

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

DANIEL PRADO DE CAMPOS

**REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA DE UM GRUPO MOTOR GERADOR
DIESEL COM ATUAÇÃO SIMULTÂNEA NA GERAÇÃO E NA CARGA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

DANIEL PRADO DE CAMPOS

**REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA DE UM GRUPO MOTOR GERADOR
DIESEL COM ATUAÇÃO SIMULTÂNEA NA GERAÇÃO E NA CARGA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. César Augusto Portolann

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA DE UM GRUPO MOTOR GERADOR DIESEL COM ATUAÇÃO SIMULTÂNEA NA GERAÇÃO E NA CARGA**, do aluno **DANIEL PRADO DE CAMPOS** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **40** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

César Augusto Portolann

Beatriz Antonina Fontana de Vargas

Ricardo Vasques de Oliveira

Dedicado aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todo o corpo docente com que tive contato e me deram a base do conhecimento necessária para construir meu caminho, especialmente ao meu professor orientador César Portolann, que incansavelmente realizou esforços para que um ambiente adequado a pesquisa fosse acessível a mim e a outros alunos.

Agradeço à minha família e principalmente aos meus pais por estarem sempre ao meu lado, dando suporte a todas minhas ações e decisões, à minha namorada Maiara que me auxiliou em momentos difíceis e amigos que sempre me ouviram e me aconselharam. Todos somaram minha força e motivação para nunca abaixar a cabeça.

E não menos importante gostaria de fazer uma apologia às grandes mentes pensantes da ciência e da filosofia, aos gigantes industriais e às mentes criativas que mostram para todos os seres humanos que somos seres dotados de um compromisso com o conhecimento e a liberdade.

“Nil sapientiae odiosus acumine nimio.” (Sêneca)

“Nós somos uma maneira do Cosmos conhecer a si mesmo.” (Carl Sagan)

RESUMO

CAMPOS, Daniel Prado. Regulação de Frequência de um Grupo Motor Gerador Diesel com Atuação Simultânea na Geração e na Carga. 2013. 72 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco 2013.

A crescente demanda de energia elétrica na matriz brasileira solicita que se amplie o escopo da geração de energia elétrica e que se promova inovação em novos aproveitamentos energéticos e micro geração. A qualidade de energia se destaca como o ponto chave, e a restrição à variação de frequência é o alvo do presente trabalho. A UTFPR disponibiliza um gerador síncrono de 25KVA acoplado à motor diesel que tem sido alvo de estudo em vários aspectos. Será discutido a maneira híbrida de regular frequência e proposto um dispositivo, que será utilizado para retirar dados sobre a frequência quando submetido a alívio ou ligamento de carga em degrau.

Palavras-chave: Gerador Síncrono, Motor Diesel, Modulação de Carga, Regulação de Frequência, Regulador Híbrido

ABSTRACT

CAMPOS, Daniel Prado. Frequency regulation of a Diesel Generator Set Performance with both Generation and Load Control. In 2013. 72 pages. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco 2013.

The growing demand for electricity in the Brazilian energy matrix calls a scope broad of the power generation and that promotes innovation in electrical energy generation and usage of micro generation. The power quality stands out as the key point, and frequency variation restriction is the target of this work. UTFPR provides a synchronous generator coupled to 25KVA diesel engine that has been studied in several aspects. Will be discussed hybrid frequency regulation, propose a device that is used to experiment, and extract data of frequency when submitted by load relief or step.

Keywords: Synchronous Generator, Diesel Engine, Load Control, Frequency Regulation, Hybrid Regulator

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética brasileira avaliada em 2010 e a previsão para 2020. ...	14
Figura 2 - Grupo gerador diesel.	18
Figura 3 - Motor a óleo Diesel em corte.	21
Figura 4 - Etapas do ciclo termodinâmico do motor a Diesel.	22
Figura 5 - Curvas Pressão-Volume do ciclo termodinâmico do motor a Diesel.....	24
Figura 6 - Esquema do gerador síncrono em corte.	25
Figura 7 - Ligação das bobinas: a) Diagrama ; b) Numeração dos terminais.....	27
Figura 8 - Diagrama de ligação das bobinas em zig-zag e estrela série.	28
Figura 9 - Representação do sistema de excitação segundo o fabricante.	29
Figura 10 - Esquema simplificado de um sistema de excitação brushless.....	29
Figura 11 - Interior do gerador Negrini: a) Detalhe da armadura e campo. b) Detalhe do conjunto do rotor.	30
Figura 12 - Representação em blocos do sistema integrado.	34
Figura 13 - Demanda de potência para carga Auxiliar e Principal.....	35
Figura 14 - Diagrama em blocos do modelo do regulador híbrido.....	36
Figura 15 - Modulação por Largura de Pulso.	38
Figura 16 - MOSFET Intensificação: a) Símbolo; b) Curvas típicas.	39
Figura 17 - Retificador trifásico e carga sendo chaveada por MOSFET.	40
Figura 18 - Grupo gerador com válvula manual.	41
Figura 19 - Movimento do braço da válvula.....	42
Figura 20 - Grupo gerador com válvula eletrônica.	43
Figura 21 - Circuito equivalente do motor de corrente contínua.....	44
Figura 22 - Esquemático do circuito de chaveamento da ponte H.	45
Figura 23 - Esquemático do circuito do comparador regenerativo.	47
Figura 24 - Diagrama de atuação da válvula.....	47
Figura 25 - Representação do processo de leitura do sinal.	50
Figura 26 - Microcontrolador Piccolo controlSTICK da Texas Instrument.	50
Figura 27 - Esquemático do circuito de condicionamento de sinal.....	51
Figura 28 - Esquemático do circuito do optoacoplador.	52
Figura 29 - Diagrama geral da simulação em blocos.	54
Figura 30 - Resposta da frequência do gerador ao ser submetido a um degrau de carga.	54

Figura 31 - Resposta da frequência com variação de 100% da carga, 2/3 e 1/3: a) ligamento em degrau; b) desligamento em degrau.	56
Figura 32 - Eletroválvula a) Detalhe do mecanismo; b) Acionamento manual.	58
Figura 33 - Protótipos dos circuitos: a) Condicionamento; b) Optoacoplado; c) Ponte H; d) Degraus de carga; e) Comparador regenerativo.	59
Figura 34 - Bancada de: a) Retificador, MOSFET e carga auxiliar; b) Leitura e condicionamento.	60
Figura 35 - a) Banco de cargas resistivas de 1KW cada. b) Carga resistiva com haletas.....	60
Figura 36 - Oscilografia do sinal de chaveamento para frequências simuladas de 60, 61 e 59 Hz.	61
Figura 37 - Oscilografia da: a) Tensão trifásica retificada e b) Chaveada pelo MOSFET.	62
Figura 38 - Frequência na etapa de aquecimento da máquina.	63
Figura 39 - Frequência gerada em função do tempo para dois degraus de carga consecutivos de 3 KW e 6KW.	64
Figura 40 - Atuação dá válvula em função do tempo	64
Figura 41 - Razão Cíclica do PWM em função do tempo para dois degraus de carga sucessivos.....	65
Figura 42 - Resposta do chaveamento da carga e da atuação da válvula quando submetido a um degrau e alívio de carga em sequência.	66
Figura 43 - Curva da característica do ensaio a vazio do gerador.	71
Figura 44 - Curva da característica do ensaio de curto-circuito.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de placa do gerador síncrono (sic).....	27
Tabela 2 - Dados do motor de corrente contínua obtidos por ensaio.....	45
Tabela 3 - Valores de carga dos degraus, do degrau e auxiliar em KW.	55
Tabela 4 - Ganhos das ações de controle da carga.....	62
Tabela 5 - Valores da condição inicial de carga e dos degraus para avaliar a eficácia do controlador.	63
Tabela 6 - Valores da condição inicial de carga e dos degraus para avaliar o desempenho do controlador.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	PROBLEMÁTICA E MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS GERAIS.....	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	GRUPO GERADOR DIESEL.....	20
2.1	MOTOR DIESEL	21
2.2	GERADOR SÍNCRONO.....	25
2.2.1	Ligação das Bobinas	26
2.2.2	Modelo.....	28
3	REGULAÇÃO HÍBRIDA.....	34
3.1	MODULAÇÃO DE CARGA	36
3.1.1	Modulação PWM	38
3.1.2	MOSFET.....	39
3.1.3	Circuito Modulador.....	39
3.2	ATUAÇÃO DA VÁLVULA.....	41
3.2.1	Motor de Corrente Contínua	42
3.2.2	Comparador Regenerativo	46
4	LEITURA E CONDICIONAMENTO DO SINAL.....	49
4.1	AQUISIÇÃO DO SINAL.....	49
4.2	CONDICIONAMENTO	51
4.3	ACIONAMENTO DO ATUADOR.....	52
5	RESULTADOS PRÁTICOS E EXPERIMENTAIS	53
5.1	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	53
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO PROTÓTIPO.....	56
5.2.1	Montagem da Bancada de Teste.....	57

5.2.2	Metodologia e Experimentação	61
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68
	APÊNDICE 1 – ENSAIOS DO GERADOR.....	71

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma rica matriz energética, contemplando desde exploração de petróleo em águas profundas, produção de etanol, aproveitamentos hídricos, crescente uso da energia eólica, e toda geração interliga-se por um extenso e complexo sistema de transmissão e distribuição, e especialmente na inovação tecnológica crescente na produção de energia elétrica.

Segundo Mauricio Tolmasquim não é exagero citar o Brasil como potência energética mundial, cita ele em seu artigo que “O país, de fato, é rico em alternativas de produção das mais variadas fontes”. O *website Doing Business*, que mede as regulações dos negócios nos setores da economia de cada país, avalia o Brasil como 14ª país em condições de fornecimento de energia elétrica (International Finance Corporation, 2013).

O uso de fontes renováveis é crescente, pesquisas mostram a participação das fontes renováveis em 2010 era de 44,8% com previsibilidade de 46,3% em 2020, assim o Brasil estará ainda como a matriz limpa, já que conta como uma das maiores detentoras de geração hídrica do mundo. Segundo os estudos avançados da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) a demanda total de energia do país deverá crescer 5,3% ao ano, e o consumo de energia elétrica estima-se ser 61% maior em relação ao ano de 2010, atingindo o valor de 730 TWh, sendo que a maior parte do crescimento é devido à indústria, porém o consumo per capita do consumidor residencial brasileiro deve crescer, sendo atualmente baixo em comparação com outros países do mundo.

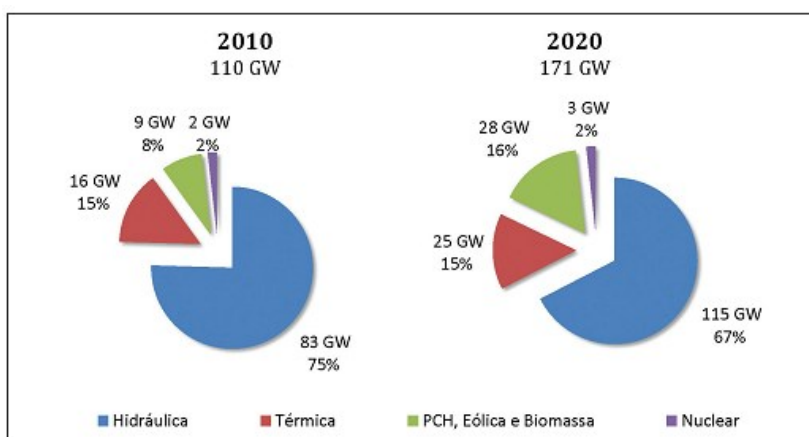


Figura 1 - Matriz energética brasileira avaliada em 2010 e a previsão para 2020. (2012)

Segundo o Plano Decenal da EPE, é previsto que a capacidade instalada para o SIN (Sistema Elétrico Interligado Nacional) deve evoluir cerca de 110 GW para 171 GW, com fontes renováveis como prioridade (hidráulica, eólica e biomassa). Ainda se prevê que a parcela de fontes alternativas como eólicas e PCH vai dobrar em dez anos, como se observa na Figura 1 acima. (Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil , 2012)

Em suma, fica claro que para atender a demanda de crescimento industrial e econômico brasileiro foram precisos investimentos de longo prazo no setor energético como construção de usinas hidrelétricas, termelétricas e eólicas, construções de gasodutos e oleodutos, pesquisa e desenvolvimento de tecnologia, ampliação e modernização de sistemas de transmissão e distribuição entre outras medidas. Com o objetivo de continuidade de tal progresso tais investimentos são necessários.

A operação e planejamento para desenvolver os sistemas de geração em seus pontos ótimos, em termos de eficiência e economia, e seu barateamento são temas de discussão de sistemas de potência desde a larga utilização de combustível pelo Estados Unidos no setor elétrico. A utilização de múltiplas fontes e a busca pela diminuição de custo de geração realizou um movimento na produção acadêmica, e mais tarde outras questões como problemas ambientais causaram motivações para um novo ramo de pesquisa (Wood, 1996).

A crescente demanda de energia elétrica na matriz brasileira solicita que se amplie o escopo da geração, diferindo das grandes unidades, que possuem baixo dispêndio na geração de energia elétrica mas alto valor final nas obras de usinas e transmissão. Essa necessidade se manifesta como utilização de energias renováveis, geração alternativa e geração distribuída. A geração distribuída se constitui em pequenas e micro centrais que podem operar de maneira isolada ou conectada à rede, sendo impossível operar uma rede apenas com geração distribuída (Fuchs et al., 2008), todavia sua construção é mais viável que as grandes centrais geradoras.

O interior do Paraná necessita de energia para aumentar sua produção, que muitas vezes é limitada por problemas relacionados à distribuição de energia elétrica e outros menos significantes como a demanda em horário de ponta, e para tal fim se faz legítimo o uso de geração distribuída. Caso fosse disponível uma unidade de pequena ou microgeração, seria uma soma de energia que poderia propiciar um incremento na produtividade e benefício para a sociedade. Apesar da boa impressão

que a utilização de uma microcentral proporciona, necessidades como a limitação da frequência podem tornar o projeto inviável graças ao alto custo do regulador de velocidade (RV) em comparação ao retorno financeiro.

1.1 PROBLEMÁTICA E MOTIVAÇÃO

Existe no campus um grupo gerador a Diesel, doação de uma estação de telecomunicação desativada, parcialmente restaurado e pouco estudado. Há um interesse em recuperar o grupo gerador reestabelecendo seu estado operacional, sendo usado como gerador de emergência, ou como material didático para aulas de laboratório e projetos acadêmicos. Ainda por parte da coordenação de mecânica, existe o interesse para o estudo do motor a Diesel, sendo o projeto interdisciplinar da eletromecânica. O gerador está acoplado ao motor diesel diretamente, através do eixo, e não possui comando algum, visto que o quadro de acionamento não se encontra presente, restando então uma alavanca para aceleração manual do motor. Como as pesquisas são motivadas pelas formas de restringir as variações de frequência e tensão com menores custos e garantir bom desempenho operacional, é necessário que seja feita a regulação de velocidade do gerador utilizando o material disponível na instituição e adaptando a alavanca de aceleração para operar automaticamente.

Assim, o escopo deste trabalho consiste em projetar e implementar um restritor de velocidade híbrido, consistindo de uma combinação de válvula com abertura por alavanca e carga *dump*, em um gerador síncrono acoplado ao motor diesel. Essa substituição visa uma redução dos custos finais e cumprimento de valores adequados de frequência, visando que pequenos proprietários de geradores possam garantir qualidade de energia com gastos reduzidos.

Segundo módulo 8 do PRODIST da ANEEL (2010) os limites de frequência recomendados de uma maneira geral, é descrito, *ipsis litteris*, como:

8.1 O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

8.2 As instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, no prazo de 30 (trinta) segundos após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

8.3 Havendo necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência:

a) não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;

b) pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos;

c) pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos."

Mesmo considerando que o sistema não seja conectado à rede, esses limites são referências de qualidade, pois ilustram quais são os valores esperados. Caso esses critérios sejam atingidos pode-se dizer que a frequência está regulada.

O controle clássico apenas depende da válvula, que é lenta devido a elevada constante de tempo própria do sistema mecânico, mais lento que o sistema eletrônico. No sentido de compensar esse atraso na ação efetiva da válvula, utiliza-se uma carga *dump*, de ação instantânea, atuando continuamente com base em um modulador de carga para a faixa de frequência da tensão gerada de 59,90 a 60,10 Hz, atuando tanto no ligamento quanto no alívio de carga auxiliar. A válvula possui duas faixas de operação de 59,0 Hz aonde a válvula começa sua abertura a 59,5 Hz para parar seu movimento e de 61,0 Hz aonde inicia o fechamento a 60,5 Hz limite para deixar o motor em repouso novamente. O sinal de velocidade é obtido do processamento via microcontrolador que faz a medida de tensão e estima a frequência via software, tendo possibilidade de a partir de um dos pinos de saída disponibilizar uma tensão proporcional à frequência, utilizada para obter o erro, ou diferença entre o valor de referência e o medido, necessário para a ação de correção de frequência.

O grupo gerador originalmente possui apenas uma alavanca de aceleração manual, que deve ser adaptada para operar de maneira automatizada. O gerador presente, mostrado na Figura 2, possui potência nominal de 25KVA e quando em rotação nominal (1800rpm) e cargas balanceadas pode gerar até 220V de linha quando ligado em estrela paralelo.

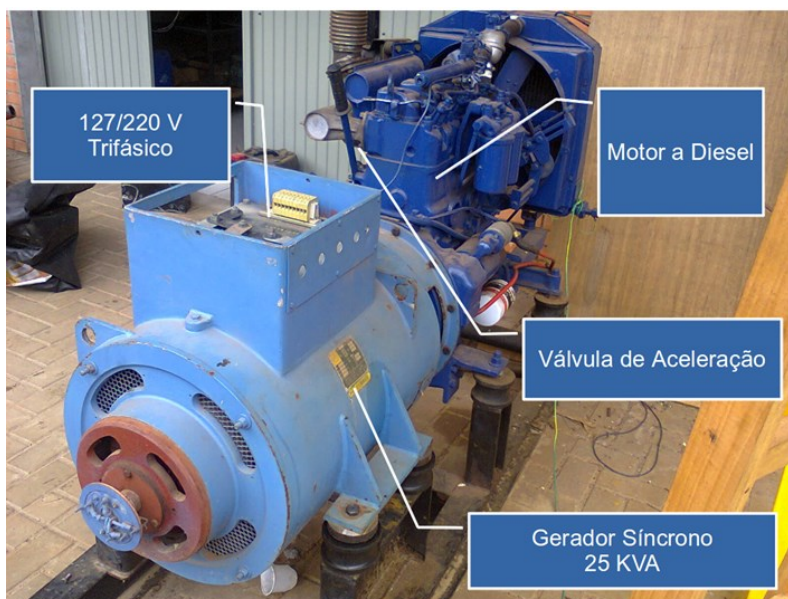


Figura 2 - Grupo gerador diesel.

Apesar de o teste ser utilizado em um sistema cuja a fonte primária de energia mecânica é o motor diesel, o conceito pode ser expandido para outras fontes. O presente trabalho busca em termos gerais, a comprovação prática do conceito de regulador híbrido aplicado ao caso de grupo gerador Diesel de 25KVA.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Conceber e analisar os aspectos práticos do funcionamento de um regulador de frequência híbrido eletrônico em um grupo gerador diesel no qual atua uma válvula adaptada acoplada a um motor de corrente contínua e modula cargas de baixo compromisso (*dump*) através de chaveamento PWM.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo e detalhamento das características do grupo gerador diesel que se encontra na UTFPR campus Pato Branco bem como de suas partes de maneira geral;

- Concepção e definição de um controlador híbrido, detalhando suas características e funcionamento, bem como a introdução do conceito de carga *dump*;
- Simulação dos circuitos que compõem o regulador e das características dinâmicas do sistema;
- Implementação do protótipo desenvolvimento no grupo gerador diesel;
- Análise e discussão dos resultados obtidos para validação do regulador proposto;

2 GRUPO GERADOR DIESEL

É definido como grupo gerador diesel um gerador síncrono de 2 ou 4 polos de pequena potência acoplado diretamente ao eixo de um motor a ciclo Diesel de potência maior ou igual que o gerador. Normalmente é vendido comercialmente com uma grande diversidade de potências para uso como gerador de emergência, *No-Break*, complemento para indústrias, e qualquer outra aplicação que possa necessitar de energia elétrica de maneira independente da rede. Usualmente é acompanhado de um tanque de combustível com autonomia calculada para situação desejada, ocasionalmente possui quadro de acionamento e proteção que pode acompanhar regulação de frequência e tensão e alguns módulos podem ser encontrados até sistemas de supervisão mais sofisticados. De modo geral grupo geradores de pequeno porte possuem um sistema de pré-aquecimento automático. Podem ser cabinados ou abertos, e ainda podem possuir alternativa para operar com gás ou bicomcombustível.

O grupo gerador escolhido para realizar a regulação foi restaurado de um *No-Break* utilizado em telecomunicações, recebido pela UTFPR campus Pato Branco como doação. O tanque de diesel original foi substituído, pois estava preparado para uma autonomia da ordem de dias, enquanto para os testes em questão o tanque possui autonomia de horas. Essa diminuição do tanque se deve principalmente pelo fato de outros testes com biocombustíveis que estão sendo realizados no campus, adicionalmente acabam favorecendo pela facilidade de locomoção (o tanque original é muito grande). A válvula existente era do tipo alavanca manual, significando que para regular a frequência era necessário um operador.

Houve grande dificuldade pelo fato de que a empresa Irmãos Negrini S/A que produziu o grupo gerador não existir mais há muito tempo, sendo impossível encontrar qualquer folha de dados, consultoria, informação, websites e diagramas. Após incansável busca descobriu-se que a empresa Heimer a incorporou na década de 80, assim foi possível um contato com o setor de engenharia que forneceu alguma informação.

Como o acoplamento do eixo é direto, o motor e o gerador possuem mesma frequência angular, ou seja, não possui nenhum tipo de redução nem acoplamento

elástico. O cano de escape foi reconstruído, e outras partes do motor foram reconstituídas por alunos da Engenharia Mecânica e Automação Industrial da UTFPR Campus Pato Branco.

2.1 MOTOR DIESEL

Os motores a diesel são máquinas de combustão interna com objetivo de produzir força motriz rotativa disponível em um eixo. O nome deve-se a Rudolf Diesel, que criou o primeiro motor nos anos de 1893 a 1898 em Augsburg na Alemanha movido a óleo de amendoim (Schulz, 2009). São máquinas que possuem um cilindro dotado de êmbolo móvel, também chamado de pistão, e outras diversas peças móveis e fixas como constatado no esquema representado pela Figura 3.

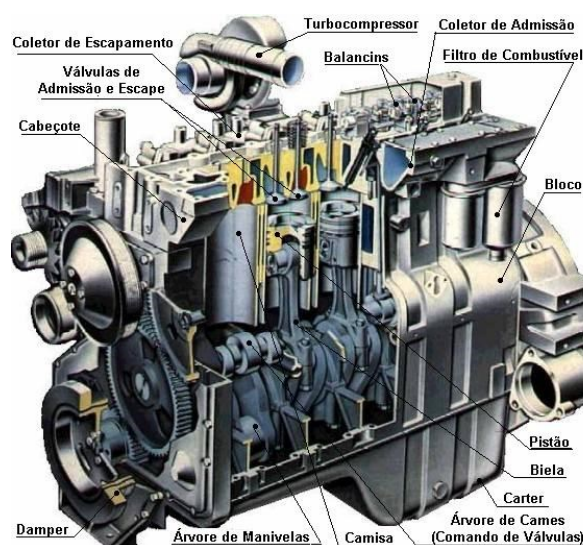


Figura 3 - Motor a óleo Diesel em corte. (Pereira, 2012)

O motor diesel em questão é do tipo 4 tempos, relacionado ao número de etapas em seu ciclo termodinâmico. São descritos abaixo sucintamente em tópicos e ilustrados na Figura 4, os tempos e suas relações entre o movimento do eixo de movimentação das válvulas (Ginette, 2011):

1º tempo (Admissão): Com a válvula de admissão de ar filtrado aberta o pistão parte da posição de ponto morto superior (PMS) e se desloca até o ponto morto inferior (PMI), posições que possuem esse nome graças um movimento puramente

mecânico inercial, sem realização de trabalho por combustão. A manivela realiza um giro meia volta descendente.

2º tempo (Compressão): Com a válvula de admissão agora fechada, o pistão se desloca do PMI em direção ao PMS comprimindo o ar admitido no primeiro tempo, terminado o giro completo com mais meia volta ascendente.

3º tempo (Combustão): Na iminência de atingir o PMS é pulverizando óleo diesel no pistão, criando assim uma mistura de diesel e ar comprimido. O oxigênio submetido a alta pressão em composição com óleo combustível dá lugar à ignição explosiva, que depende das dimensões do pistão e da riqueza da mistura, jogando o êmbolo do pistão novamente para baixo, em mais meia volta de giro descendente realizando trabalho por combustão e expansão.

4º tempo (Escapamento): Com a válvula de escape aberta o pistão se desloca do PMI ao PMS em um movimento ascendente realizando a expulsão dos gases resultantes da combustão em mais meia volta.

O ciclo descrito supõe que a máquina já esteja em movimento, porém para partida é necessário um dispositivo de partida, composto por uma bateria externa e um motor de corrente contínua, que realiza um primeiro ciclo até que o sistema de sustente de maneira autônoma. Não é necessário bateria com o motor em funcionamento, pois diferente dos motores ciclo Otto, não existe vela (elemento faiscador) para ignição, é a pressão que realiza a queima do combustível. É notável que cada ciclo realiza duas voltas completas da árvore de manivelas, e que apenas um quarto do ciclo possui combustão que realiza trabalho, também chamado de tempo vivo.

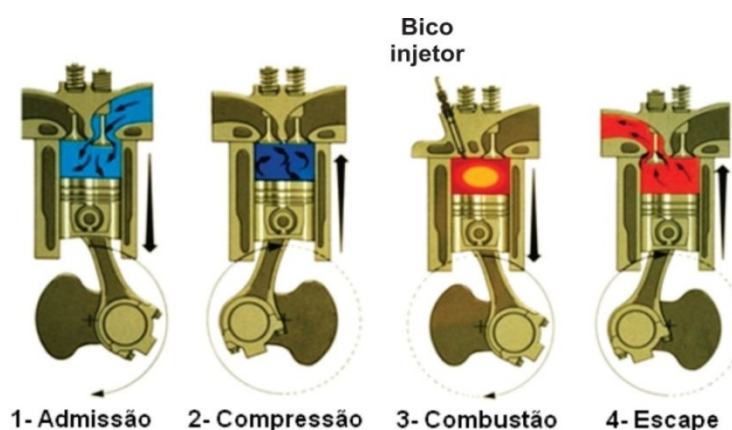


Figura 4 - Etapas do ciclo termodinâmico do motor a Diesel. (Dill, et al., 2006)

Outra diferença com o motor ciclo Otto (motor a gasolina) é o combustível que entra na câmara no momento da admissão de ar, diferente do ciclo Diesel em que o óleo só é injetado quando o ar já está comprimido. O fato de o óleo possuir maior viscosidade apresenta-se como vantagem, pois possui maior tempo de evaporação devido sua menor volatilidade, em contra partida os gases eliminados possuem maior taxa de poluentes como o enxofre.

Um fator que se apresenta como positivo do óleo é o preço de produção, que necessita de menor refino devido ao tamanho da cadeia do diesel ($C_{14}H_{30}$) em relação a gasolina (C_9H_{20}), o que o torna mais barato. Entretanto o grande diferencial é a densidade energética do óleo Diesel, em que 3,785 litros correspondem a 155 milhões de joules em relação a gasolina que apresenta 132 milhões de joules, significando menos combustível para produzir mesma energia mecânica (Brain, 2012).

O ciclo Diesel é o processo termodinâmico que representa de maneira idealizada as trocas de calor, expansão e compressão do cilindro, mudanças de pressão, entropia e temperatura do motor. O gráfico mais utilizado para essa representação é a curva P-V (Pressão por Volume), pois a sua área representa o trabalho realizado e adicionalmente as curvas apresentam noções intuitivas do ciclo que serão descritas a seguir (Nave, 2000).

Seguindo a sequência anteriormente descrita dos tempos do ciclo, será apresentado os pontos da curva mostrado na Figura 5, e como cada segmento está associado ao funcionamento do motor:

- Admissão (e-a): Sem mudança de pressão o volume do cilindro aumenta até atingir V_1 .
- Compressão adiabática (a-b): Com as válvulas fechadas, o êmbolo comprime o ar, diminuindo assim o volume e aumentando a pressão. Como não há troca de calor essa etapa é denominada adiabática.
- Fornecimento de calor isobárico (b-c): Ao atingir o volume V_2 acontece a injeção de combustível que nas condições necessárias permite a combustão. Nessa etapa acontece o recebimento de calor da máquina, proveniente da energia interna do combustível. Como essa evolução na curva apresenta pressão constante é chamada de isobárica, em contraste com o ciclo Otto que apresenta combustão com volume constante e variação de pressão.

- Expansão adiabática (c-d): Súbito aumento de volume de V_3 para V_1 e liberação de energia da etapa anterior caracterizam uma explosão. Novamente adiabática como em a-b, com diminuição de pressão ao invés do aumento.
- Exaustão isocórica (d-a): Ao abrir a válvula de exaustão, a máquina troca calor, o liberando. A pressão cai dentro do pistão com o volume constante, em outras palavras isocórico.
- Escape (a-e): Após a pressão estar no mínimo e o volume no máximo, o ciclo está completo. Para recomençar ainda é necessário o escape dos gases para nova admissão de ar puro para combustão, realizado após diminuição do volume e expulsão do conteúdo do cilindro.

É importante notar que o ciclo teórico encontrado na teoria ignoram o ponto (e) pois ele não contribui para realização de trabalho no processo visto que a área entre os pontos a-e é nula, contudo é fundamental para troca de gases no cilindro. Ainda assim a curva apresentada está longe da real, pois não existem processos totalmente adiabáticos visto que o sistema não é completamente fechado, também não existem processos adiabáticos nem isocóricos pois os gases são compressíveis e o cilindro deformável, e também não há linha entra a-e, e sim uma pequena área, pois mesmo na troca de gases existe variação de pressão.

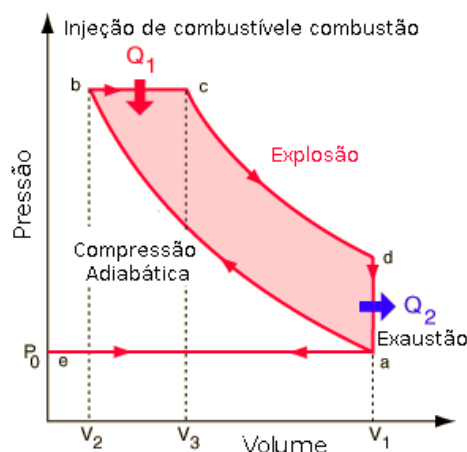


Figura 5 - Curvas Pressão-Volume do ciclo termodinâmico do motor a Diesel. (Nave, 2000)

O motor diesel acoplado ao gerador faz parte do grupo gerador comercial, e precisou passar por reformas como limpeza, retificação das partes móveis, pintura, lubrificação, alinhamento do eixo e outros reparos nas partes móveis como a injeção de diesel. A potência mecânica nominal no eixo é de 76 CV, aproximadamente o dobro da potência nominal do gerador, significando que o sistema pode operar com sobrecarga com relação ao balanço de potência do sistema mecânico-elétrico.

2.2 GERADOR SÍNCRONO

Geradores síncronos são as principais máquinas empregadas para produção de energia elétrica. A modelagem e análise dessas máquinas sempre foram um desafio e no presente trabalho apenas será discutido brevemente seu funcionamento e principais equações importantes para o estudo.

A máquina possui dois sistemas de referenciamento, podem ser utilizando os enrolamentos da armadura, estáticos, trifásicos e defasados em 120° , ou referenciado no rotor considerando o eixo direto e em quadratura, defasados de 90° entre si.

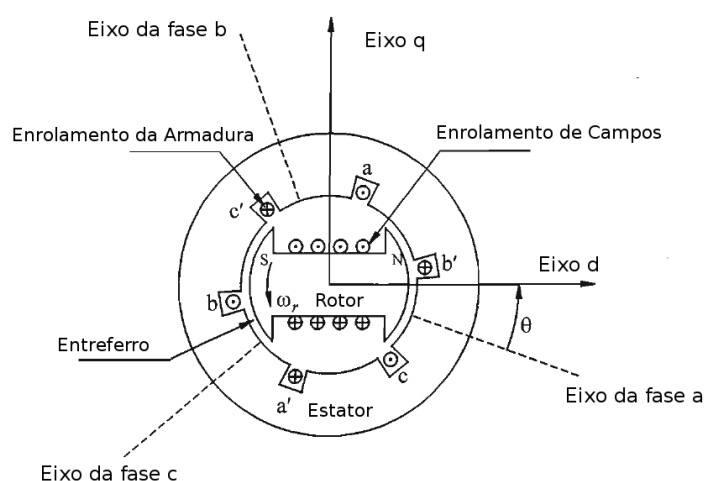


Figura 6 - Esquema do gerador síncrono em corte.

Na Figura 6 é possível examinar uma máquina em corte, o enrolamento na parte fixa (estator) de onde se extrai potência elétrica em forma de tensão alternada é

denominado armadura. O enrolamento da parte rotativa (rotor) alimentado com corrente contínua produz magnetismo para induzir a armadura e é chamado de enrolamento campo. Quando a máquina é submetida a torque mecânico acelerante em seu eixo e com o campo alimentado, a variação de fluxo no entreferro devido ao rotor girante induzirão tensões alternadas no enrolamento, defasadas em 120° em ângulos elétricos. A frequência elétrica gerada é proporcional à frequência mecânica do rotor, que é dado pela equação linear:

$$n = \frac{120 f}{P} \quad (1)$$

Onde n é a velocidade em rpm, f é a frequência elétrica gerada e P o número de polos. A máquina utilizada possui quatro polos, o que significa que para uma rotação mecânica no eixo de 1800 rpm será gerado tensão alternada senoidal com frequência de 60 Hz.

2.2.1 Ligação das Bobinas

Os dados de placa podem ser verificados na placa transcrita na Tabela 1: Sua potência nominal é de 25 KVA, frequência nominal 60 Hz e rotação de 1800 rpm (síncrono), 3 fases e fator de potência 0,8 e classe de isolamento B, 130°C Segundo NBR 17094 sobre máquinas girantes (ABNT, 2013). Sua excitação de placa recomenda 60V para corrente de 3A, porém foi verificado que esse valor não corresponde com os testes feitos a posterior, provavelmente devido à condição dos isolamentos e condutores que ficaram expostos ao mau tempo por muitos dias.

Devido às condições avariadas da placa, as informações foram transcritas para a Tabela 1 e as informações foram mantidas igualmente como atentadas na placa. A placa do motor não será mostrada pois está ilegível devido à uma pintura feita na restauração, que acidentalmente cobriu as informações.

Tabela 1 - Dados de placa do gerador síncrono (sic).

NEGRINI		kVA	25	Serv.	CONTÍNUO
		Volt	220/127 380/220 440/254	Amp.	65 38 32
N°	18830	Hz	60	Classe	B
Tipo	ATEC	r.p.m.	1800	Amp. Exc.	3
Mod	23/19	fases	3	Volt. Exc.	60
Data	09/80	Cos ϕ	0,8	AT°C	80

Ainda na placa verifica-se que a possuem três formas possíveis de ligação: 220/127V, 380/220V e 440/254V. Essas ligações não são comuns pois possuem uma forma não convencional da disposição dos terminais, com as bobinas invertidas, possibilitando assim ligação em estrela série e paralelo e zig-zag. Foi escolhido a configuração estrela paralelo por apresentar as tensões de 127V de fase e 220V de linha, que é o padrão na região do sudoeste do Paraná, a ligação é feita com chapas curtas, possibilitando assim apenas as ligações previstas pelo fabricante. O terminal não nomeado é o centro da estrela, ou seja, é o neutro utilizando como referência, a Figura 7 a) ilustra o diagrama de ligação de bobinas e a configuração das chapas. A Figura 7 b) apresenta a numeração invertida dos terminais, aonde é possível ver a maneira como são feitas as configurações através de chapas.

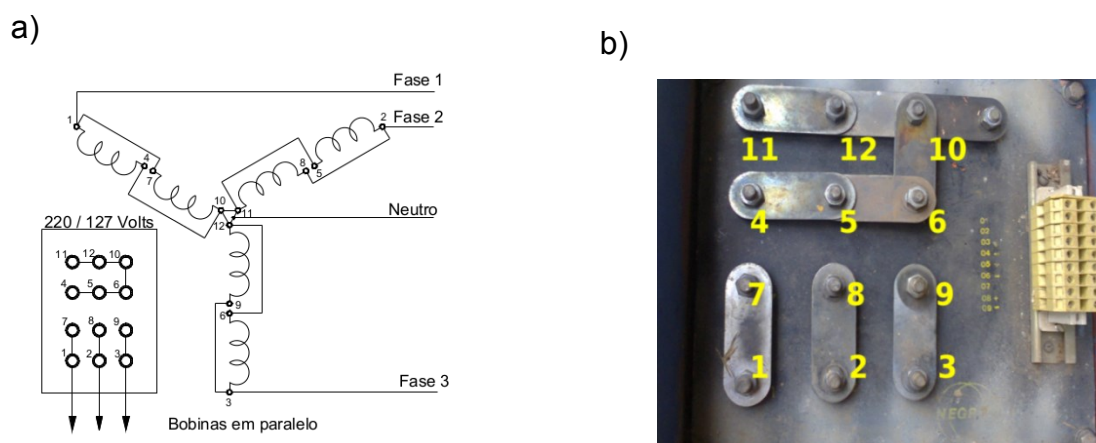


Figura 7 - Ligação das bobinas: a) Diagrama ; b) Numeração dos terminais. (Heimer, 2012)

Ao lado direito dos terminais na Figura 7 b) testemunha-se uma série de contatos, estes não são especificados pelo fabricante em seus manuais, pois os modelos sofreram uma atualização e não possuem mais o mesmo formato, por inferência deduz-se que são relativos ao sistema de excitação, estudando a ligação

embaixo da tampa pode-se encontrar quais eram responsáveis por alimentar o campo. Foi convencionado que o campo seria fixo, em um valor que gera tensões nominais de linha quando a vazio.

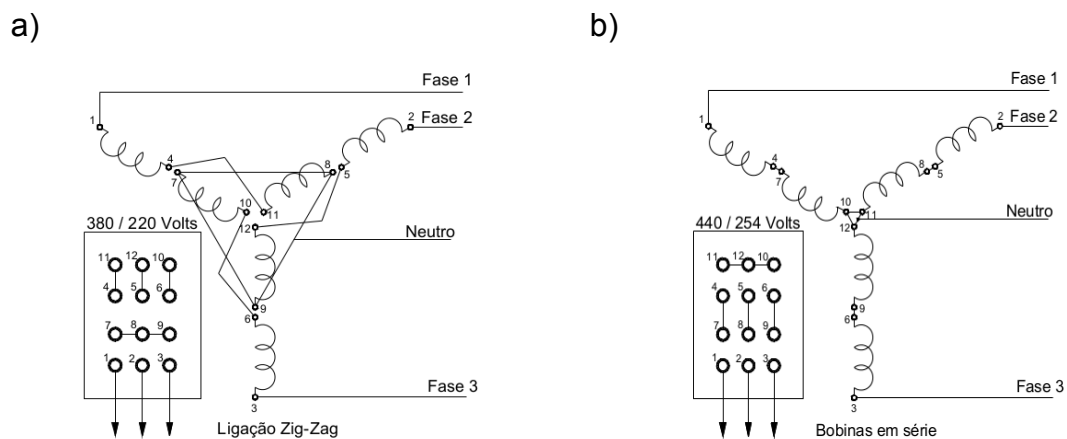


Figura 8 - Diagrama de ligação das bobinas em zig-zag e estrela série. (Heimer, 2012)

Como cada bobina possui a tensão nominal de 127V as possibilidades de 220/380V pode ser realizada com as bobinas em zig-zag, como é apresentado na Figura 8 a) e 440/254V em estrela série (dobro da tensão da estrela paralelo) como na Figura 8 b).

2.2.2 Modelo

Segundo o manual do fabricante existe na parte rotativa uma ponte retificadora, e no alternador as bobinas que possuem terminais acessíveis. Também há um outro componente denominado “*compound*”, que demonstra ser um retificador que alimenta as bobinas estacionárias. Além disso há um regulador, porém não é detalhado no manual (Heimer, 2012).

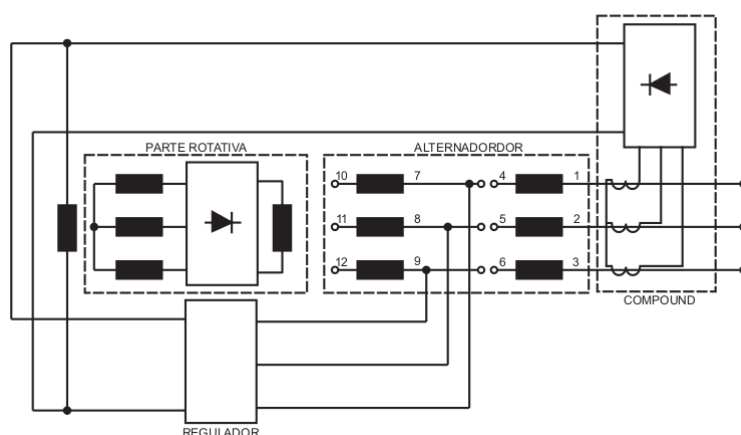


Figura 9 - Representação do sistema de excitação segundo o fabricante. (Heimer, 2012)

A partir dessas informações foi possível inferir de qual sistema de excitação o manual representa. De acordo com Kundur (1993), é chamado de excitação *brushless*, que significa sem escovas, um sistema com retificadores rotativos, que não precisa de anéis deslizantes e escovas, em que a saída CC é diretamente ligada ao campo da armadura principal. Na Figura 10 está representado o esquema simplificado de excitação *brushless*. A excitatriz, máquina auxiliar acoplado ao eixo, possui campo no estator e a armadura girante alimenta o campo rotativo da máquina principal através de diodos retificadores rotativos. O campo da excitatriz pode ser alimentado com tensão fixa, em que tensão da armadura principal varia com a carga, ou através de um regulador automático de tensão (AVR).

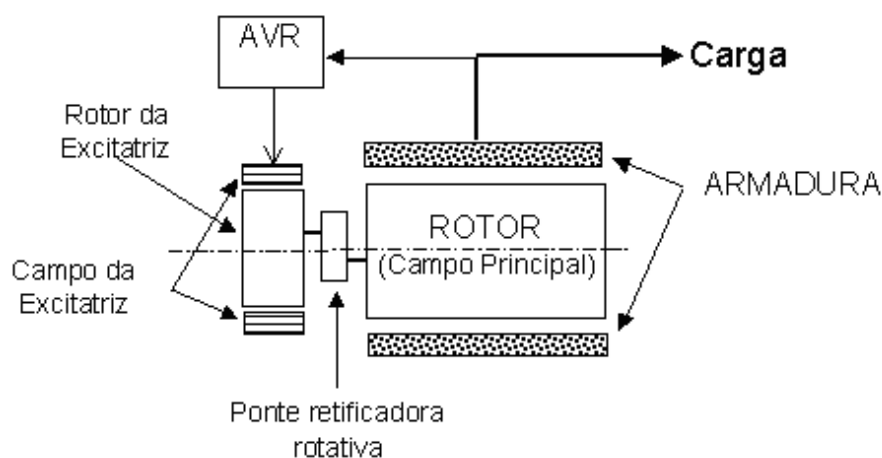


Figura 10 – Esquema simplificado de um sistema de excitação *brushless*. (Pereira, 2012)

As Figura 11 a) e 11 b) são retirados de fragmentos do manual original Negrini encontrado em um relato técnico online de José Cláudio (2012), engenheiro industrial que arquivou na forma de site, informações da época em que a marca ainda existia. Na Figura 11 a) é possível identificar o campo da excitatriz CA de armadura girante e a armadura girante, e na Figura 11 b) fica em destaque a ponte retificadora na ponta do eixo, e o campo do gerador principal, também é possível notar aonde ficam o rolamento, o ventilador e os detalhes construtivos.

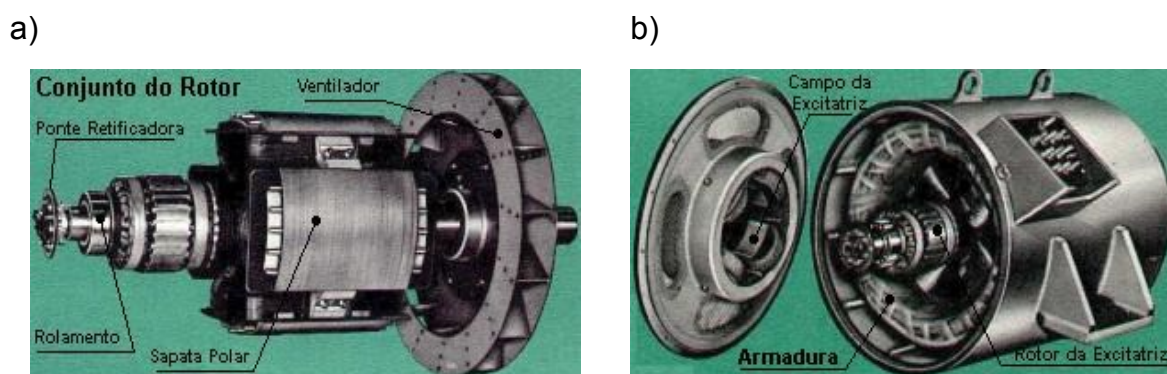


Figura 11 - Interior do gerador Negrini: a) Detalhe da armadura e campo. b) Detalhe do conjunto do rotor. (Pereira, 2012)

Os modelos do gerador síncrono são escolhidos a partir das suas características e de quais grandezas serão investigadas. São obtidos a partir das transformações das variáveis senoidais por fase (abc) em relação ao estator para variáveis espaciais estacionárias em relação ao rotor (dq0). A transformação linear abc-dq0 também pode ser chamada de transformadas de Park.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

E sua inversa:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

θ : angulo do rotor (rad);

$i_{a,b,c}$: corrente das fases abc (pu);

$i_{d,q,0}$: correntes referencias nos eixos direto e quadratura (pu);

É necessário um modelo para descrever o comportamento da frequência, como o gerador é de pequeno porte e as grandezas a serem analisadas serão apenas de natureza eletromecânica, o modelo escolhido é o de dois eixos, que despreza os transitórios estatóricos, assim o estator é representado de maneira simplificada, como reatâncias de eixos direto e quadratura. A seguir será resumido a modelagem de cada subsistema do gerador, com exceção da excitação, pois será considerado como constante.

A partir das equações diferenciais que descrevem o comportamento mecânico oscilatório do rotor, é possível obter uma equação que descreva a variação de frequência angular em função do balanço de potência mecânica fornecida ao eixo e da potência devido ao torque da carga, também conhecida como equação do “swing” ou do balanço normalizada (Anderson, et al., 2003):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_r}{2H} (P_m - P_e) \quad (4)$$

Onde:

ω_r : velocidade angular do rotor (rad/s);

H: constante de inércia (s);

P_m : potência mecânica de saída;

P_e : potência elétrica de saída;

As equações diferenciais dos efeitos transitórios do rotor são dadas por:

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d)I_d] \quad (5)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{do}} [E'_d + (X_q - X'_q)I_q] \quad (6)$$

Onde:

$E'_{d,q}$: tensões de eixo direto e quadratura (pu);

$X_{d,q}$: reatâncias síncronas de eixo direto e quadratura (pu);

$X'_{d,q}$: reatâncias transitórias de eixo direto e quadratura (pu);

$T'_{do,qo}$: constantes de tempo de circuito aberto (s);

E_{fd} : tensão de saída do sistema de excitação (pu);

As equações das tensões geradas no estator de eixo direto e quadratura, são dadas de forma algébrica por:

$$V_q = E'_q - RI_q - X'_d I_d \quad (7)$$

$$V_d = E'_d - RI_d + X'_q I_q \quad (8)$$

Onde:

$V_{d,q}$: Tensões geradas no estator do eixo de quadratura e direto (pu);

R : resistência do enrolamento do estator (pu);

Os modelos descritos são utilizados para realizar simulações computacionais, calculando a frequência a partir da equação do swing para cada desbalanço de potência. Para frequência nominal e potência nominal, considera-se que o gerador está em regime permanente. Ao submeter à máquina a um desbalanço de potência, segundo a equação do *swing* existirá variação de frequência no tempo, retirando a rotação de seu valor nominal. Essa variação é sentida e modula a carga controlada, alterando a admitância da carga. A frequência é calculada por o método iterativo, atualizando as tensões e a admitância, calculando a potência mecânica,

subtraindo da potência elétrica gerada e obtendo o novo valor a partir da equação do swing.

As simulações serão feitas com pequenas variações de carga, apenas significativas o suficiente para avaliar o comportamento do controlador. Fazendo essa consideração pode-se supor que a tensão mantém-se constante, visto que o valor da variação da potência entregue à carga pode ser mantida em valores pequenos comparado com a carga principal. Melhor dizendo, toda a avaliação será feita em um modelo que apenas o regulador de frequência atuará, e a parcela de contribuição desse fenômeno não será descrita neste trabalho.

Quando um bloco de carga é conectado repentinamente ao gerador, o primeiro efeito é que estabelecida uma tensão na carga, uma corrente somará à saída do barramento, que circulará pelos enrolamentos do estator. A tensão nos terminais são menores que a gerada devido à corrente nos enrolamentos, e a interação entre os enrolamentos da máquina e a corrente circulante no estator dão lugar a um torque elétrico (Anderson, et al., 2003). Conhecendo as equações que regem o efeito da máquina na forma de um modelo, é possível descrever o comportamento do regulador de frequência por meio de simulações.

3 REGULAÇÃO HÍBRIDA

Problemas dinâmicos associados com regulação de velocidade tem sido alvo de discussão nos tópicos de geração distribuída. O regulador é sempre acompanhado de um transdutor de velocidade, um comparador e um ou mais atuadores. São discutidos tanto a forma como será lida a frequência, podendo ser de maneira eletrônica ou mecânica, e os atuadores, que podem ser na carga e na fonte (Anderson, et al., 2003). Para sistemas multimáquinas ainda podem existir atuadores secundários, porém o estudo a seguir baseia-se em um sistema que possui apenas uma máquina conectada diretamente a carga.

A restrição de frequência pode ser feita de duas maneiras, pelo lado da fonte e pelo lado da carga. Pelo lado da fonte a potência mecânica no eixo da máquina é controlada, no caso de um motor diesel é feita a abertura ou fechamento da válvula de entrada do combustível, caso seja uma central hidráulica o que varia é a vazão de água na turbina. Pelo lado da carga, modular-se-ão cargas de maneira a controlar a potência entregue pelo gerador (Jadric, 1998). Com base nisso, é possível realizar um controlador híbrido, pelo lado da fonte e da carga, como na Figura 12, atuando na modulação tanto de fonte mecânica como de carga.

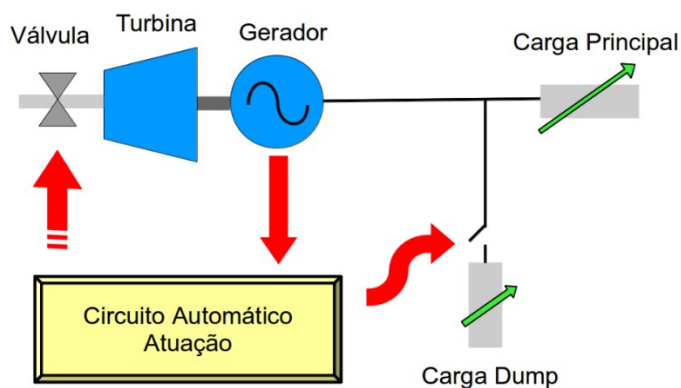


Figura 12 - Representação em blocos do sistema integrado.

Considerando um sistema que ligue e desligue cargas, deixando sempre a mesma potência demandada, consegue-se torque eletromagnético constante, logo se

deve detectar a variação de frequência e modular alívio e aumento de carga, visto que se o torque de entrada é constante e igual ao eletromagnético causado pela carga, a frequência estará regulada.

É notável que quando a frequência estiver no ponto de operação, que para a máquina em questão se encontra em 60Hz, existirá uma carga auxiliar ligada para que exista liberdade de operar em ambos os sentidos de ação. Nesse contexto é conveniente um circuito eletrônico que detecte a variação de frequência e module a carga, consequentemente deixando a máquina operando com a mesma velocidade no eixo, mantendo constante a frequência, exemplificado na Figura 13 (Jarman, et al., 2007).

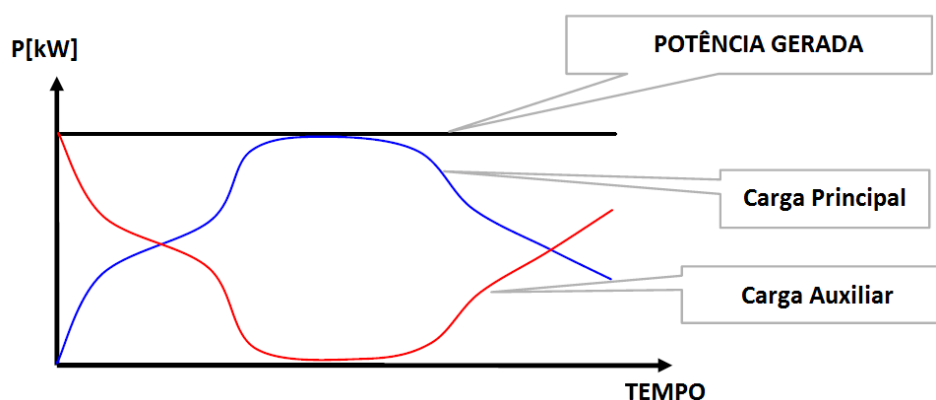


Figura 13 - Demanda de potência para carga Auxiliar e Principal. Adaptado de Renerconsys (2010).

Estabelecendo uma referência de frequência como 60Hz, e obtendo o sinal de frequência, pode-se obter o erro, ou diferença em termo algébricos, informação que irá definir a onda com largura de pulso modulada (PWM) que chaveará um dispositivo de chaveamento com alta capacidade de conduzir corrente, no caso o MOSFET, assim a potência média entregue será proporcional à largura de pulso (Load Control of a 3-Ø Self-Excited Asynchronous Generator, 2011). A carga auxiliar, que age de maneira antagônica à principal, tem como objetivo apenas a influência na velocidade da máquina, podendo ser usada para carregar baterias, alimentar aquecedores, circuitos do próprio sistema ou ainda bombear água novamente para o reservatório (no caso de usinas hidráulicas) ao invés de dissipar a energia. (Integration of Alternative Sources of Energy, 2006).

O restritor de frequências se assemelha ao regulador de frequência clássico para uma máquina operando isolada, distinto apenas de uma parcela de

potência inversamente proporcional à variação de frequência, que representa a carga *dump*, como ilustrado na Figura 14.

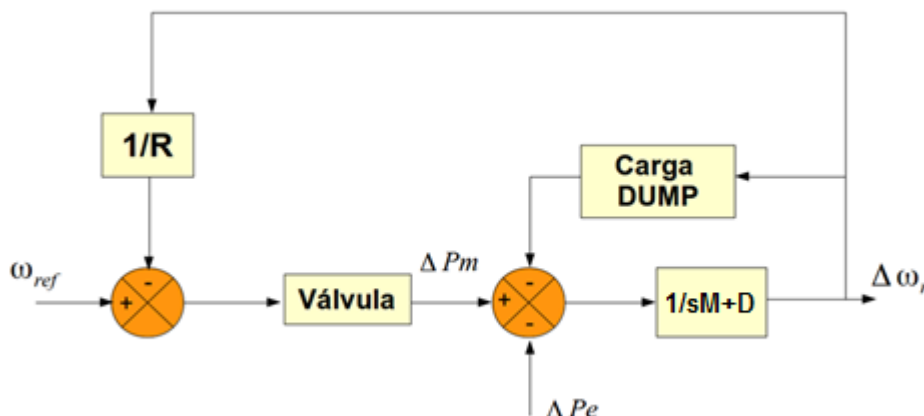


Figura 14 - Diagrama em blocos do modelo do regulador híbrido.

A válvula é responsável por modular a potência mecânica a partir de um comando, o bloco genérico na verdade é descrito pela equação do movimento um motor de corrente contínua, que será descrito em item posterior. É oportuno lembrar que apesar de aparecem juntos no diagrama em blocos, a atuação da carga *dump* e da válvula acontecem apenas em momentos distintos, i.e., não são concomitantes.

3.1 MODULAÇÃO DE CARGA

Em seu estudo Handerson (2002), cita que existem duas técnicas comumente utilizadas, uma delas seria o uso de acionamentos de cargas arranjadas em blocos, ligando degraus conforme varia o sinal de erro da frequência, este método não será utilizado, visto que modulação de carga fica restrita à pequenas variações em torno da referência, evitando assim que ocorra o chaveamento compulsivo dos contadores, fazendo com que se desgastem rapidamente. Em tal caso foi optado pela segunda alternativa proposta por ele, a modulação de carga utilizando componentes de potência que operam como chave, como o SCR, transistores, relés ou FET.

O componente escolhido foi o MOSFET, pois apresenta características de chaveamento apenas com níveis de tensão e baixíssima corrente necessária em seu

comando. Em relação ao transistor possui melhor resposta na frequência e menores perdas, e usualmente possui a capacidade de condução de corrente maior. Comparando com o relé, apresenta desgaste muito menor, e a possibilidade de chaveamento de alta frequência. Os componentes do tipo SCR podem ser chaveados em corrente alternada, porém seu circuito de comando é mais complexo que os FETs, que tem como característica comando simples com a desvantagem da alimentação ser apenas em corrente contínua, obrigando a utilização de retificadores ou conversores.

Especificamente foi escolhido o componente IRF540, pois pode operar com até 100V e 22A com o dissipador dimensionado corretamente, o que estimou-se ser suficiente (Internacional Rectifier, 2001). A impedância terminal pode ser usada para encontrar frequência e tensão ajustando a potência real e reativa absorvida. Foi proposto um modelo com um circuito *Chopper*, retificando de maneira trifásica e recortando a onda que modula a carga (Bonert, et al.).

Para controlar a demanda de geração, a carga deve ser modulada para que a potência entregue se mantenha constante. Para ser modulada, a carga total é composta da parcela variável e não-controlável e uma parcela de cargas auxiliares, de baixa prioridade, apenas com a intenção de existir para regular a frequência. Essa carga tem a possibilidade de ser empregada com alguma utilidade, apesar disso o estudo realizado não emprega utilidade a ela.

A priori será considerado um banco de cargas resistivas de potência, que serão usadas exclusivamente para restrição de frequência em faixa determinada. A quantidade de cargas auxiliares irá influenciar na eficiência do controlador e da máquina de maneira antagônica, podendo até compreender um estudo de relação custo-benefício (Portolann, et al., 2012). Quanto mais potência útil for disponibilizada à modulação, mais rápido e preciso será o regulador.

A modulação de carga com finalidade de correção de frequência depende de válvula mecânica, sem o qual seria necessário um sacrifício elevado de potência gerada, servindo assim apenas para pequenas perturbações. Poderia ser justificado no caso em que existe grande quantidade de possíveis carga de baixo compromisso, ou unidades geradoras de pequeno porte. Parte da carga auxiliar deve estar conectada quando a frequência estiver regulada, pois deve ter liberdade de desconexão, isso torna inviável o uso de elevados blocos de carga como *dump*.

A modulação de carga consiste em possuir carga que deliberadamente possa ser acionada, tanto no sentido do alívio como na ligação, isso é feito deixando o circuito que modula carga sempre com a metade da carga auxiliar ligada, assim que em pequeno desequilíbrio a carga auxiliar compensa inversamente a carga principal de forma que a potência vista pelo gerador seja constante.

3.1.1 Modulação PWM

A modulação PWM (*Pulse Width Modulation*), ou modulação por largura de pulso, consiste em controlar uma carga através de pulsos com frequência constante e com o *duty cycle* variável, a Figura 15 exemplifica para o caso de 1% e 99%. Ao variar a largura de pulso, o valor médio varia proporcionalmente, filtrando o sinal de alta frequência, pode-se utilizá-lo para condicionar altas correntes através de um dispositivo de chaveamento de potência, de maneira que a potência entregue será proporcional à razão cíclica.

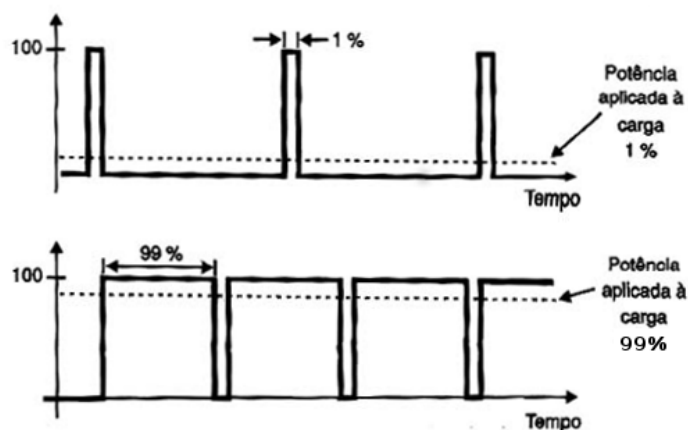


Figura 15 - Modulação por Largura de Pulso. (Braga)

Partindo da premissa que a frequência de chaveamento é alta, após o filtro o resultado é a amplitude média, *i.e.*, o sinal de saída do PWM será um sinal médio proporcional à razão cíclica (Hart, 2011).

3.1.2 MOSFET

O Transistor de efeito de campo (FET) é um dispositivo do tipo transistor, antagonicamente ao usual Transistor de Junção Bipolar (TBJ) não é controlado por corrente e sim por tensão, o que torna atrativo para o uso como elementos chaveadores. São ainda subdivididos em FET de junção (JFET) e FET de Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET), e ainda dentro de cada um existem ramificações (Mohan, et al., 2003). Dentro dessa gama o que se destaca melhor para aplicação de modulação de carga é o MOSFET tipo intensificação, símbolo na Figura 16 a, pois a partir de uma tensão positiva entre a porta (G) e a fonte (S) é possível conduzir elevadas correntes através do dreno (D). As curvas típicas de um MOSFET intensificação comercial estão mostradas na Figura 16 b).

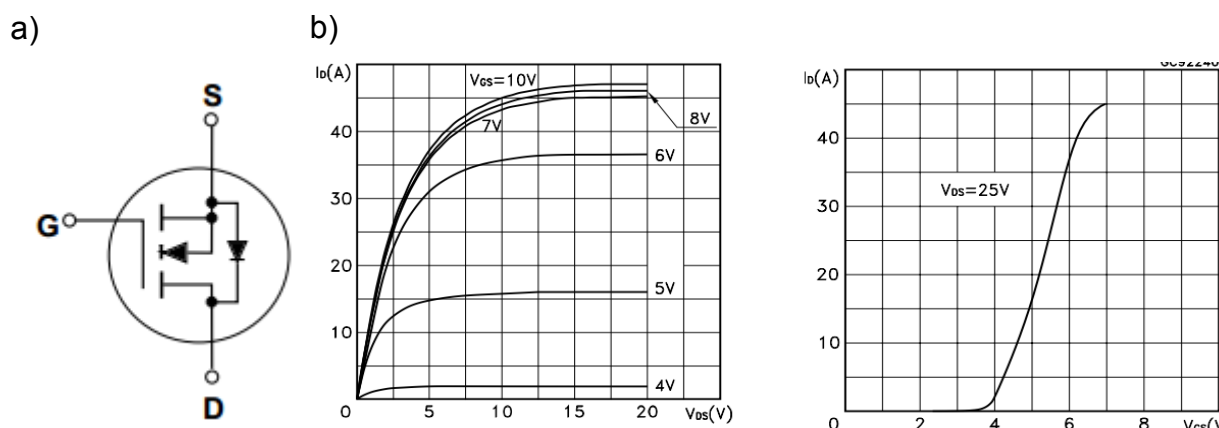


Figura 16 - MOSFET Intensificação: a) Símbolo; b) Curvas típicas.

3.1.3 Circuito Modulador

O circuito de modulação é composto por um MOSFET e um sinal PWM irá realizar o chaveamento da carga auxiliar. Como o dispositivo opera apenas com tensões positivas (não alternantes), é necessário que sua tensão de alimentação seja retificada. A maneira mais usual para retificações trifásica é a ponte de diodo de três braços (Mohan, et al., 2003). O arranjo está apresentado na Figura 17.

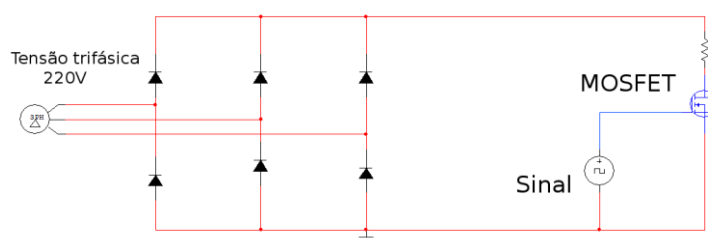


Figura 17 - Retificador trifásico e carga sendo chaveada por MOSFET.

O módulo deve desempenhar o papel de que ao receber como entrada sinais de onda quadrada de baixa amplitude de tensão, obtenha como resposta uma potência média na carga proporcional à largura de pulso do sinal. Os diodos foram dimensionados de acordo com a potência modulada, bem como o MOSFET. O sinal também foi isolado por meio de optoacoplador explicado e detalhado a *posteriori*.

Para realizar o ajuste automático da largura de pulso, é utilizando o conceito de controladores PID, que combinam efeitos de ganhos proporcionais (P), integrais (I) e derivativo (D) em forma de ganhos, descritos pela função transferência (Nise, 2012):

$$G_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (9)$$

Cada parcela do controlador possui uma característica, podendo obter combinações dos fenômenos como P, PI, PD e PID. Em sistemas muito lentos e simples apenas um ganho proporcional pode ser suficiente, o controlador PI é utilizado quando se pretende melhorar a característica do sistema em regime. Quando o objetivo é reduzir as oscilações de alta frequência o controlador PD é o mais adequado. Para sistemas que requerem melhorias em regime permanente e transitório, os efeitos podem ser combinados no que é conhecido como PID. Existem métodos para se avaliar com precisão os ganhos, mas esse processo pode ser determinado de forma empírica partindo de valores usuais (Ogata, 2003).

3.2 ATUAÇÃO DA VÁLVULA

Ao submeter a máquina à um degrau de carga elevado o suficiente para estar além da capacidade da modulação de carga, a velocidade da máquina irá inevitavelmente reduzir. Quando a frequência atingir valores críticos, a medida é clássica, deve-se acelerar ou frear a máquina. Para que isso aconteça a entrada de combustível deve ser aberta, de maneira semelhante a um carro que precisa acelerar na subida, e é nesse contexto que uma válvula eletromecânica deve ser concebida.

A ação da válvula possui dinâmica lenta por ser um sistema eletromecânico na ordem de segundos, e o controlador eletrônico possui dinâmica rápida da ordem de milissegundos, portanto o modulador de carga está adiantado, o que servirá como uma complementação rápida em contraste com a resposta demorada. A atuação da válvula será limitada, tendo uma zona morta de atuação, próximo à referência de 60Hz, aonde a frequência será responsabilidade do circuito modulador.

A válvula que estava disponível no motor diesel era do tipo alavanca, preparada para operação manual, com pequena liberdade de movimento. Junto a ela é disponível um pequeno ajuste de “offset” em que pode ser ajustado uma posição de partida. O diagrama do grupo gerador em seu estado inicial é demonstrado abaixo na Figura 18.

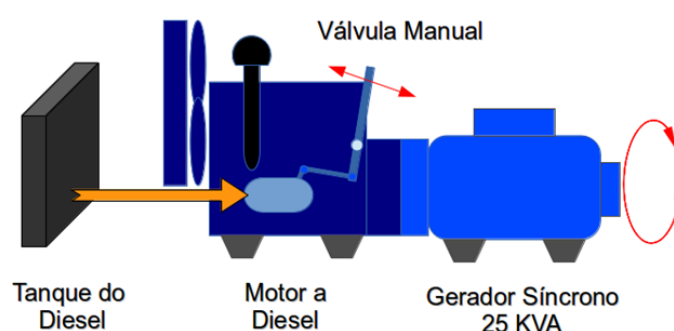


Figura 18 - Grupo gerador com válvula manual.

Com finalidade de adaptar o braço da válvula, e dispendo de um motor de corrente contínua de vidro de carro de 9V/2A com caixa de redução e engrenagem com braço, à vista disso foi engendrado uma maneira de casar ambos os movimentos. Como a motivação é a redução de custos, foi discutido que o sistema mais simples

seria uma barra que une os dois braços, com liberdade para se movimentar. A colocação do motor foi simplificada e o mecanismo simples. Um empecilho é o fato de não apresentar linearidade, o que impossibilita a modelagem da planta do regulador, ficando o ajuste dos ganhos do sistema de maneira empírica. O *status quo* do mecanismo está demonstrado na Figura 19.

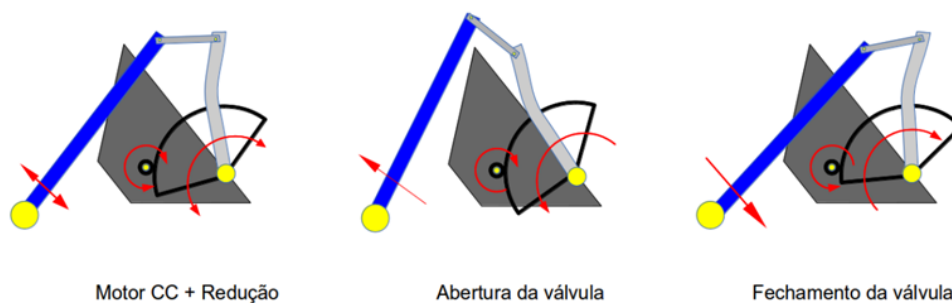


Figura 19 - Movimento do braço da válvula.

A carga pode assumir valores aleatórios, entretanto em um sistema que muitas cargas são ligadas e desligadas de maneira não previsível, a resultante pode ser considerada como constante, à essas pequenas variações a carga auxiliar será modulada. Supondo a entrada de um bloco de carga com valor elevado que divirja da média, a consequência será uma pequena perturbação além da capacidade do modulador de carga que acionará a válvula.

3.2.1 Motor de Corrente Contínua

O atuador mecânico é definido pelo ligamento ou desligamento do motor CC adaptado, que irá restringir de maneira não-linear a entrada de combustível. Na Figura 20 é demonstrada a entrada de combustível (seta laranja) que passa por uma válvula disposta na forma de alavanca (acelerador), a modificação consiste em acoplar um motor 12V corrente contínua com caixa de redução na alavanca manual (eletroválvula) que pode ser operado através de um sinal provindo de circuito eletrônico. Apesar de parecer que essa forma de atuação não possui precisão, é importante lembrar que o projeto visa diminuição de custos, e que atuação mecânica só deve atuar para variações expressivas de frequência.

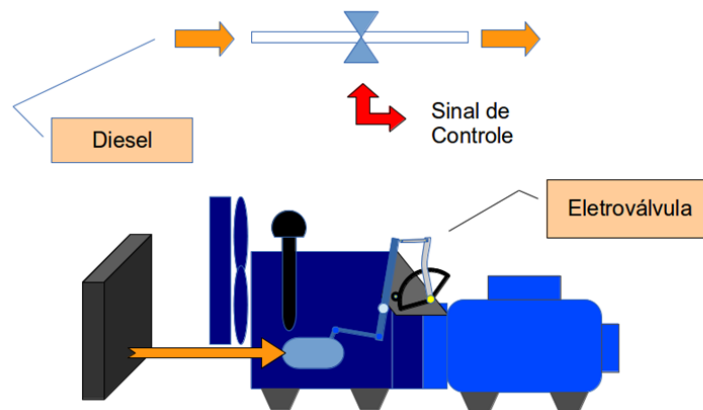


Figura 20 - Grupo gerador com válvula eletrônica.

Supondo que o sistema possa ser linearizado para pequenas variações de frequência, é possível determinar que a contribuição de torque mecânico seja proporcional à variação angular do motor da eletroválvula, é conveniente nessa situação encontrar um modelo a partir de análise matemática.

O motor de corrente contínua devido sua construção possui um torque proporcional à corrente. E a corrente depende do circuito mostrado abaixo, em que demonstra uma tensão que varia com a velocidade, visto que a tensão interna do gerador é proporcional à rotação, logo:

$$E_a - e_b = R_b \cdot i_c + L_a \cdot \frac{di_c}{dt} \quad (10)$$

$$T_m = K_a \cdot i_a \quad (11)$$

$$T_m = J \cdot \frac{d^2\vartheta}{dt^2} + B \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (12)$$

Transformando as equações para o domínio da frequência através da transformada de Laplace pode-se manipular as equações para obter um modelo que represente o ângulo do rotor em função da tensão de alimentação. Pode se considerar a indutância da armadura nula visto que se trata de um motor de indução de pequeno porte, significando que um degrau de tensão não produz atraso considerável em relação à constante de tempo do sistema mecânico.

$$\vartheta(s) = Ea \frac{km}{(\tau_m \cdot s + 1) \cdot s} \quad (13)$$

Onde km e τ_m são constantes que podem ser obtidas experimentalmente, sendo igual a respectivamente o valor em regime da velocidade angular em resposta a um degrau e constante de tempo da válvula. Pode-se reparar que no denominador da função transferência há um multiplicador s , o que significa que a atuação do degrau de tensão no motor produzirá um sinal integrado, isto significa que há crescente aumento de potência mecânica até que o erro seja minimizado.

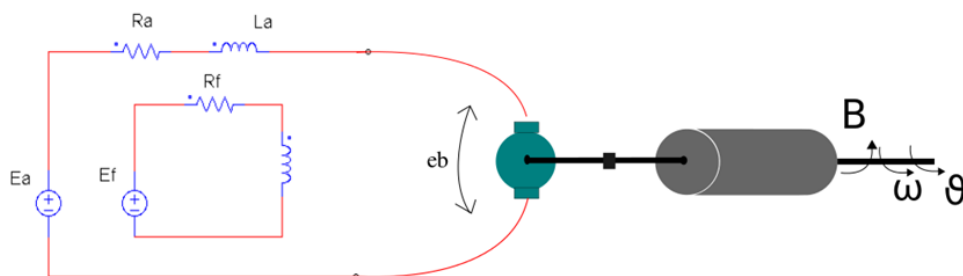


Figura 21 - Circuito equivalente do motor de corrente contínua.

Com uma equação que representa a abertura angular em função do tempo, é possível modelar a ação de abertura da válvula. Para encontrar os valores de km , é preciso saber qual a relação da abertura angular com a tensão aplicada, isto é, considerando todo o sistema eletromecânico e apenas examinando a velocidade angular do braço ao aplicar um valor definido de tensão no motor.

O sistema mecânico do motor possui 45 dentes totalizando 120° . Ao aplicar um degrau de 12 Volts nos terminais do motor encontramos uma deflexão de 23 dentes ($61,33^\circ$) em 2,33 segundos, resultando em uma velocidade angular de abertura de $26,3^\circ/s$ ou $0,46 \text{ rad/s}$. Utilizando uma extrapolação supondo que o movimento é linear em regime constata-se que para 45 dentes o motor levaria 4,4s, pela definição a constante de tempo do sistema é o tempo que ela leva para alcançar 63,2% do seu valor de velocidade de regime (Nise, 2012). O motor de alto torque atinge seu regime rapidamente, *a posteriori* os resultados mostraram que a constante não pode ser maior que 0,5s a partir da observação de sua curva de atuação.

Tabela 2 - Dados do motor de corrente contínua obtidos por ensaio.

Varição angular do braço	61,33°
Constante de tempo	<0,5s
Velocidade angular	0,46 rad/s

O motor de corrente contínua é bipolar, significando que uma inversão de sua alimentação provoca inversão do seu sentido de giro. Uma topologia conhecida na literatura é o driver a conversores para operação em quatro quadrantes, conhecida como ponte H (Mohan, et al., 2003), que possui esse nome devido ao seu formato apresentado na Figura 22.

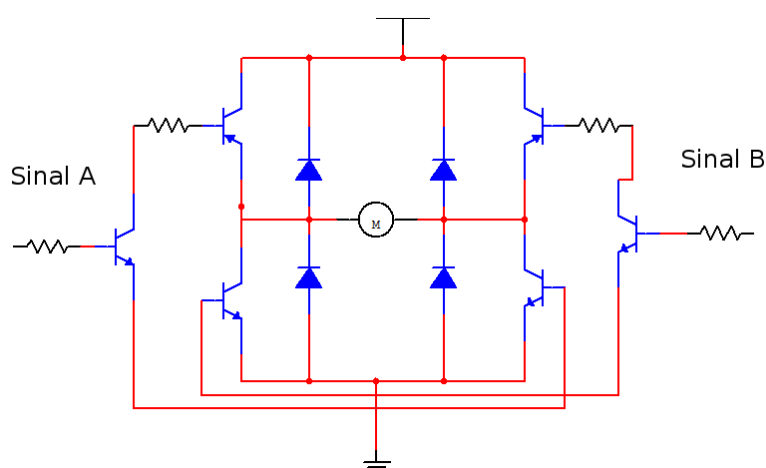


Figura 22 - Esquemático do circuito de chaveamento da ponte H.

Acionando chaves aos pares, é possível realizar um arranjo em que dois sinais A e B de acionamento determinam o sentido de giro, caso os sinais fiquem em nível alto ao mesmo tempo a fonte entra em curto-circuito, por isso deve existir intertravamento dos sinais. A ponte foi realizada utilizando transistores de alta potência do tipo TIP acionados por transistores menores do tipo BCD, pois assim é possível tanto o acionamento *on-off* como PWM.

3.2.2 Comparador Regenerativo

Como a válvula será acionada apenas em situações críticas de frequência e possui dinâmica lenta, foi escolhido um controlador simples, do tipo comparador. Para evitar o alto chaveamento em torno das regiões limítrofes de carga e válvula, se recomenda a escolha de um comparador regenerativo, conhecido também como *Schmitt Trigger* (Pertence, 1996).

A Topografia do comparador regenerativo foi escolhida como a mais adequada devido ao fato que se deve evitar alto chaveamento próximo às regiões limites, o que diminui a vida útil dos componentes eletromecânicos. Após o sinal de frequência atingir os limites em que toda a carga foi modulada deve entrar na zona de atuação da válvula.

Utiliza-se dois comparadores, um para cada efeito da frequência, representado pela Figura 23. Um sinal de entrada analógico condicionado a transduzir a faixa de frequência em uma faixa de tensão é a entrada do circuito, as referências são determinadas por um regulador e divisores de tensão, que estabelecem os valores de fronteira do comparador. Dois pares de amplificadores operacionais comparam as referências analógicas aos sinais que são aplicados à base de dois pares de transistores.

O ciclo de histerese é característica do componente discreto SCR, que após conduzir fica selado até que se elimine a fonte (Almeida, 1996). Supondo que o valor máximo aceitável de variação de frequência seja chamado de valor superior e o valor mínimo em que a válvula atue seja chamado de valor inferior: O valor inferior de referência é aplicado no gatilho, o valor superior habilita a alimentação, quando os valores estão se distanciando da referência a válvula é ativada no valor superior, e voltando a se aproximar da referência a válvula é desligada no valor inferior.

Como o motor é acionado através de ponte H, é conveniente que a saída do sistema seja na forma de dois sinais, chamados A e B, que possuem a tarefa de injetar ou restringir o diesel. A própria natureza do circuito já promove intertravamento devido ao uso dos comparadores que atuam de maneira simétrica. As faixas de acionamento do motor são ajustadas através dos divisores de tensão, calcula-se a resistência para obter uma tensão nodal equivalente à uma frequência de comparação.

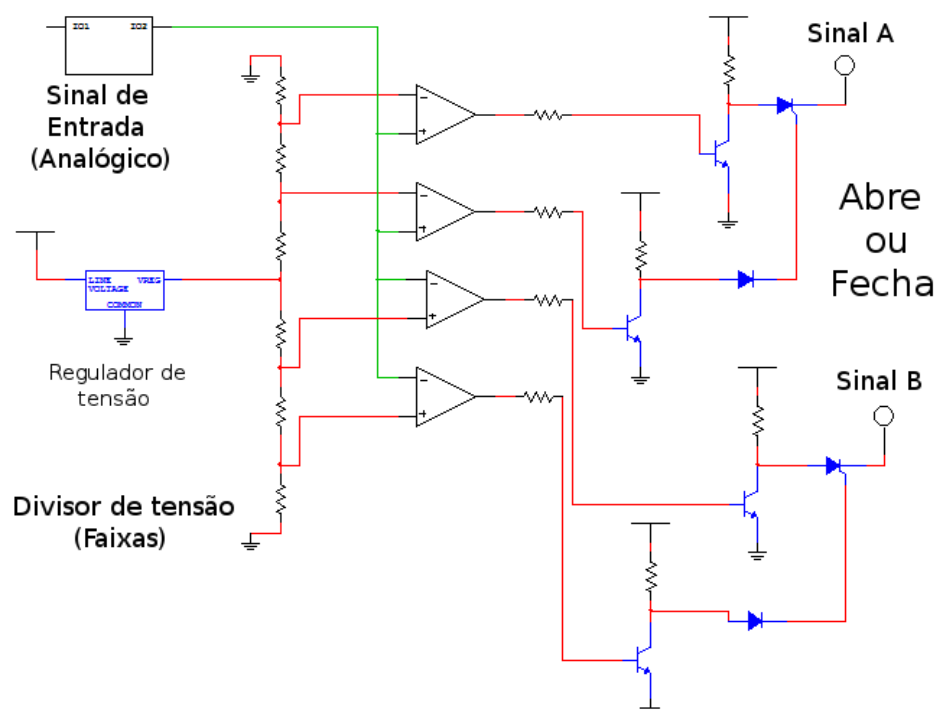


Figura 23 - Esquemático do circuito do comparador regenerativo.

O sistema com dois comparadores regenerativos simétricos entre si, proporcional a junção de uma comparação positiva e outra negativa, em outros termos, para uma sinal de frequência abaixo da referência, a válvula será acionada positivamente (abertura), e para sinal acima será acionada negativamente (fechamento), como mostrado na Figura 24. A janela de variação de frequência foi escolhida como de 0V a 8V, com escala da transdução 0,5Hz/Volt, sendo 4V a referência de 60Hz.

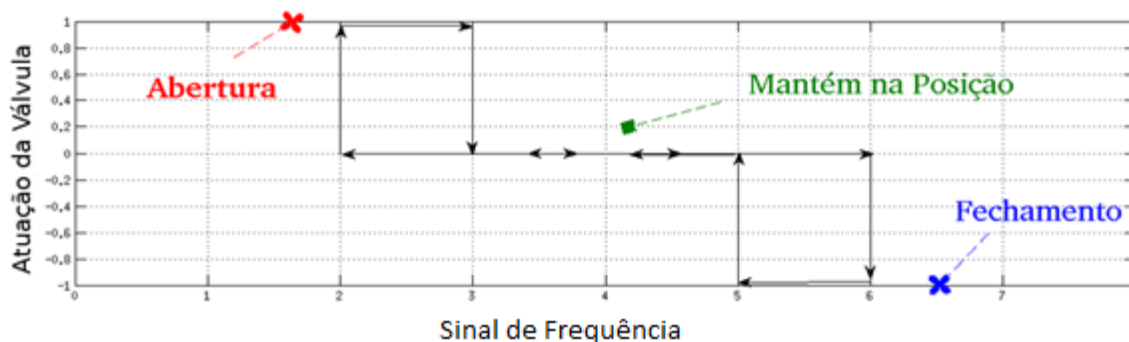


Figura 24 - Diagrama de atuação da válvula.

Quando o sinal alcança o valor inferior de 2V, significa que a máquina está operando com uma subfrequência de 59Hz, abrindo a válvula até que alcance a tensão de 3V, equivalente a 59,5Hz, fazendo a válvula parar e entrando na região da modulação de carga. Em outro cenário a tensão pode atingir 6V, equivalente à 61Hz, o que ocasiona o fechamento do combustível, fazendo a máquina desacelerar até atingir 5V, ou 60,5Hz, parando a válvula e entrando novamente na região da carga.

4 LEITURA E CONDICIONAMENTO DO SINAL

O controlador recebe informações do gerador através de leitura das grandezas elétricas de tensão, como curva senoidal possui informações sobre a frequência da máquina. As altas tensões dos terminais do gerador devem ser recolhidas de forma que fiquem isoladas do circuito eletrônico. Também é necessário um condicionamento do sinal, como a amplitude, visto que altas tensões geradas não são adequadas dos componentes eletrônicos.

Os sinais que comandam os atuadores, como a válvula e a carga, também devem ser tratados, com seu devido isolamento e condicionamento do sinal para que o pequeno sinal do circuito eletrônico possa representar fielmente o acionamento à elementos de maior potência, como o motor CC e o MOSFET.

As etapas de leitura e condicionamento incluem a aquisição do sinal de tensão, feita por meio de transformadores de potencial (TP), e somado um offset para que apenas sejam representadas tensões positivas. O condicionamento do sinal é realizado de forma que se isole dos componentes de potência, ajuste seus valores para serem processados.

4.1 AQUISIÇÃO DO SINAL

Para que as altas tensões sejam lidas é necessário um TP para cada fase, que estarão conectados em estrela. Como um transformador rebaixador, adequará o sinal à níveis de circuito e isolará o sistema de potência com o eletrônico.

O sinal de menor amplitude precisa ser limitado, pois na presença de picos de tensão o secundário irá reproduzir o sinal acima dos valores esperados. Para essa finalidade é utilizado um amplificador em sua configuração de saturador, que consiste em um buffer alimentado com tensões reduzidas, assim no caso de uma falha o amplificador operacional não corresponderá às tensões elevadas, ceifando a onda.

Por fim é necessário somar um sinal em cada fase igual à metade da amplitude de pico a pico da tensão medida esperada, obtendo uma onda totalmente

positiva. Isso é realizado para simplificação dos circuitos, que são reduzidos pelo fato de operar apenas com tensão assimétrica. São constituídos de um amplificador operacional em sua configuração de somador.

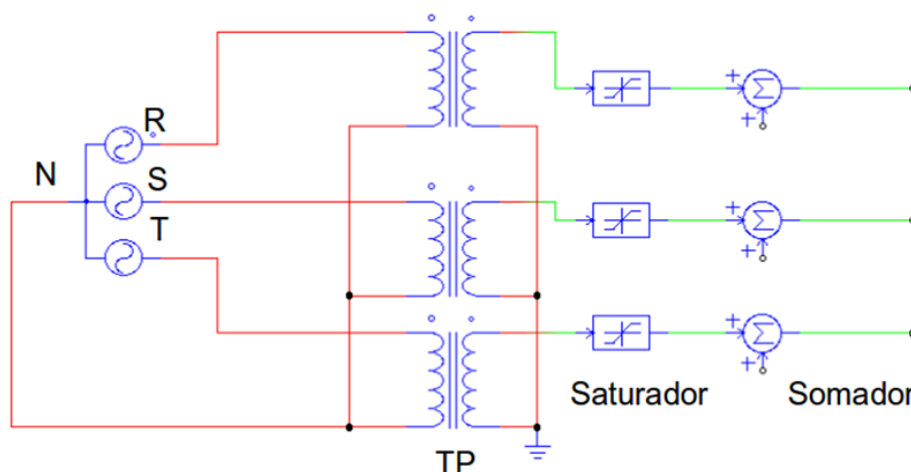


Figura 25 - Representação do processo de leitura do sinal.

Por fim, obtém-se um sinal alternado, deslocado de maneira a ser completamente positivo, que está seguramente isolado do gerador e com menor amplitude. O sinal pode passar por um atenuador, para que o sinal se molde a ocasião, caso seja usado em um circuito analógico ou digital. Para os testes realizados foi utilizado o microcontrolador Piccolo F28069 da *Texas Instrument*, compilado com um algoritmo *Phased Locked Loop* (PLL), cujo código se baseia nas transformadas de Park e Clarke para obter uma variável de frequência a partir de sinais de tensão (Malvino, et al.), assim obtendo um sinal de tensão proporcional à frequência. Para os testes em bancada foram realizados circuitos analógicos para leitura de frequência, utilizando circuitos integrados (CI) com lógica transistor-transistor (TTL). Os princípios de leitura de frequência e estimação possuem um conceito matemático e lógico aprofundado que não são objetivo do trabalho. (Northrop, 2005)



Figura 26 - Microcontrolador Piccolo controlSTICK da Texas Instrument.

4.2 CONDICIONAMENTO

Praticamente todo sistema de instrumentação requer algum tipo de condicionamento de sinal, que normalmente é composto por amplificadores para adequação do sinal em níveis corretos, filtros para possíveis ruídos, ajuste de não-linearidade e isolamento de sinal. O carro-chefe de todo o condicionamento analógico é o amplificador operacional, que pode assumir a maioria das topologias anteriormente citadas (Northrop, 2005).

A estrutura básica da realimentação dos amplificadores é denominada de buffer, ou seguidor de tensão, que garante uma entrada de alta impedância no sistema, garantindo a não circulação de corrente. Sua topografia básica é um amplificador com realimentação da saída na entrada negativa, e sinal na entrada positiva (Pertence, 1996). É a primeira etapa disposta na Figura 27, que representa o circuito total do condicionamento, que será explicado bloco a bloco.

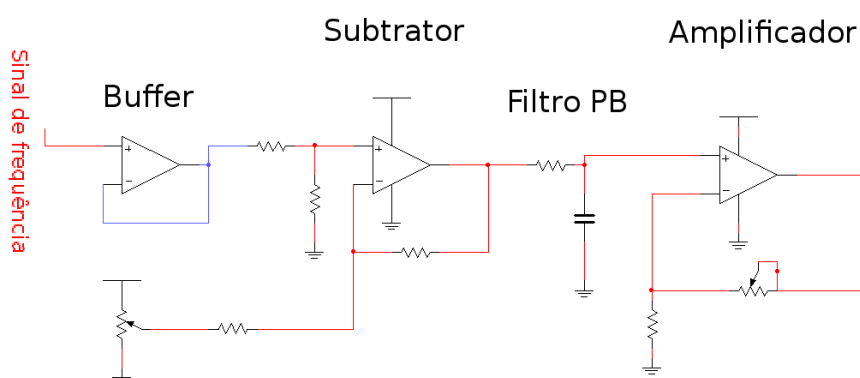


Figura 27 - Esquemático do circuito de condicionamento de sinal.

O subtrator possui como função deslocar o sinal em uma faixa adequada, por exemplo, o sinal de frequência em certa calibração apresentou variação entre 3V e 3,6V na faixa desejada, seria conveniente deixá-lo em uma faixa de 0V a 0,6V, para isso é utilizado um resistor variável do tipo *trimpot* para calibração. Um filtro passa-baixa de 1ª ordem retira os ruídos existentes, composto por um circuito RC, pode-se ajustar a frequência de corte através dos valores dos componentes para que qualquer frequência acima de 100Hz seja atenuada (Valkenburg).

O papel do amplificador é que a partir do sinal de pequena amplitude que representa a faixa de atuação dos controladores para uma faixa mais larga de 0V a

0,6V para 0 até 8V. Isso é fundamental para melhoria de precisão na comparação ao usar eletrônica analógica, que conta com o uso de transistores e circuitos resistivos. A topologia escolhida foi a do amplificador não-inversor, que mantém a polaridade do sinal e possui ganho variável calibrável por *trimpot*.

4.3 ACIONAMENTO DO ATUADOR

O projeto do acionamento do atuador deve ser projetado, *cum grano salis*, para garantir existe a interface segura e desacoplada de eletrônica de baixa corrente com elementos de maior potência. Com intenção de evitar que possíveis problemas ocasionados na eletroválvula ou no gerador repercutam no circuito é projetado um acionamento isolado por luz.

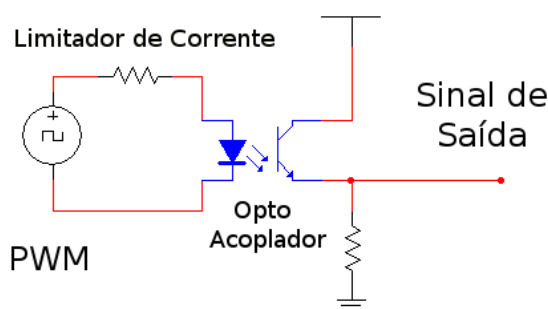


Figura 28 - Esquemático do circuito do optoacoplador.

Uma das alternativas utilizadas é a do optoacoplador mostrado na Figura 28, em que um LED e um fototransistor são acoplados e encapsulados, garantindo que estejam isolados. Esse tipo de isolamento é ideal para quando existem sinais binários, “tudo ou nada”, devido a distorção do sinal pela não linearidade luz-transistor.

5 RESULTADOS PRÁTICOS E EXPERIMENTAIS

A missão da experimentação é validar a proposta do regulador híbrido para melhorar os níveis de frequência com baixo custo. Para cumprir e provar a funcionalidade de toda as suposições teorizadas foram realizados simulações de sistemas e circuitos e posteriormente criado um protótipo e uma bancada de teste *ad hoc*. Todas as simulações e testes práticos foram testados para pequenas perturbações, pois o objetivo é a avaliação da ação da restrição de frequência.

5.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

A simulação foi realizada através da ferramenta Simulink do software Matlab® a partir da modificação de um bloco de gerador com determinado *pre-set*, pois a falta de parâmetros e dados do gerador demanda uma simulação qualitativa e um ajuste dos ganhos dos reguladores de maneira empírica. A impossibilidade de realização de simulações precisas não se deve apenas pela falta de dados, mas também pela dificuldade de modelamento da válvula não linear, do modelamento do motor Diesel e da obtenção da relação combustível-potência, o que resulta em alta complexidade na obtenção de um modelo adequado para a planta, supõe-se que a ordem de grandeza da atuação do circuito eletrônico e da injeção de combustível é muito mais rápida que a válvula, e que a potência mecânica é proporcional à variação angular do motor CC.

A simulação tem por fim verificar a operacionalidade da válvula junto à modulação de cargas, de maneira qualitativa verificar a possibilidade de regulação eficaz e também atentar quanto a estabilidade do regulador. Na Figura 29 está demonstrado o esquema geral do diagrama em blocos para simulação, os blocos em azul representam o motor Diesel e o gerador síncrono, em ciano as cargas, em laranja os circuitos eletrônicos, em cinza o conjunto motor CC e válvula, em amarelo e verde são blocos utilizados apenas para simulação, sem representação física.

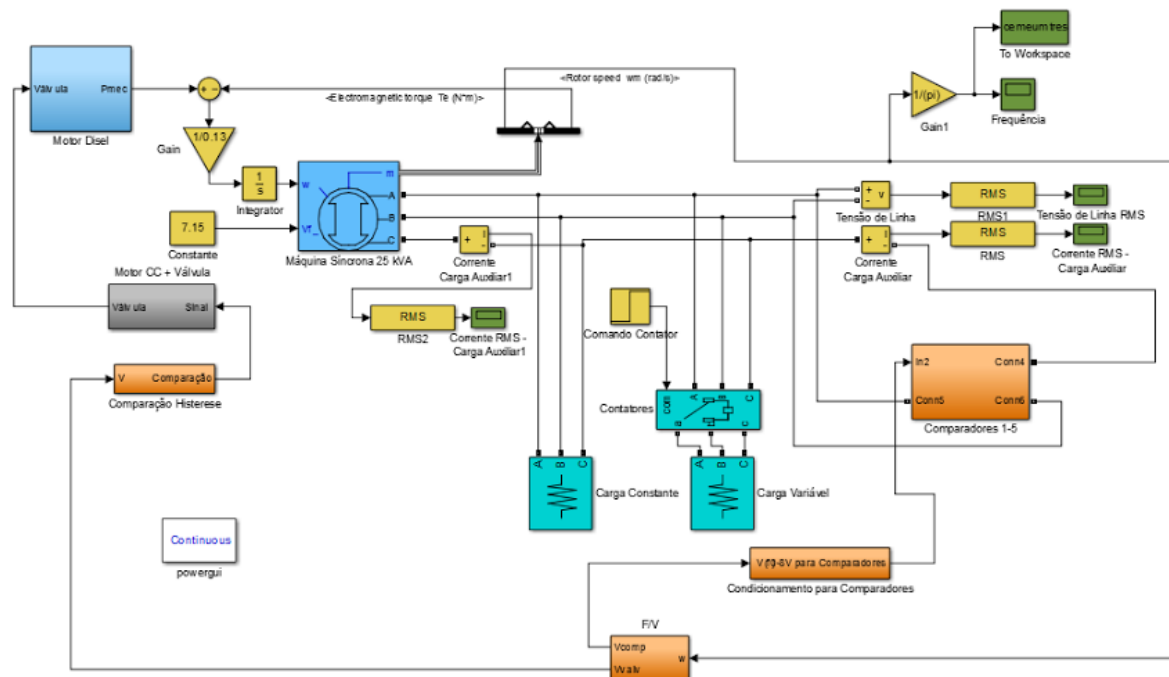


Figura 29 - Diagrama geral da simulação em blocos.

O objetivo da primeira simulação realizada foi verificar a frequência ao submeter o bloco do grupo gerador à um degrau de carga em $t=10s$, apenas a malha da válvula realiza restrição, o afundamento é esboçado na Figura 30. Com finalidade de preservar a integridade da máquina, que se encontra aparentemente avariada, a comparação prática nesse caso não foi realizada, pois quando submetido à degraus severos escutava-se ruídos que indicavam possível problemas mecânicos.

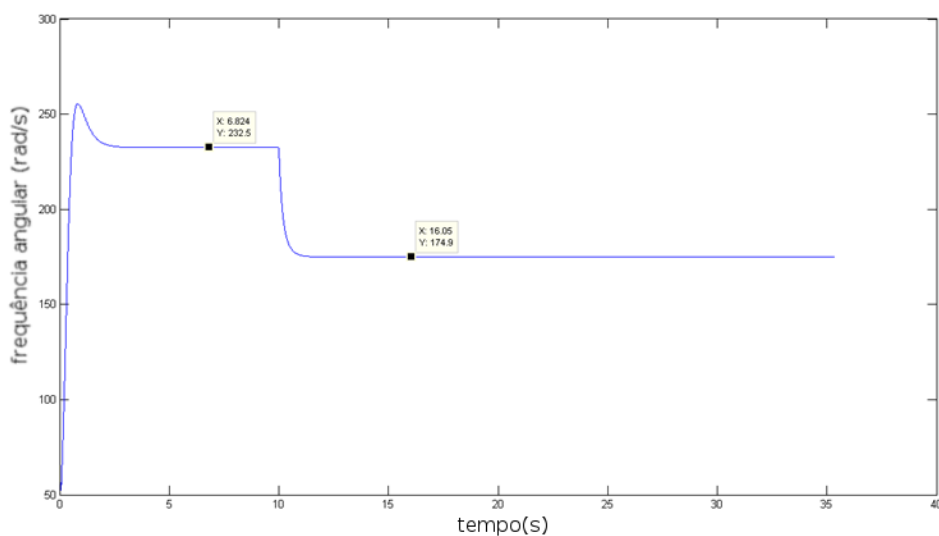


Figura 30 - Resposta da frequência do gerador ao ser submetido a um degrau de carga.

Para análise do funcionamento do sistema com a malha fechada, foi estabelecido uma carga que se liga em 10 segundos na escala de tempo visto na Figura 31 a). A partir disso foram definidos valores da carga inicial, dos degraus e da carga auxiliar dispostos na Tabela 3 - Valores de carga dos degraus, do degrau e auxiliar em KW.

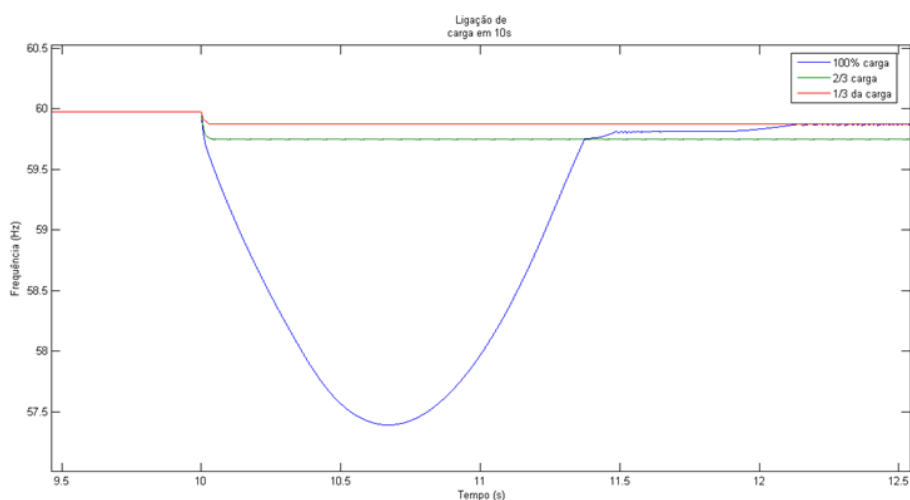
Tabela 3 - Valores de carga dos degraus, do degrau e auxiliar em KW.

Rótulo	Potência
Carga inicial	9KW
100%	9KW
2/3	6KW
1/3	3KW
Carga Auxiliar	3KW

Atina-se que enquanto a frequência está dentro da faixa de modulação de carga, não existe afundamento significativo, apenas erro entre o valor de regime permanente e 60Hz menor que 0,5Hz. Para o degrau de 100% a frequência entra na zona de atuação da válvula e apresenta afundamento significativo de até 2,5Hz que durou cerca de 1,5 segundos, quando entra na região da carga que corrige mais uma pequena parcela de frequência durante pouco menos de 1 segundo.

Ao realizar a simulação para alívio de carga, com valor final de carga o que foi declarado como sendo a carga inicial de 9KW, notou-se que a frequência atingiu a região da válvula duas vezes, e apenas para 1/3 é que a frequência se restringiu à modulação de carga, praticamente instantâneo. Para alívio de 2/3 a frequência se recuperou em cerca 1,5 segundos variando 2,5Hz e para 100% se recuperou em 2,5 segundos variando 2Hz. As informações anteriormente descritas, a divisão entre a restrição de velocidade devido ação da válvula e pela carga virtual se revelam no formato da curva da Figura 31 b), aonde são sobrepostas as curvas para diferentes degraus de carga.

a)



b)

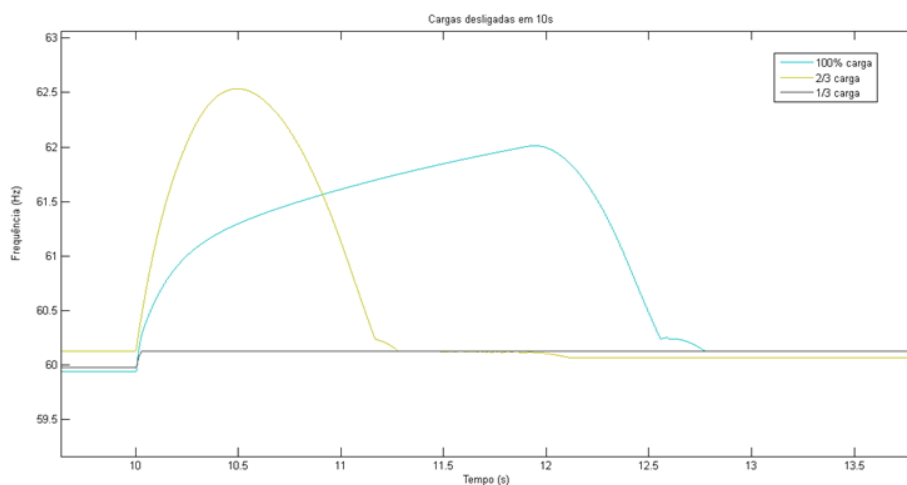


Figura 31 - Resposta da frequência com variação de 100% da carga, 2/3 e 1/3: a) ligamento em degrau; b) desligamento em degrau.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO PROTÓTIPO

Todos os sub sistemas descritos anteriormente foram testados utilizando componentes discretos em *protoboard* e em outra etapa soldados em placas de protótipo novamente testados. Os valores dos componentes não foram explicitados nas simulações, pois diversos ajustes foram realizados, porém o conceito permaneceu intacto. Serão detalhados a montagem de cada etapa e a metodologia para realização da experimentação.

5.2.1 Montagem da Bancada de Teste

A primeira montagem realizada foi acoplar o motor de corrente contínua ao braço da válvula. Por meio de cauteloso ensaio do suporte do motor no espaço disponível na máquina, foi presumido a melhor maneira de acoplar o sistema, e com auxílio dos alunos e professores da Eng. Mecânica conjecturou-se o mecanismo da Figura 32. O motor de corrente contínua foi ensaiado diversas vezes a fim de registrar a corrente, o tempo para realização do movimento e a variação angular do braço. Alguns ajustes foram realizados, como a utilização de um suporte para sustentação da peça, limpeza e lubrificação do motor.

Inicialmente o sistema contava com limitadores de movimento, chaves de contato “fim de curso” para que a eletroválvula não fosse danificada nos testes. Após os testes foi constatado que as chaves não eram necessárias pois o movimento não linear já garantia que o movimento se restringisse pela sua própria natureza. Para os primeiros testes foi elaborado um comando manual básico, em forma de botoeira, para que a abertura da válvula pudesse ser testada separadamente.

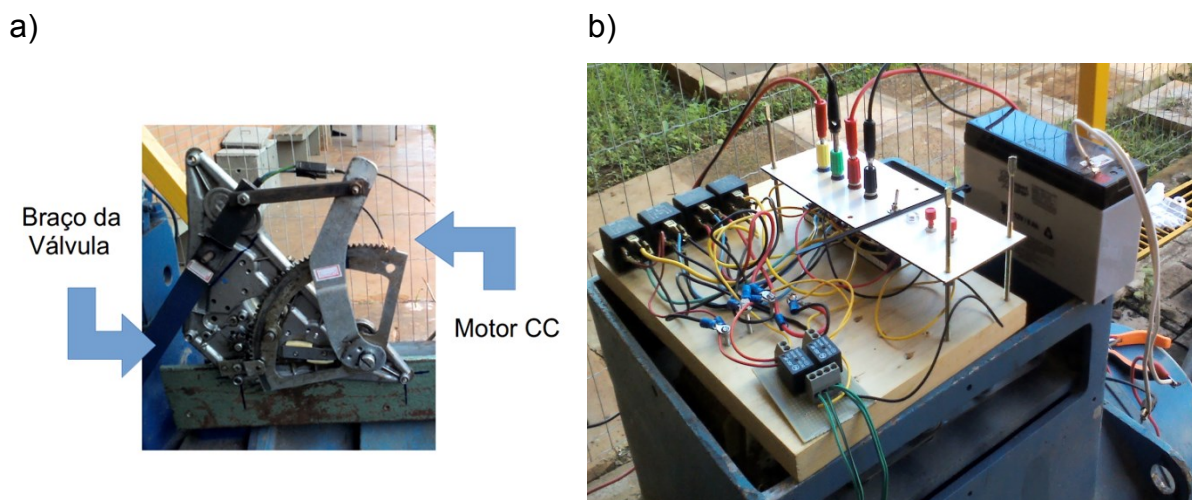


Figura 32 - Eletroválvula a) Detalhe do mecanismo; b) Acionamento manual.

Os circuitos de condicionamento foram montados utilizando resistências variáveis do tipo *trimpot*, assim é possível realizar ajuste e calibração dessa etapa como apresentado na Figura 33 a). No optoacoplador foi inserido conectores de pressão tornando o sistema modulável, para que os blocos possam futuramente ser reaproveitados para uso didático, o sinal de tensão médio é apresentado através de um LED como apontado na Figura 33 b). Na ponte H da Figura 33 c) é possível verificar a necessidade da implantação de dissipadores devido à potência chaveada, visto que o motor CC consome cerca de 2A até 3A.

O degrau de carga escolhido variou nos testes, mas para os resultados foi escolhido banco de lâmpadas e o banco de resistências, ligados por dois disjuntores como ilustrado na Figura 33 d). O comparador regenerativo em sua forma final é demonstrado na Figura 33 e), como todos os outros blocos foi realizado de maneira modular para que possa ser rearranjado com outra aplicação no futuro, o sinal de entrada é inserido pelos conectores de pressão e a saída são fios soldados da extremidade da placa, os dois LEDs vermelhos demonstram qual transistores serão chaveados na ponte H e as suas saídas que vão para o comando também são optoacopladas.

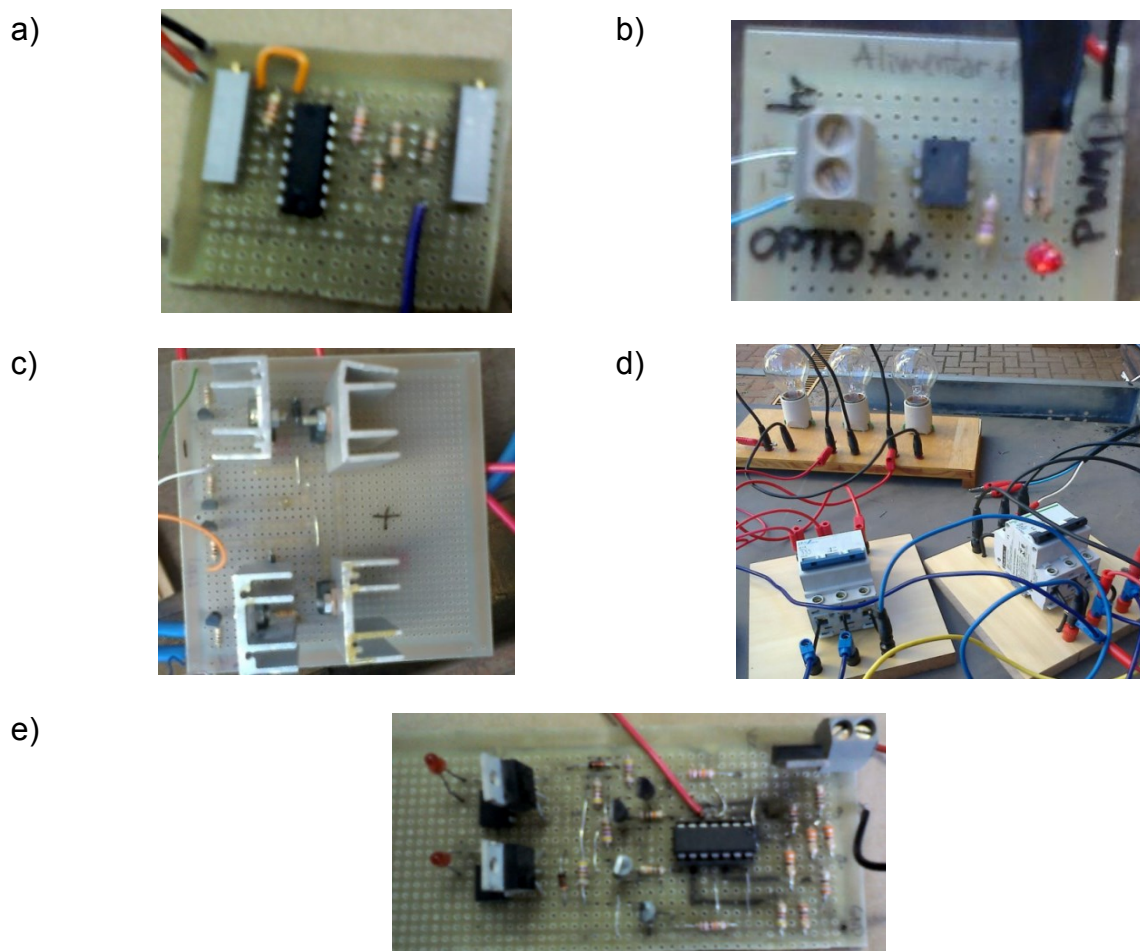
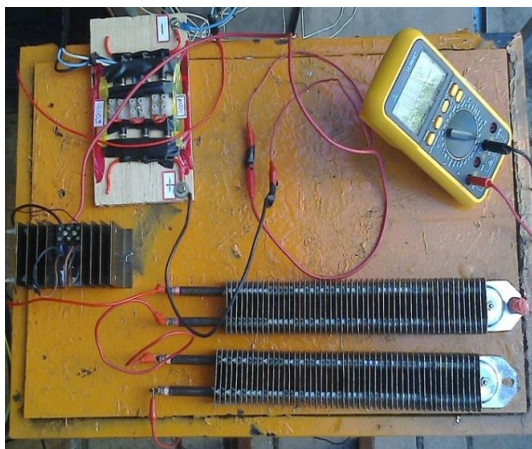


Figura 33 - Protótipos dos circuitos: a) Condicionamento; b) Optoacoplador; c) Ponte H; d) Degraus de carga; e) Comparador regenerativo.

O módulo da carga auxiliar foi composto por multímetro, retificador trifásico, MOSFET acoplado à dissipador e carga auxiliar como mostrado na Figura 34 a). O retificador é composto por diodos isolados montados com conectores em uma plataforma de madeira e as cargas são resistências combinadas empiricamente para encontrar a potência dedicada à modulação.

Na Figura 34 b), é mostrado a etapa de leitura e condicionamento. Os transformadores de potencial possuem a função de medição de tensão diretamente do barramento terminal, a maior placa são somadores, saturadores, amplificadores e buffer, compondo a adequação de sinal por meio de um CI LM324 que possui quatro amplificadores operacionais. No lado esquerdo da foto é apresentado uma fonte simples, com ajustes feitos através de reguladores LM317 e *trimpots*, assim foi possível obter todas as tensões de alimentações necessárias.

a)



b)

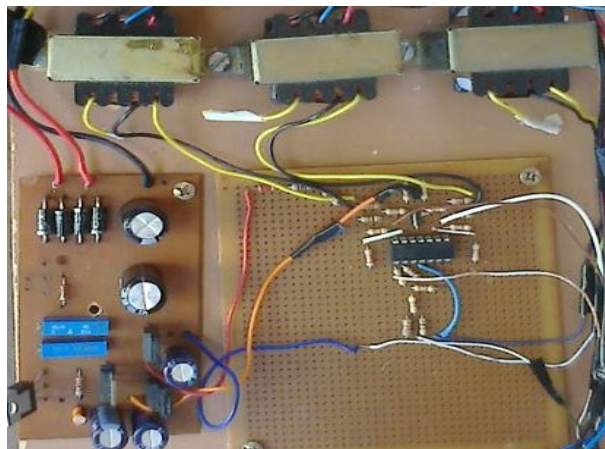


Figura 34 - Bancada de: a) Retificador, MOSFET e carga auxiliar; b) Leitura e condicionamento.

Para simular carga e degraus de carga foi utilizado um banco de cargas com aletas da Figura 35 a), com terminais acessíveis para cada par de terminais das cargas, possibilitando ligações trifásicas da maneira que fosse preciso, foi escolhido ligação em estrela devido à tensão nominal das resistências serem 127V. A unidade de resistência de potência tipo tubular “aletada” com terminais parafusáveis é demonstrado na Figura 35 b), produz aquecimento por filamento de níquel e possui sua carcaça de aço inoxidável isolado com areia de óxido de magnésio (Wattcron).

a)



b)



Figura 35 - a) Banco de cargas resistivas de 1KW cada. b) Carga resistiva com haletas.

Apesar de possuir potência suficiente para operar a máquina em condições nominais, não foram realizados degraus próximo a esse valor. Como o gerador é utilizado por outros grupos e professores, foi acordado manter em valores conservadores nos primeiros testes.

5.2.2 Metodologia e Experimentação

É essencial reiterar que a premissa de toda experimentação foi a conservação do estado da máquina, que durante o período inoperante foi submetida ao mau tempo. Como outros grupos estavam usando o gerador e existiam planos futuros para tal, todos os testes foram conduzidos de maneira limitada. A máquina não foi submetida à potências acima da nominal nem a nenhum degrau severo. Os resultados tem como propósito uma verificação da funcionalidade do sistema de maneira qualitativa e da avaliação da frequência em regime permanente de maneira quantitativa.

Utilizando a válvula ainda com o acionamento manual da Figura 32 b), o gerador foi simulado a vazio, com finalidade de apreciar a modulação da carga em PWM e calibrar a razão cíclica em regime permanente. Variando 1Hz para baixo e para cima, a faixa da carga foi definida por meio de ajuste eletrônico. As oscilografias utilizadas para a calibração das faixas são resumidas na Figura 36.

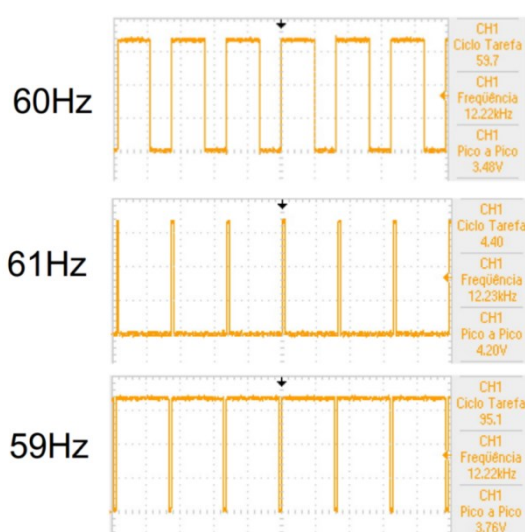


Figura 36 - Oscilografia do sinal de chaveamento para frequências simuladas de 60, 61 e 59 Hz.

Realizada a confirmação da funcionalidade do chaveamento, a excitatriz da máquina foi alimentada, consecutivamente a tensão terminal foi ligada ao retificador trifásico que alimenta o MOSFET e é chaveado pelo PWM. A forma de onda registrada nos terminais do retificador é exibida na Figura 37 a) e nos terminais carga auxiliar na Figura 37 b).

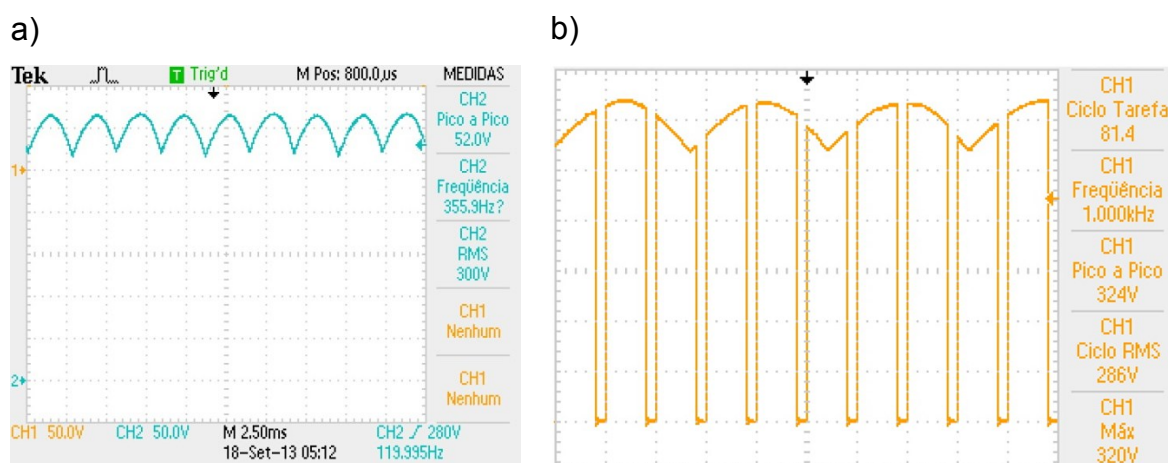


Figura 37 - Oscilografia da: a) Tensão trifásica retificada e b) Chaveada pelo MOSFET.

O ajuste dos ganhos de PID foi feito de maneira empírica, e o padrão a ser buscado era erro mínimo em regime permanente, atuação rápida da carga, e utilização de 100% da faixa de carga para um degrau de magnitude igual ou maior do que a carga auxiliar. Os valores encontrados são dispostos na Tabela 4 para o modulador de carga:

Tabela 4 - Ganhos das ações de controle da carga.

Ação de controle	Ganho
Proporcional (P)	100
Integral (I)	20
Derivativa (D)	0,001

Para verificar a funcionalidade do controlador, foi realizado um teste de prévio à carga, em que supostamente a máquina teria que partir da velocidade nula até a referência a vazio, no estágio chamado de aquecimento da máquina, para que o gerador possa estabelecer os níveis de rotação e tensão adequados e o motor Diesel

esteja aquecido. Com a válvula em uma posição média o controlador demonstrou o desempenho da Figura 38.

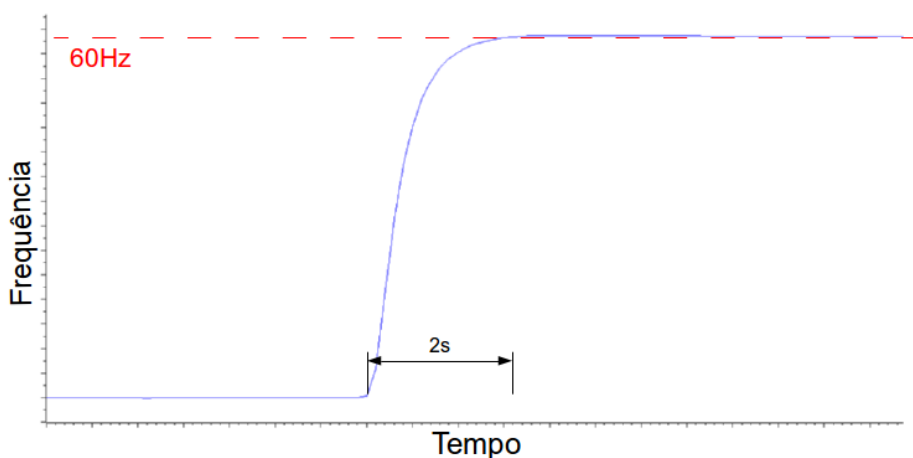


Figura 38 - Frequência na etapa de aquecimento da máquina.

Para avaliar a eficácia do controlador, ou seja, se ele conseguiria restabelecer a faixa de frequência desejada e qual a contribuição de cada controlador, foi estabelecido o método de dois degraus de carga consecutivos, sendo o primeiro degrau menor que o segundo, os valores adotados são explicitados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores da condição inicial de carga e dos degraus para avaliar a eficácia do controlador.

Rótulo	Potência
Carga inicial	Vazio
Segundo degrau	6KW
Primeiro degrau	3KW
Carga Auxiliar	3KW

Essa estratégia foi adotada não apenas para evitar a entrada de um bloco de carga muito grande, mas também para averiguar a resposta dos comandos eletrônicos de maneira separada, esperando que para o degrau menor apenas a modulação de carga seja suficiente para a regulação, e na entrada de um degrau maior investigar se a válvula atua da maneira esperada. Ao realizar o teste percebeu-se através da curva de frequência no tempo apresentado na Figura 39, que a primeira carga apresentou um afundamento pequeno, próximo a 0,1Hz, durando menos que 1 segundo, isso devido à rápida atuação do sistema eletrônico. Quando ocorre o degrau de maior carga o afundamento dura pouco mais que 1 segundo atingindo uma variação de aproximadamente 0,7Hz. Em regime permanente a frequência apresenta uma diferença de apenas 0,05Hz.

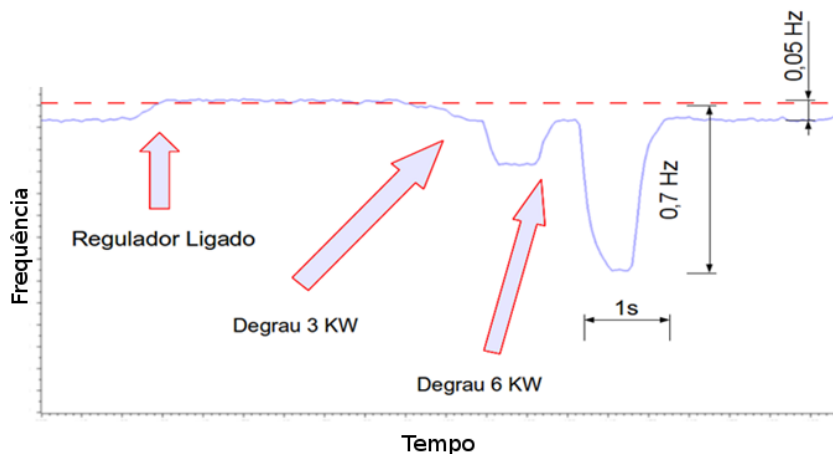


Figura 39 - Frequência gerada em função do tempo para dois degraus de carga consecutivos de 3 KW e 6KW.

Observando a atuação da válvula no tempo na Figura 40, pode-se concluir que atuou apenas uma vez, obviamente no degraú mais severo. O formato da atuação se deve ao fato de que a válvula estava inicialmente parada, e quando atingiu o valor crítico de disparo foi acionada.

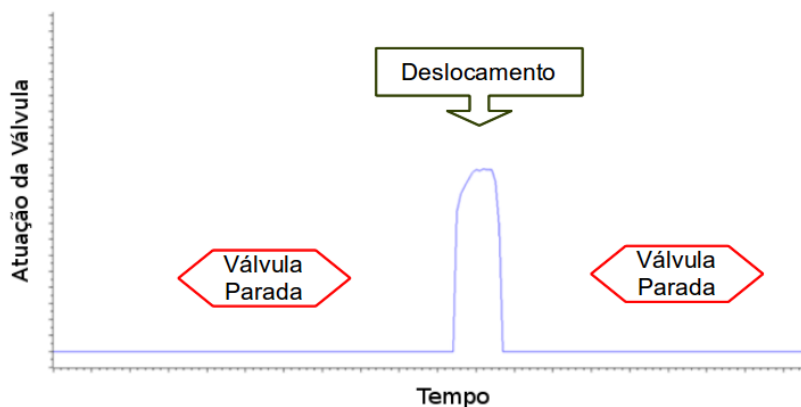


Figura 40 - Atuação dá valvula em função do tempo

O movimento ocorreu por um tempo pequeno o suficiente para que o gerador acelerasse novamente, retornando ao estado de repouso, contudo em outra posição devido à variação angular promovida pela eletroválvula. Esse movimento foi rápido ao ponto de quase não se notar o movimento da válvula a olho nu, mas aparente na forma da curva de atuação, que apesar de não apresentar precisão para tempos menores que segundo, demonstrou que a necessidade da válvula é ínfima para esse perfil de carga.

A curva da razão cíclica do PWM do mesmo experimento é observada na Figura 41, e mostra que inicialmente a carga estava em um valor médio de pouco menos que 50%. Quando ocorre o primeiro degrau de carga, a razão cíclica diminui, tentando aliviar a carga auxiliar, sanando a falha rapidamente tende a retornar ao valor de 50%.

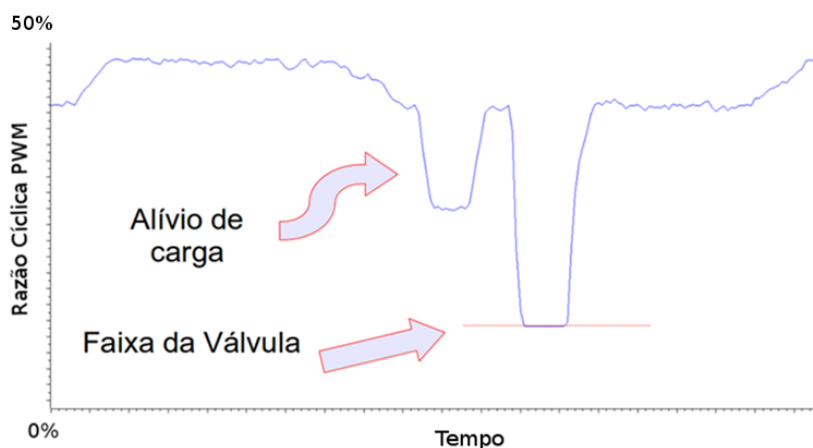


Figura 41 - Razão Cíclica do PWM em função do tempo para dois degraus de carga sucessivos.

No instante do maior degrau rapidamente o alívio tende a ser imediato, quase zerando o valor de potência da carga auxiliar, isso não acontece pois a frequência saiu da faixa antes que a modulação de carga aliviasse todo o PWM. No instante em que sai da faixa, a razão cíclica se mantém em um valor único, até que a válvula “traga” novamente à faixa de modulação de carga, retornando ao valor próximo a 50%.

Tabela 6 - Valores da condição inicial de carga e dos degraus para avaliar o desempenho do controlador.

Rótulo	Potência
Carga inicial	Vazio
Degrau	9KW
Alívio	Vazio
Carga Auxiliar	3KW

Para avaliar o desempenho do controlador, isto é, se irá permutar entre modulação de carga e acionamento da válvula como esperado, foi realizado um teste de degrau e alívio consecutivos, de mesma ordem. A condição inicial e final é a máquina em vazio, a carga auxiliar é menor do que o degrau, para propositalmente fique explícito a ação dos controladores, os valores estão dispostos na Tabela 6 -

Valores da condição inicial de carga e dos degraus para avaliar o desempenho do controlador.

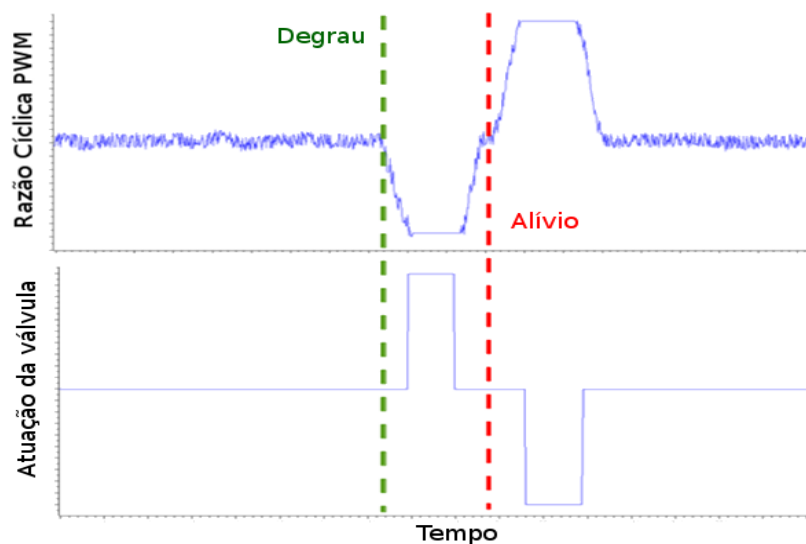


Figura 42 - Resposta do chaveamento da carga e da atuação da válvula quando submetido a um degrau e alívio de carga em sequência.

No momento do degrau mostrado no tempo como a linha pontilhada verde, a razão cíclica do PWM tende a diminuir, diminuindo a demanda. Chegando próximo à 0% da carga auxiliar a válvula é acionada por um instante de tempo, mudando ligeiramente o braço da válvula de lugar, acelerando. No momento em que a válvula para, a razão cíclica volta à aproximadamente metade (50%). A ação se repete de maneira refletida para o alívio da mesma carga, que é feito logo em seguida. Em síntese, o gráfico da razão cíclica do PWM e atuação da válvula em função do tempo para um bloco de carga que se liga durante um curto tempo e se desliga novamente é mostrado na Figura 42.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A priori, em testes realizados apenas com o regulador de velocidade, sem carga auxiliar, foi notável a atuação da válvula, pois o braço visualmente variava alguns centímetros, oscilava rapidamente e a seguir mantinha-se em uma posição. A frequência ficou limitada em uma variação de até 1Hz, embora demorasse algumas unidades de segundo. *A posteriori*, os testes com o sistema híbrido demonstraram que a válvula atua por pouquíssimo tempo com pequena variação angular do braço, corrigindo a frequência mais rápido e restringindo em faixa mais estreita do que em relação ao regulador clássico, *ipso facto* o sistema híbrido provou sua funcionalidade de maneira prática e melhora na regulação em relação ao sistema clássico.

O conceito de regulador híbrido e carga auxiliar pode e deverá ser expandido até o nível de MCH hidráulicas, utilizando os pequenos aproveitamentos hídricos de produtores rurais para que possam prosperar em seu setor utilizando de recursos de geração distribuída (Campos, et al., 2013). O regulador pode ser redimensionado para outras potências e ainda poderia ser determinado o valor mais vantajoso das cargas *dump*.

Outras topologias de regulador híbrido podem ser propostas, a partir do modelo apresentado ainda podem se derivar outras aplicações, e demais estudos devem ser realizados em torno de melhorias de baixo custo na qualidade da frequência, bem como a determinação do valor ótimo entre potência nominal/auxiliar, efeitos em período transitório e modelamento do regulador.

REFERÊNCIAS

- Almeida, José Luiz Antunes de. 1996.** *Dispositivos Semicondutores: Tiristores*. São Paulo : Editora Érica (Coleção Estude e Use), 1996. 85-7194-298-6.
- An Advanced Electronic Load Governor for Control of Micro Hydroelectric Generation.*
- Henderson, D. 2002.** 3, Edinburgh : IEEE Power & Energy Society, 2002, Vol. 13. 10.1109/60.707611.
- Anderson, P.M. e Fouad, A.A. 2003.** *Power System Control and Stability*. s.l. : Wiley-Interscience, 2003. 0-471-23862-7.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica -. 2010.** Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. *Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*. 2010.
- Bonert, R. e Hoops, G. 1990.** Stand alone induction generator with terminal impedance controller and no turbine controls. s.l. : IEEE Trans. Energy Conversion, 1990. 5.
- Braga, Newton C.** O que é PWM ? *Instituto Newton Braga*. [Online] [Citado em: 6 de Dez. de 2013.] <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>.
- Brain, Marshall. 2012.** Como funcionam os motores de carros. *HowStuffWorks Brasil*. [Online] 2012. [Citado em: 6 de Dez. de 2013.] <http://carros.hsw.uol.com.br/motores-de-carros.htm>.
- Campos, D. P., et al. 2013.** Micro-central Hidrelétrica com Controle Misto de Geração. Brasília : Revista XXII SNPTEE, 2013. Vol. 4.
- Dill, Rafaela Brittes e Flesch, Evandro Luis. 2006.** Motor Otto. *O Resgate de uma Era*. [Online] UFRGS, 2006. [Citado em: 6 de Dez. de 2013.] <http://www.mecanica.ufrgs.br/mmotor/otto.htm>.
- Fitzgerald, A. E., Charles Kingsley, Jr. e Umans, Stephen D. 2003.** *Máquinas Elétricas*. 6ª. Nova Iorque : Bookman, 2003.
- Fuchs, Ewald F. e Masoum, Mohammad A. S. 2008.** *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Oxford : Elsevier, 2008.
- Ginette, Jalbert de Castro Faria. 2011.** O Ciclo Diesel. *Física II - A*. [Online] Instituto de Física da UFRJ, 2011. [Citado em: 6 de Dez. de 2013.]

http://www.if.ufrj.br/~ginette/cursos/fit122/2011_01/programa/termodinamica/ciclos.html.

Hart, Daniel W. 2011. *Eletrônica de Potência*. São Paulo : McGraw Hill, 2011.

Heimer. 2012. Grupos Geradores. [Online] Leon Heimer S/A, 2012. [Citado em: 6 de Dez. de 2013.] http://www.heimer.com.br/v3/br/data/heimer_br.html.

Integration of Alternative Sources of Energy. **FARRET, Felix A. e SIMÕES, M. Godoy. 2006.** s.l. : Nova Jersey: IEEE Press, 2006.

Internacional Rectifier. 2001. IRF540N. *HEXFET® Power MOSFET*. California : s.n., 2001.

International Finance Corporation. 2013. Economy Rankings. *Doing Business*. [Online] The World Bank Group, 2013. [Citado em: 6 de Dez de 2013.] <http://www.doingbusiness.org/rankings>.

Jadric, Ivan. 1998. Modeling and Control of a Synchronous Generator with Electronic Control. Blacksburg : Faculty of Virginia Polytechnic Institute, 1998.

Jarman, R. e Bryce, P. 2007. Experimental investigation and modelling of the interaction between an AVR and ballast load frequency controller in a stand alone micro-hydroelectric system. 2007.

Kundur, Prabha. 1993. *Power System Stability and Control*. California : McGraw-Hill, 1993. 0-07-035958.

Load Control of a 3-Ø Self-Excited Asynchronous Generator. **Kulandhaivelu, Subramanian e Ray, K. K. 2011.** 2, Vellore : International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 2011, Vol. 3. 0975-5462.

Malvino, Albert e Bates, David J. Eletrônica Volume 2. s.l. : McGraw Hill.

Mohan, Undeland e Robbins. 2003. *Power Electronics - Converters, Applications and Design*. s.l. : John Wiley & Sons, inc., 2003. 0-471-22693-9/42908-2.

Nave, R. 2000. The Diesel Engine. *Hyper Physics*. [Online] Georgia State University, 2000. [Citado em: 6 de Dez. de 2013.] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/diesel.html>.

Nise, Norman S. 2012. *Engenharia de Sistemas de Controle*. Rio de Janeiro : LTC, 2012. 978-85-216-2135-5.

Northrop, Robert B. 2005. *Introduction to Instrumentation and Measurements*. s.l. : Taylor & Francis, 2005. 0-8493-3773-9.

Ogata, Katsuhiko. 2003. *Engenharia de Controle Moderno*. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2003. 978-85-87918-23-9.

- Pereira, José Cláudio. 2012.** Avaliações Patromoniais. *José Cláudio Engenharia*. [Online] 2012. [Citado em: 6 de Dez de 2013.] <http://www.joseclaudio.eng.br/>.
- **2012.** Motores e Geradores. *José Cláudio Engenharia*. [Online] 2012. [Citado em: 6 de Dez de 2013.] http://dc397.4shared.com/doc/LDIB_kPB/preview.html.
- Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil* . **Tolmasquim, Mauricio Tiomno. 2012.** São Paulo : s.n., 2012. ISSN 0103-4014.
- Pertence, Antonio Jr. 1996.** *Amplificadores Operacionais*. São Paulo : Makron Books, 1996.
- Portolann, César A. e Campagnolo, Jorge M. 2012.** Controle de Frequência Híbrido em Sistemas Elétricos com Incidência de Geração Distribuída. Campinas : Revista Controle & Automação, 2012.
- Renerconsys. 2010.** *Digital Load Controller for Induction Generator & Synchronous Generator: Manual Instruction*. Cimahi : s.n., 2010.
- Schulz, Daniel. 2009.** Ciclo de Diesel. *Ciclos Termodinâmicos*. [Online] UFRGS, 2009. [Citado em: 6 de Dez. de 2013.] http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_diesel.htm.
- Técnicas, Associação Brasileira de Normas. 2013.** Máquinas Elétricas Girantes. *ABNT NBR 17094-1*. 2013.
- Valkenburg, M.E. Van. 1982.** *Analog Filter Design*. Nova York : Oxford University Press, 1982. 139780195107340.
- Wattcron. *Resistência Tubular Aletada*. [Online] [Citado em: 6 de Dez. de 2013.] <http://www.wattcron.com.br/index.php?codpagina=00023226>.
- Wood, Alleb J. 1996.** *Power Generation Operation and Control*. s.l. : Wiley-Interscience Publication, 1996. 0-471-58699-4.

APÊNDICE 1 – ENSAIOS DO GERADOR

As primeiras medidas realizadas foram as resistências de enrolamento, que apresentaram valor de $0,8\Omega$ por bobina, sendo todas as medições apresentando o mesmo valor. A resistência de isolamento foi testada *a priori* pelos alunos de manutenção, que já haviam feito alguns testes, e concluíram que o gerador estava em condições operacionais.

Para determinar o valor da tensão de campo determinado como, a excitatriz foi ajustada para que a vazio a máquina gerasse tensões de linha de 220V enquanto a velocidade foi ajustada por meio de tacômetro óptico para 1800rpm, sendo fixado então em 16,8V consumindo 0,64A.

O ensaio a vazio é realizado deixando a máquina em rotação nominal e aumentando gradativamente a tensão de campo, a partir da excitação nula é feito incremento de 1V e anotando ponto a ponto a tensão terminal gerada e corrente de excitação. Organizando os pontos em uma tabela obtém-se a chamada curva característica a vazio apresentada na Figura 43, aonde é possível notar as faixas de linearidade e saturação.

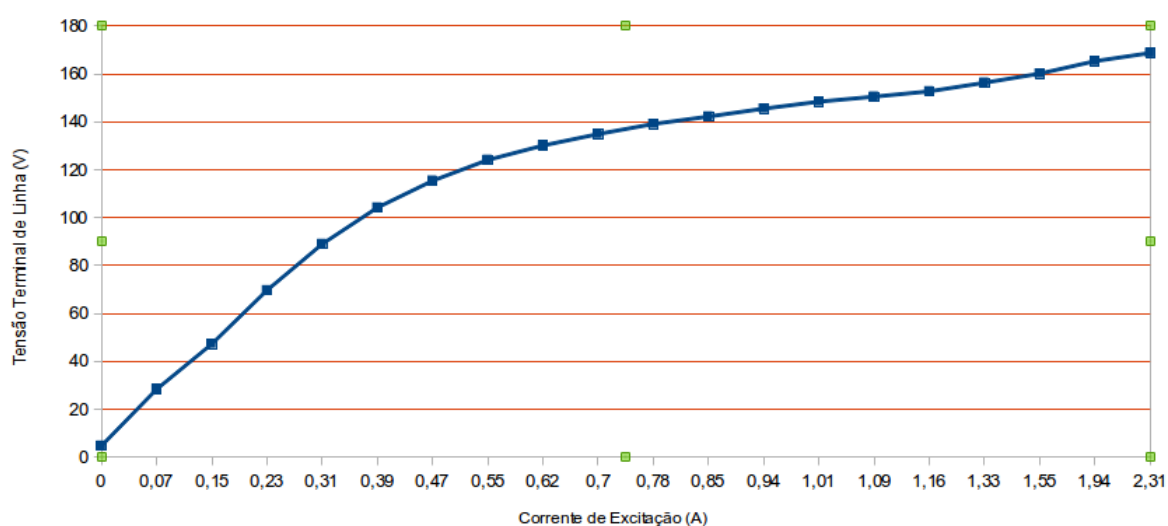


Figura 43 - Curva da característica do ensaio a vazio do gerador.

O ensaio de curto-circuito é realizado de maneira análoga, a distinção está em estabelece um curto trifásico franco entre os terminais, e como no ensaio a vazio

a excitação é aumentada de maneira incremental e avalia-se a tensão de campo e a consequência na corrente de armadura. O ensaio foi realizado até 10A para preservar a máquina, a curva de característica de curto é mostrada na Figura 44, entretanto é previsto pela literatura que seja feito até a corrente nominal (Fitzgerald, et al., 2003), sabendo que curva é representada como uma reta, pode ser feita extrapolação para os fins propostos.

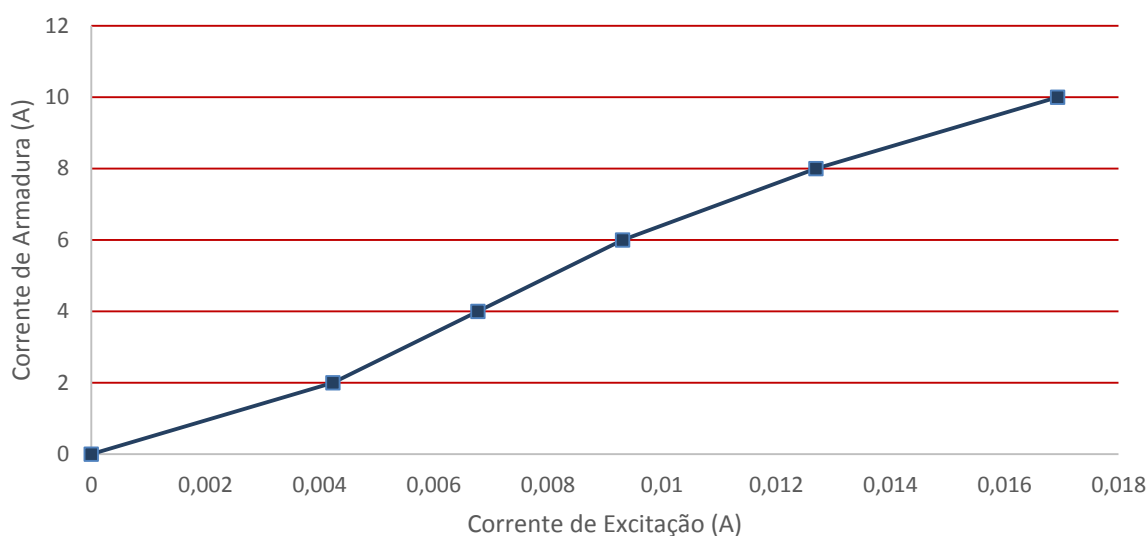


Figura 44 - Curva da característica do ensaio de curto-circuito.

A partir dos ensaios é possível inferir alguns parâmetros da máquina síncrona e também pode ser usado para avaliar a operação da máquina. No ensaio a vazio foi possível verificar que até a tensão nominal a curva é representada como uma reta, a partir desse valor inicia a região de saturação do material magnético, e no ensaio de curto-circuito apresenta-se como uma linha reta, por não operar na região não-saturada.

Essas curvas além de possuir a importância para determinar parâmetros usados na simulação, também serviram como um diagnóstico prévio da máquina quando ainda não se conhecia suas condições. Em um estudo futuro os ensaios podem ser utilizados para obter um modelo mais completo da máquina e encontrar detalhes representativos, como os valores de perdas e dimensionamento da proteção.

