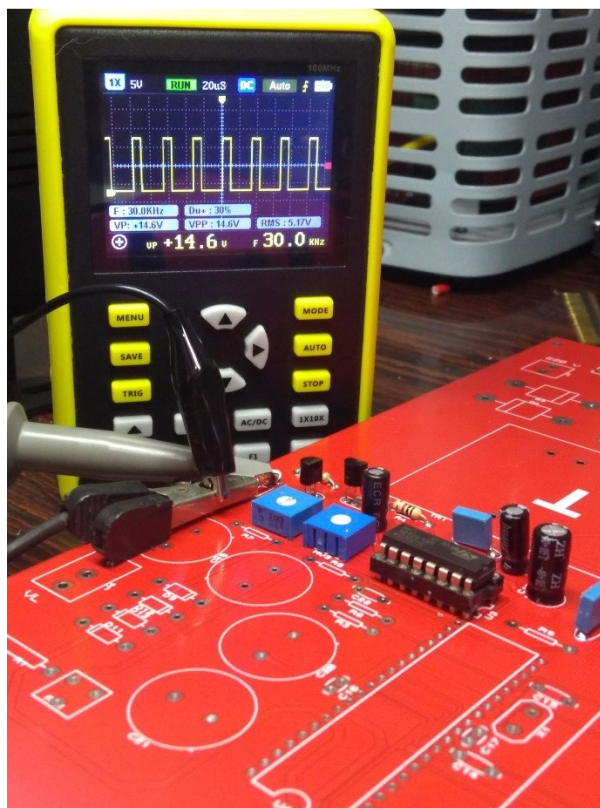
Figura 44 – Esquema elétrico do PWM



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

O circuito foi testado e feito o ajuste no trimpot RV3 para a frequência de chaveamento ficar em 30kHz de acordo com a figura 45.

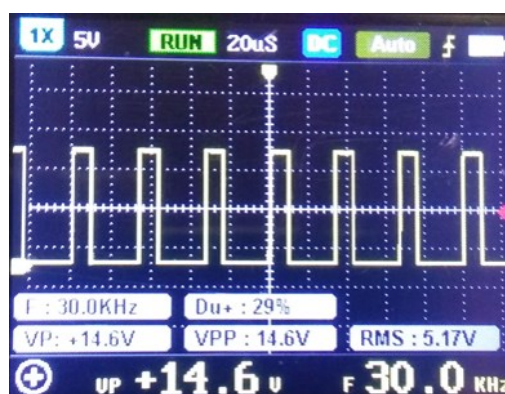
Figura 45 – Forma de onda na saída do circuito de PWM



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

O resultado foi o esperado e os valores obtidos podem ser observados na figura 46 , onde através de RV2 pode ser ajustado o ciclo de trabalho do circuito em torno de 0,3 , valor usado para os cálculos.

Figura 46 – Valores obtidos na saída do circuito de PWM

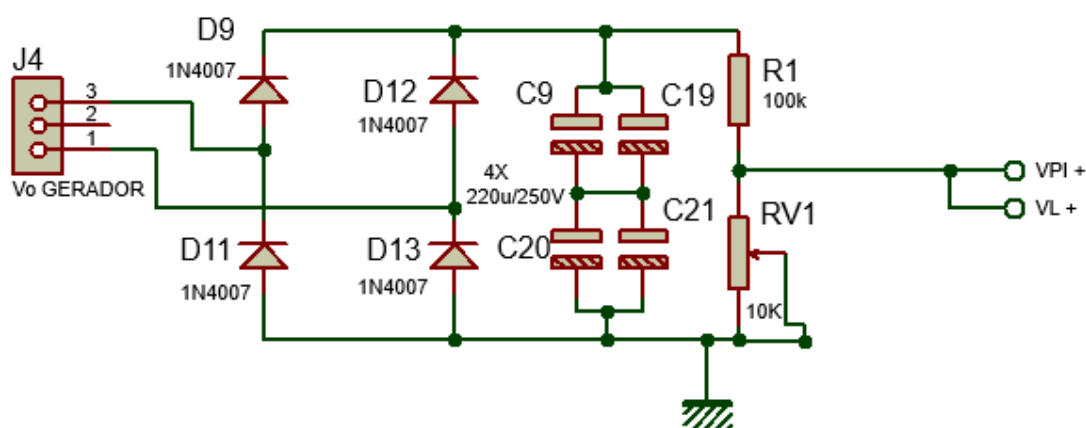


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.2 CIRCUITO DE CONTROLE DA TENSÃO DE LINHA

É responsável pelo monitoramento da tensão de linha na saída do gerador e através de um divisor resistivo, envia um valor de acordo com a tensão medida para um terminal do microcontrolador. Basicamente é um retificador com capacitor na saída projetado para medir até 500V na saída do gerador. Possui uma medição em VL + que é enviada para o microcontrolador e em VPI + que é enviado para o compensador PI da malha de controle. Os diodos são 1N4007, são usados quatro capacitores de 220uF por 250V para suportar a tensão de saída e o resistor do divisor é de 150kΩ por 2W. O esquema elétrico do circuito é apresentado na figura 47.

Figura 47 – Controle da tensão de linha



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Para a calibração da tensão VL+ que é enviada para o microcontrolador foi aplicada uma tensão de 100V e através de RV1 foi regulada uma tensão em torno de 1V pelo fato do projeto ter valor máximo de 500V e a entrada do microcontrolador suportar até 5V.

Figura 48 – Tensão de linha calibrada

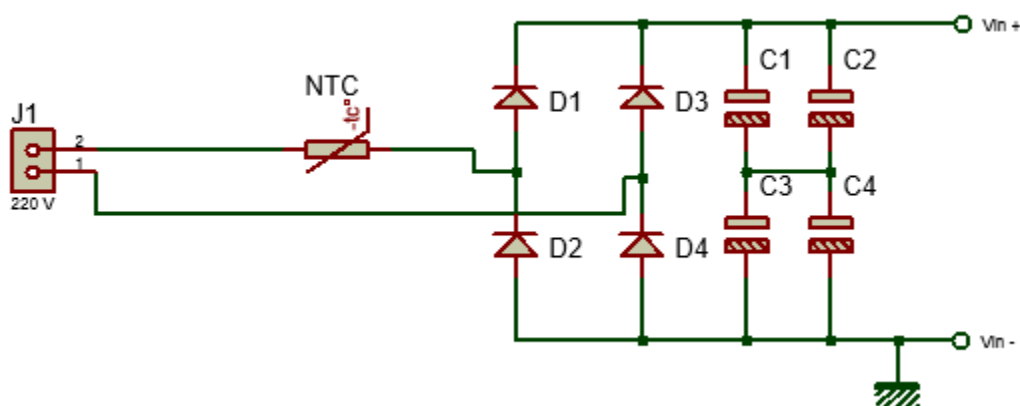
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na figura 48 é apresentado o valor conseguido no multímetro em torno de 1,0031V.

4.3 RETIFICADOR COM CONVERSOR CC-CC

O esquema elétrico do retificador é apresentado na figura 49. O circuito tem um NTC de proteção contra a corrente de *INRUSH* na entrada, diodos retificadores 6A6 e quatro capacitores de 220uF por 250V para conseguir suportar a tensão de entrada.

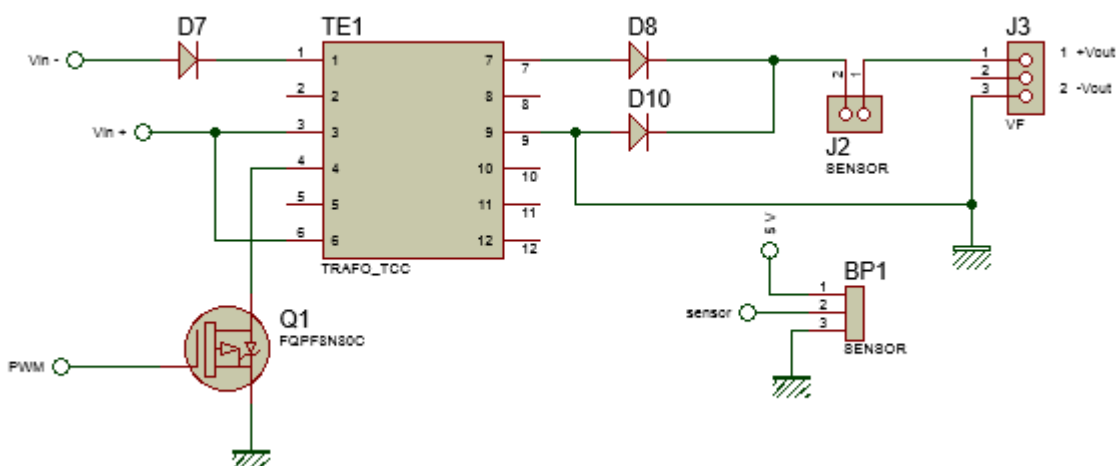
Figura 49 – Retificador de entrada



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A saída é conectada diretamente na entrada do conversor que pode ser observado na figura 50. O circuito possui um sensor de corrente na saída que a princípio será substituído pelo multímetro para a medição direta.

Figura 50 – Conversor FORWARD



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

O esquema de montagem com os equipamentos para a medição pode ser observado na figura 51. Na saída foram conectados dois resistores de 1k Ω e 100W em paralelo.

Figura 51 – Equipamentos e placa para a medição

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Foram conectados 2 resistores de $1k\Omega$ e $100W$ em paralelo como carga na saída. A tensão de entrada foi aumentada gradativamente através de um Variac monofásico 220V. O multímetro foi utilizado para medir a corrente de saída e o osciloscópio digital para medir a tensão e forma de onda na carga. A corrente de saída chegou a $0,39A$ de acordo com a figura 52 a tensão de saída na carga chegou a $127V$ e por se tratar de uma medição diretamente em uma resistência é aceitável considerando que o circuito foi projetado para fornecer uma tensão para a bobina de campo do gerador que possui uma reatância específica.

Figura 52 – Corrente de saída do conversor



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A forma de onda na carga medida pelo osciloscópio pode ser observada na figura 53.

Figura 53 – Forma de onda na carga.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A tensão de pico a pico chegou em 360V.

4.4 CIRCUITO DE MONITORAMENTO

É responsável pelo recebimento da tensão de linha e pela corrente de campo medidas. Possui um circuito integrado PIC como componente principal e apresenta os valores medidos em um display LCD 16 caracteres por 2 linhas.

Figura 54 – Display para visualização



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com duas chaves, uma para entrar no menu medição e outra para retornar ao principal como pode ser observado na figura 54. Tem um trimpot de ajuste do contraste do display e o circuito foi denominado como RT-21.

Para a visualização da tensão de linha, foi aplicada uma tensão de aproximadamente 50 V e o valor indicado no display ficou bem coerente com uma pequena variação de 0,53 % como pode ser observado na figura 55.

Figura 55 – Tensão de linha



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

5 CONCLUSÕES

Circuitos eletrônicos a maior parte das vezes apresentam problemas entre a teoria e a prática. No projeto em estudo os resultados foram satisfatórios mas que apresentou alguns problemas no decorrer do desenvolvimento do projeto. Foram feitos alguns ajustes a começar pelo número de espiras do transformador do conversor pois estava resultando em valores muito altos de tensão nos componentes de saída. Para se obter uma melhor segurança no manuseio do projeto e mais facilidade para se encontrar os componentes de forma comercial, foi escolhido diminuir o número de espiras mas mantendo a relação de transformação entre o enrolamento primário e o secundário.

Após o cálculo e montagem do pré-protótipo ficou visível que os resultados experimentais na prática ficaram muito perto dos valores teóricos, onde assim mesmo com todo o cuidado algumas ações resultaram na queima de alguns componentes.

Devido à pandemia os testes finais tiveram que ser realizados em casa onde foi criada uma bancada de teste com todos os equipamentos necessários. Foi preciso dividir o projeto em sub-circuitos e realizar os testes comparando os resultados obtidos com os valores calculados. Somente os resultados obtidos na saída do conversor ficaram um pouco abaixo que pode ser explicado pelo uso de uma carga com valor diferente do teórico mas que não exclui o funcionamento do mesmo.

Fica como sugestão de projeto futuro o dimensionamento de um circuito de controle que automaticamente regule a tensão sobre a bobina de campo de acordo com a carga conectada na saída do gerador e a confecção de uma caixa para a acomodação do circuito.

REFERÊNCIAS

- ALTINO, Luciana Marques. **Máquinas Síncronas: teoria e aplicações**. 1 ed. Recife: Ed. Universitária, 1984.
- BADIN, Alceu André. **Projeto – Conversores CC-CC isolados**. Notas de Aula, UTFPR, 2018.
- BADIN, Alceu André. **Retificadores**. Notas de Aula, UTFPR, 2018.
- BARBI, Ivo. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 1 ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2000.
- BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 4 ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2002.
- BARBI, Ivo. **Projetos de fontes chaveadas**. 1 ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2001.
- BRASIL, CIGRÉ. **Guia para Especificação de Sistemas de Excitação de Máquinas Síncronas**. Força Tarefa C2. 11, 2011.
- CALSAN, Marcelo. **Análise De Desempenho Dinâmico De Sistemas De Excitação Para Geradores Síncronos Em Plantas De Geração Distribuída**. Dissertação (Mestrado) - UNICAMP. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2011.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- COSTA, Antônio Simões. **Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos**, Notas de Aula, UFSC, 2002. [Online]. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/dincont/dc-cap5.pdf>.
- DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- EIA- Energy International Administration, **Key World Statistics**, 2017.
- MELLO, Luiz Fernando Pereira de. **Análise e Projeto de Fontes Chaveadas**. 1 ed. São Paulo: Érica, 1996.
- MELLO, Luiz Fernando Pereira de. **Projetos de Fontes Chaveadas**. 1 ed. São Paulo: Érica, 1987

.MORAIS, Luciano Cardoso de. **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e Tendências futuras**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015.

NEVES, R. V. A. **Controle de Tensão Terminal e Potência Reativa de um Grupo. Motor Gerador Diesel Conectado à Rede de Distribuição**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

NASAR, Sayed A. **Máquinas elétricas**. 1ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1984.

PETRY, Clóvis Antônio. **Conversores CC-CC (Buck e Forward)**. 2014. [Online]. Disponível em: http://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Conversores_Estaticos/Pos_2014/Apresentacao_Aula_05.pdf

POMÍLIO, José Antenor. **Retificadores Não Controlados e Fator De Potência**, Notas de Aula, UNICAMP, 2018. [Online]. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/ee833/Modulo1.pdf>.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência – Circuitos, dispositivos e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Makron Books, 1999.

Sala de Imprensa. (2021, Fev.), ANEEL. [Online]. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/meta-de-expansao-da-geracao-em-2021-e-de-4-790-48-mw/656877?inheritRedirect=false.

WEG. **Curso DT-5 – Características e Especificações de Geradores**. Rev.2017. [Online]. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>.

ANEXO

TABELA AWG DE FIOS

AWG	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Corrente (A)	Kg por Km	Res. Ohms/Km
0000	11,86	107,2	319		0,158
000	10,40	85,3	240		0,197
00	9,226	67,43	290 x		0,252
0	8,252	53,48	150		0,317
1	7,348	42,41	120	375	0,40
2	6,544	33,63	96	295	0,50
3	5,189	26,67	78	237	0,63
04	5,189	21,147	60	188	0,80
05	4,620	16,764	48	149	1,01
06	4,115	13,229	38	118	1,27
07	3,665	10,55	30	94	1,70
08	3,264	8,367	24	74	2,03
09	2,906	6,633	19	58,9	2,56
10	2,588	5,260	15	46,8	3,23
11	2,304	4,169	12	32,1	4,07
12	2,052	3,307	9,5	29,4	5,13
13	1,829	2,627	7,5	23,3	6,49
14	1,628	2,081	6,0	18,5	8,17
15	1,450	1,651	4,8	14,7	10,3
16	1,290	1,307	3,7	11,6	12,9
17	1,151	1,040	3,2	9,26	16,34
18	1,024	0,8235	2,5	7,3	20,73
19	0,912	0,6533	2,0	5,79	26,15
20	0,813	0,5191	1,6	4,61	32,69
21	0,724	0,4117	1,2	3,64	41,46
22	0,643	0,3247	0,92	2,89	51,5
23	0,574	0,2588	0,73	2,29	56,4
24	0,511	0,2051	0,58	1,82	85,0
25	0,455	0,1626	0,46	1,44	106,2
26	0,404	0,1282	0,37	1,14	130,7
27	0,361	0,1024	0,29	0,91	170,0
28	0,320	0,0804	0,23	0,72	212,5

29	0,287	0,0647	0,18	0,57	265,6
30	0,254	0,0507	0,15	0,45	333,3
31	0,226	0,0401	0,11	0,36	425,0
32	0,203	0,0324	0,09	0,28	531,2
33	0,180	0,0254	0,072	0,23	669,3
34	0,160	0,0201	0,057	0,18	845,8
35	0,142	0,0158	0,045	0,14	1069,0
36	0,127	0,0127	0,036	0,10	1338,0
37	0,114	0,0102	0,028	0,089	1700,0
38	0,102	0,0082	0,022	0,070	2152,0
39	0,089	0,0062	0,017	0,056	2696,0
40	0,079	0,0049	0,014	0,044	3400,0
41	0,071	0,0040	0,011	0,035	4250,0
42	0,064	0,0032	0,009	0,028	5312,0
43	0,056	0,0025	0,007	0,022	6800,0
44	0,051	0,0020	0,005	0,018	8500,0
45	0,0447	0,00157			
46	0,0399	0,00117			
47	0,0356	0,00086			
48	0,0315	0,00062			
49	0,0282	0,00045			
50	0,0251	0,00032			
51	0,0224	0,00023			
52	0,0198	0,00016			