

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**LUIS RAFAEL ANTUNES
MARCIO LUIZ MORETTI**

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS
DE AR COMPRIMIDO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOINVILLE, 2015**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**LUIS RAFAEL ANTUNES
MARCIO LUIZ MORETTI**

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS
DE AR COMPRIMIDO**

**LUIS RAFAEL ANTUNES
MARCIO LUIZ MORETTI**

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS
DE AR COMPRIMIDO**

JOINVILLE, 2015

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**LUIS RAFAEL ANTUNES
MARCIO LUIZ MORETTI**

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS
DE AR COMPRIMIDO**

**Submetido ao Instituto Federal
de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina
como parte dos requisitos de
obtenção do título de Tecnólogo
em Mecatrônica Industrial.**

**Orientador: Luis Mariano Nodari,
M.Eng.**

JOINVILLE, 2015

Antunes, Luis Rafael; Moretti, Marcio Luiz.

Microgeração de Energia Elétrica. Antunes, Luis Rafael; Moretti, Marcio Luiz. – Joinville: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2015. 110f.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2015.

Graduação: Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial. Modalidade: Presencial.

Orientador: Luiz Mariano Nodari, M.Eng.

1. Microgeração, 2. Energia Elétrica, 3. Sustentabilidade.

I. MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE AR COMPRIMIDO

MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE AR COMPRIMIDO

**LUIS RAFAEL ANTUNES
MARCIO LUIZ MORETTI**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Joinville, 3 de Julho de 2015.

Banca Examinadora:

Prof. Luis Mariano Nodari, M. Eng.
Orientador

Prof. Luis Barros Marques, Dr. Eng.
Avaliador

Prof. Ary Victorino da Silva Filho, M. Eng.
Avaliador

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho ao Senhor José Moretti Sobrinho (in memoriam) e a Senhora Miriam Moretti (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus, por ter nos dado saúde e força necessária para superar as dificuldades advindas.

A este instituto, seu corpo docente, direção e administração que através de sua estrutura proporcionaram a nossa capacitação acadêmica.

Ao Mestre Engenheiro Luiz Mariano Nodari, pelo suporte, paciência, orientação, apoio e confiança depositados na elaboração desse projeto.

Às nossas companheiras e aos nossos filhos, que sempre estiveram ao nosso lado.

Aos familiares e amigos, que acreditaram em nós.

Aos colegas de graduação e aos colegas que fizemos no decorrer do curso, pelos bons momentos compartilhados.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a nossa formação acadêmica.

RESUMO

O objetivo do projeto foi criar uma máquina capaz de converter o ar comprimido, desperdiçado durante o processo de testes de compressores, em energia elétrica. Neste trabalho, a máquina elétrica é composta basicamente por uma microturbina pneumática e por um gerador de energia. A turbina é responsável em converter a fonte primária de energia em energia mecânica. O gerador é responsável em converter a energia mecânica em energia elétrica. Visando adequar a energia elétrica gerada as necessidades empresariais, o sistema de controle foi projetado para que a máquina elétrica gere tensão de 220 Volts em corrente alternada com frequência de 60 Hz.

Palavras chaves: Compressores de Ar, Energia Elétrica, Máquina Elétrica, Microturbina Pneumática, Gerador de Energia, Sistema de Controle.

ABSTRACT

The objective of the project is create a machine that is capable of converting wasted compressed air during the tests process of compressors in electric energy. The electrical machine is basically assembly by a pneumatic micro turbine and a power generator. The turbine is responsible in converting a first source of energy in mechanical energy. The generator is responsible for converting mechanical energy into electrical energy. This way, with a feeling of adapt the electric power generated for the business needs, the control system project was designed to allow electric machine generates voltage of 220 Volts in alternating current with frequency of 60 Hz.

Keywords: Air Compressors, Electric Power, Electric Machine; Pneumatic Micro Turbine, Power Generator, Control System.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Compressor de ar	27
FIGURA 2 - Deslocamento positivo.....	28
FIGURA 3 - Deslocamento dinâmico	28
FIGURA 4 - Pressão do ar atmosférico.....	31
FIGURA 5 - Fluxo magnético	35
FIGURA 6 - Regra da mão direita de Fleming	37
FIGURA 7 - Força eletromotriz senoidal induzida	38
FIGURA 8 - Parafusadeira de impacto.....	39
FIGURA 9 - Sistema trifásico	41
FIGURA 10 - Rotor.....	42
FIGURA 11 - Tipos de pólos	43
FIGURA 12 - Estator	45
FIGURA 13 - Circuito equivalente do gerador síncrono	46
FIGURA 14 - Circuito elétrico motor x gerador.....	47
FIGURA 15 - Curva de magnetização.....	50
FIGURA 16 - Transformador de núcleo ferromagnético.....	52
FIGURA 17 - Sistema de controle em malha aberta	54
FIGURA 18 - Sistema de controle em malha fechada.....	54
FIGURA 19 - Diagrama de blocos em cascata	56
FIGURA 20 - Sinal de teste.....	56
FIGURA 21 - Sistema de primeira ordem.....	58
FIGURA 22 - Resposta ao sistema de controle de segunda ordem.....	59
FIGURA 23 - Resposta transitória.....	60
FIGURA 24 - Estrutura mecânica do projeto.....	66
FIGURA 25 - Sinal gerado a 9,29 Volts em corrente alternada.....	68
FIGURA 26 - Transformadores monofásicos	68
FIGURA 27 - Curva de magnetização.....	70
FIGURA 28 - Sinal gerado na fase R	71
FIGURA 29 - Fluxograma do ensaio	73
FIGURA 30 - Curva de magnetização.....	75
FIGURA 31 - Circuito elétrico.....	76
FIGURA 32 - Tensão gerada a plena carga do compressor de ar ...	77
FIGURA 33 - Perspectiva do ensaio	79
FIGURA 34 - Nível de ruído	79
FIGURA 35 - Diagrama de blocos em malha aberta	81
FIGURA 36 - Comportamento do sistema.....	82
FIGURA 37 - Curva de estabilização	82
FIGURA 38 - Diagrama de blocos em malha fechada	83
FIGURA 39 - Optoacoplador	84
FIGURA 40 - Arduino uno	85
FIGURA 41 - Servo motor	86
FIGURA 42 - Fluxograma do controle.....	87
FIGURA 43 - Variação de rotação em função do tempo	88
FIGURA 44 - Variação de rotação em função do tempo.....	89

FIGURA 45 - Variação de rotação em função do tempo	89
FIGURA 46 - Variação da frequência	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Efeito do número de pólos.....	49
TABELA 2 - Classificação do sistema de segunda ordem	59
TABELA 3 - Ganho.....	62
TABELA 4 - Ziegler e Nichols.....	63
TABELA 5 - Especificações técnicas do alternador	67
TABELA 6 - Referencial prático do ensaio a vazio.....	69
TABELA 7 - Ensaio com cargas de 100 W.....	70
TABELA 8 - Especificações técnicas da microturbina pneumática ..	72
TABELA 9 - Especificações técnicas do gerador	72
TABELA 10 - Ensaio a vazio	74
TABELA 11 - Cargas de 100 W por fase.....	76
TABELA 12 - Curva de estabilização	81
TABELA 13 - Especificações da resposta transitória	90

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Sigla	Significado Original	Tradução
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	-----
CAGI	<i>Pneuro test code for the measurement of sound from pneumatic equipment</i>	Código de teste Pneuro para a medição do som do equipamento pneumático
CD	<i>Disc Compact</i>	Disco compacto
CELESC	Central Elétrica de Santa Catarina	-----
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>	Controlador numérico por computador
DB	Diagrama de blocos	-----
ddp	Diferença de potencial	-----
ED	Equações diferenciais	-----
EPI	Equipamento de proteção individual	-----
fem	Força eletromotriz induzida	-----
FT	Função de transferência	-----
IFSC	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina	-----
Kc	Ganho	-----
Ku	Ganho crítico	-----
NR	Norma regulamentadora	-----
P	Proporcional	-----
PDF	<i>Portable Document Format</i>	Formato de documento compacto
PI	Proporcional-Integral	-----
PID	Proporcional-integral-derivativa	-----
Pu	Período de oscilação	-----
PWM	<i>Pulse width modulation</i>	Modulação por largura de pulso
RN	Resolução Normativa	-----
SC	Sistema de controle	-----
SCMA	Sistema de controle em malha aberta	-----
SCMF	Sistema de controle em malha fechada	-----

Td	Tempo derivativo	-----
Ti	Tempo integrador	-----
UC	Unidade consumidora	-----
Vca	Volts em corrente alternada	-----
Vcc	Volts em corrente contínua	-----
ZN	Ziegler e Nichols	-----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1 Justificativa.....	24
1.2 Objetivos	25
1.3 Objetivos específicos.....	25
1.4 Metodologia	25
1.5 Organização do trabalho	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Compressores de ar.....	27
2.1.1 Equação do gás perfeito	29
2.1.2 Ar comprimido	29
2.1.3 Pressão	29
2.1.4 Características do ar comprimido.....	31
2.2 Fundamentos de eletromecânica	32
2.2.1 Balanço de energia.....	32
2.2.1.1 Energia mecânica.....	32
2.2.1.2 Energia elétrica.....	33
2.2.2 Lei de Faraday.....	34
2.2.3 Lei de Lenz	35
2.2.4 Lei de Faraday-Neumann-Lenz.....	36
2.2.5 Regra de Fleming.....	36
2.2.6 Força eletromotriz senoidal induzida.....	37
2.3 Máquina primária.....	39
2.3.1 Microturbina pneumática	39
2.4 Geradores elementares	40
2.4.1 Gerador síncrono trifásico	41
2.4.1.1 Princípio de funcionamento.....	45
2.4.1.2 Ação motora e ação geradora.....	47

2.5 Transformadores	50
2.5.1 Transformador ideal.....	51
2.6 Sistema de controle.....	53
2.6.1 Método clássico	53
2.6.1.1 Sistema de controle em malha aberta.....	54
2.6.1.2 Sistema de controle em malha fechada	54
2.6.2 Modelo matemático	55
2.6.3 Análise da resposta	56
2.6.3.1 Sistema de primeira ordem	57
2.6.3.2 Sistema de segunda ordem.....	58
2.6.3.3 Especificações da resposta transitória	59
2.6.3.4 Erro estacionário.....	62
2.6.4 Método de Ziegler e Nichols.....	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 Conceito do projeto.....	64
3.2 Projeto mecânico.....	64
3.2.1 Estrutura e componentes eletromecânicos	64
3.2.1.1 Fabricação mecânica.....	65
3.2.1.2 Montagem mecânica	65
3.3 Experimentos elétricos	67
3.3.1 Alternador	67
3.3.1.1 Alternador a vazio.....	67
3.3.1.2 Alternador com carga	70
3.3.2 Gerador GST 80013	71
3.3.2.1 Gerador a vazio	74
3.3.2.2 Gerador com carga.....	75
3.4 Projeto eletrônico	80
4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	92
5. CONCLUSÃO.....	94

Oportunidades de melhoria.....	95
REFERÊNCIAS.....	97
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	99
APÊNDICES.....	101
Apêndice A - Processo de fabricação	102
Apêndice B - Código G	104
Apêndice C - Algoritmo de controle	106

1. INTRODUÇÃO

A queima de combustíveis fósseis gera resíduos tóxicos ao meio ambiente, como óxido de enxofre, óxido de carbono, metano e monóxido de carbono.

Diante do crescente aumento da demanda energética e da necessidade de reduzir os impactos ambientais é necessário investir na geração de energia elétrica a partir de fontes naturais: eólica, solar, pneumática.

Uma solução viável seria gerar energia elétrica a partir da energia mecânica proveniente do fluxo pneumático dos compressores. Tecnologia que além das vantagens ambientais, traz vantagens sociais e econômicas.

Os compressores de ar são equipamentos eletromecânicos que armazenam fluxo pneumático a alta pressão. A aplicabilidade dos compressores é determinada através de suas características físicas relacionadas à pressão e a vazão. Normalmente, os compressores são aplicados em serviços de pintura, refrigeração, acionamento de máquinas, suprimentos de ar, dentre outras.

Durante o processo de manufatura os compressores são testados em duas etapas distintas: na área de desenvolvimento de produtos e nas linhas de produção.

Na área de desenvolvimento de produtos, os compressores permaneçam em teste de vida, sendo que o ar comprimido gerado por esses compressores é devolvido novamente à atmosfera.

Processo semelhante ocorre nas linhas de produção, como por exemplo, durante a fabricação de compressores rotativos de parafuso e pistão. Cada compressor é testado por aproximadamente 3 horas e toda a energia consumida para gerar o ar comprimido é desperdiçada ao devolvê-lo para a atmosfera.

Nesse contexto foi projetado uma estação microgeradora de energia elétrica capaz de converter a energia mecânica proveniente do ar comprimido desperdiçado durante o processo de testes dos compressores, em energia elétrica.

O sistema utilizado para a geração de energia elétrica é composto basicamente por uma microturbina pneumática e um gerador síncrono. A turbina converte o fluxo pneumático em

energia cinética e o gerador transforma a energia mecânica, gerada através da máquina primária, em energia elétrica.

O sistema proposto atende parcialmente as diretrizes da Resolução Normativa (RN) 482/2012, a Unidade Consumidora (UC) pode gerar energia elétrica distribuída e converter o excedente mensal em créditos (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2012). Pois pode gerar energia elétrica e aproveitá-la de várias formas, contudo ainda não está adequado para ser interligada a rede da concessionária em função das características de controle necessárias para está integração.

A Resolução Normativa 482/2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica está disponível em anexo no *Disc Compact* (CD) que acompanha o projeto, em *Portable Document Format* (PDF).

1.1 Justificativa

O bom uso de recursos naturais tem se tornado uma preocupação ambiental. Com isso, a economia de energia deixou de ter foco exclusivamente financeiro para se tornar uma questão relacionada à imagem que se deseja passar de um negócio.

Do ponto de vista sustentável, a geração de energia elétrica distribuída a partir de uma fonte natural de energia minimiza impactos ambientais e colabora com a melhoria de vida coletiva.

Considerando que durante o processo de produção os compressores de ar devem ser testados e que o fluxo pneumático, durante os ensaios, é devolvido novamente à atmosfera, observa-se que é possível aproveitar a energia desperdiçada para gerar energia elétrica distribuída. Sendo assim, a utilização dessa tecnologia torna-se vantajosa aos fabricantes de compressores de ar.

No trabalho proposto, a microgeração de energia elétrica a partir de ar comprimido demanda baixo investimento, pois o processo de fabricação da máquina elétrica custa em torno de R\$ 1.500,00 e a fonte primária de energia não requer investimentos adicionais às indústrias fabricantes de compressores de ar.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho foi criar uma máquina capaz de converter o ar comprimido, desperdiçado durante o processo de fabricação dos compressores, em energia elétrica.

1.3 Objetivos específicos

- Contribuir para o processo de redução de impactos ambientais.
- Colaborar para a melhoria da qualidade de vida coletiva, através da geração de energia limpa.
- Utilizar a energia elétrica gerada na iluminação de ambiente industrial.

1.4 Metodologia

A pesquisa tem objeto qualitativo, visto que busca entender o fenômeno da microgeração de energia elétrica a partir do ar comprimido.

O projeto foi desenvolvido nos laboratórios de Fabricação Industrial, Robótica e Eletrônica Analógica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), campus Joinville envolvendo conhecimentos mecânicos, elétricos e eletrônicos.

1.5 Organização do trabalho

Visando proporcionar o melhor entendimento do projeto desenvolvido, o trabalho foi estruturado em cinco capítulos: (Capítulo 1) introdução, (Capítulo 2) revisão bibliográfica, (Capítulo 3) materiais e métodos, (Capítulo 4) apresentação dos

resultados e (Capítulo 5) conclusão e oportunidades de melhoria do projeto.

No primeiro capítulo, são descritos os objetivos a serem alcançados na pesquisa e os pontos que justificam a aplicabilidade do projeto.

O segundo capítulo apresenta o embasamento teórico referente aos componentes da máquina elétrica, como também explica o fenômeno da microgeração de energia elétrica.

O terceiro capítulo expõe o processo de fabricação e montagem dos componentes da máquina elétrica, os experimentos elétricos e o sistema de controle projetado.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos com o alternador trifásico de pólos salientes e com o gerador síncrono trifásico de pólos lisos.

A conclusão do projeto e, visando pesquisas futuras, as oportunidades de melhoria estão descritas no quinto capítulo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo introduz considerações teóricas e operacionais sobre a tecnologia envolvida no processo de microgeração de energia elétrica a partir de ar comprimido.

2.1 Compressores de ar

Segundo Stewart (2007), os compressores de ar são equipamentos eletromecânicos que armazenam energia pneumática a alta pressão.



FIGURA 1 - Compressor de ar

Conforme o princípio de trabalho, os compressores (figura 1) são classificados em: deslocamento positivo ou deslocamento dinâmico.

- Deslocamento positivo

O sistema rotativo comprime gradualmente e contínuo o volume do fluido, elevando a pressão do gás (STEWART, 2007).

Esses aparelhos são utilizados para operar ferramentas pneumáticas de alta potência.

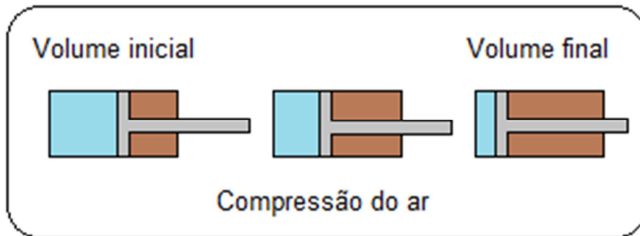


FIGURA 2 - Deslocamento positivo

A figura 2 ilustra o princípio de funcionamento dos compressores com deslocamento positivo.

- Deslocamento dinâmico

Conforme mencionado por Fialho (2008), no deslocamento dinâmico o compressor converte a energia cinética em energia de pressão do ar através de pás.

Os compressores com deslocamento dinâmico apresentam baixa vibração e baixa temperatura interna.

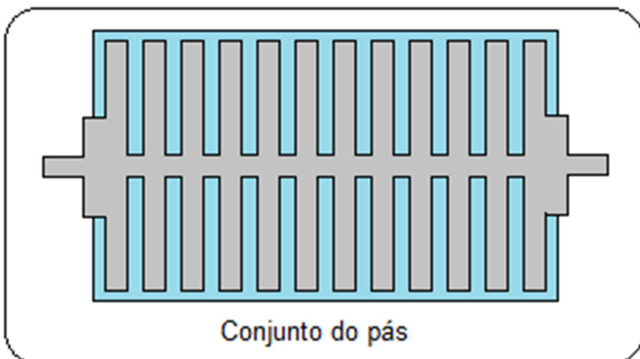


FIGURA 3 - Deslocamento dinâmico

A figura 3 apresenta o princípio de funcionamento dos compressores com deslocamento dinâmico através de pás.

2.1.1 Equação do gás perfeito

O físico francês Paul Emile Clapeyron representou a equação do gás perfeito através da relação entre pressão, volume e temperatura de um gás ideal (FIALHO, 2008).

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (2-1)$$

Onde:

$P_{1,2}$ = pressão em atm;

$V_{1,2}$ = volume em l;

$T_{1,2}$ = temperatura absoluta em K;

2.1.2 Ar comprimido

O ar comprimido é um fluido gasoso, altamente compressível e que realiza trabalho em condições hiperbárica.

Fialho (2008) afirmou que essa fonte de energia é utilizada para impulsionar cilindros e motores, realizando trabalho, além de ser empregado em outros dispositivos pneumáticos.

2.1.3 Pressão

Análogo ao que disse Stewart (2007), pressão é a grandeza física dada pela intensidade da força aplicada sobre uma superfície por unidade de área.

$$P = \frac{F}{A} \quad (2-2)$$

Sendo que:

P = pressão em Pa;

F = força em N;

A = área em m^2 .

A pressão é verificada de modo absoluto, ou através de indicativo atmosférico ou manométrico.

- Pressão atmosférica

O ar é composto por diversos gases que exercem pressão sobre a superfície da Terra. Ao nível do mar, a pressão atmosférica corresponde a aproximadamente 1,01325 bar (STEWART, 2007).

- Pressão manométrica

A pressão manométrica corresponde à pressão efetiva sobre a pressão atmosférica.

- Pressão absoluta

A pressão absoluta corresponde à soma entre a pressão atmosférica e a pressão manométrica:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man} \quad (2-3)$$

Na qual:

P_{abs} = pressão absoluta em Pa;

P_{atm} = pressão atmosférica em bar;

P_{man} = pressão manométrica em bar.

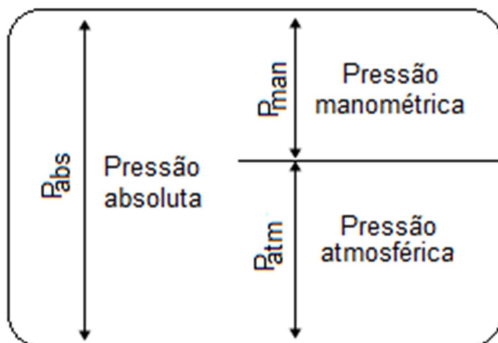


FIGURA 4 - Pressão do ar atmosférico

A figura 4 relaciona as pressões absoluta, manométrica e atmosférica.

2.1.4 Características do ar comprimido

Fialho (2008) descreveu que o ar comprimido possui massa e um conjunto de características específicas.

- Massa

O ar ocupa lugar no espaço, portanto é matéria e possui massa.

- Compressibilidade a temperatura constante

O ar comprimido ocupa todo o volume de quaisquer tipos de recipiente, adquirindo o seu formato.

- Elasticidade

Em condições ideais, desprezando o atrito, quando a força atuante é extinta, a elasticidade possibilita ao ar readquirir seu volume inicial.

- Difusividade

Permite que o ar se misture de modo homogêneo em qualquer meio gasoso não saturado.

- Expansibilidade

O ar ocupa totalmente o volume de qualquer tipo de recipiente.

2.2 Fundamentos de eletromecânica

Os fundamentos de eletromecânica expõem experimentos físicos aplicáveis na microgeração de energia elétrica.

2.2.1 Balanço de energia

A capacidade de trabalho, ação ou de movimento pode ser observada em várias formas de energia.

2.2.1.1 Energia mecânica

A energia mecânica corresponde à soma entre a energia cinética e a energia potencial.

$$E_m = E_c + E_p \quad (2-4)$$

- Energia cinética

A energia cinética está associada à quantidade de movimento de um ou mais corpos.

Portanto:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2-5)$$

- Energia potencial

A energia potencial gravitacional depende da configuração do sistema e está associada à posição do objeto.

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2-6)$$

Onde:

E_m = energia mecânica em J;

E_c = energia cinética em J;

E_p = energia potencial em J;

m = massa em Kg;

v = velocidade em m/s;

g = gravidade do ar em m/s^2 ;

h = altura em m.

UMANS, FITZGERALD e JUNIOR (2006, p.123) disseram que, “o princípio da conservação de energia afirma que a energia não é criada nem destruída: ela simplesmente muda de forma”. Por exemplo, um corpo em queda livre. Durante a queda, a energia potencial gravitacional se transforma em energia cinética. Quando o corpo atingir o repouso sobre o solo, a energia potencial gravitacional será nula e a energia cinética máxima.

2.2.1.2 Energia elétrica

É a capacidade de se realizar trabalho através de cargas elétricas.

$$E_{el} = P \cdot \Delta t \quad (2-7)$$

Sendo que:

E_{el} = energia em J;

P = potência em W;

Δt = intervalo de tempo em s.

2.2.2 Lei de Faraday

De acordo com a lei de Michael Faraday, “quando um campo magnético varia em função do tempo, produz-se um campo elétrico no espaço”. (UMANS, FITZGERALD e JUNIOR 2006, p.28)

Faraday posicionou sobre o campo magnético um determinado material condutor. Ao mudar a posição do material condutor ou do material associado ao campo magnético, ocorreu variação de corrente. Como, não houve contato direto entre o campo magnético e o condutor de eletricidade, o cientista associou a variação do campo magnético à corrente elétrica do circuito e a intitulou corrente elétrica induzida (KOSOW, 2008).

Segundo o enunciado de Faraday, O valor da força eletromotriz induzida em uma espira de área A é igual à taxa de variação do fluxo magnético através dessa espira.

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{d_t} \quad (2-8)$$

Na qual:

ε = força eletromotriz induzida em V;

d_ϕ = variação de fluxo magnético em W_b ;

d_t = variação de tempo em s.

Faraday observou que ao aumentar o número de linhas que atravessam uma determinada superfície, o fluxo de indução magnética aumenta e ao diminuir o número de linhas, o fluxo magnético diminui.

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos(\omega t) \quad (2-9)$$

O fluxo magnético é diretamente proporcional ao produto entre a indução magnética, a área da espira e ao ângulo cosseno normal à superfície (equação 2-9).

Onde:

ϕ = fluxo magnético em W_b ;
 B = indução magnética em T;
 A = área da bobina em mm^2 ;
 ω = velocidade angular em rad/s;
 t = tempo em s.

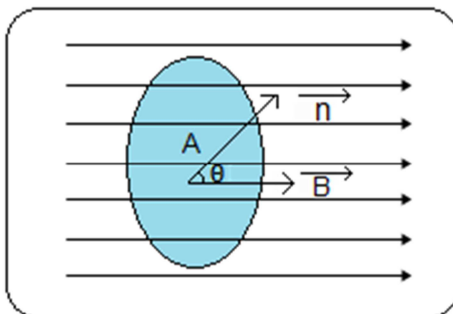


FIGURA 5 - Fluxo magnético

A figura 5 mostra o vetor indução magnética atravessando a superfície de área A.

Como já destacado por Kosow (2008), se o vetor indução magnética estiver cortando a reta normal à superfície de modo perpendicular não haverá linha de campo atravessando a espira, portanto, o fluxo magnético é nulo. Porém, quando o vetor indução magnética for paralelo à reta normal à superfície, o fluxo magnético será máximo.

2.2.3 Lei de Lenz

“Em 1833, o físico russo Heinrich Friedrich Lenz descreveu que: a ação eletrodinâmica de uma corrente opõe-se igualmente à ação mecânica que a induziu”. (KOSOW, 2008, p.10)

Conforme o enunciado de Lenz, o sentido da corrente resultante da força eletromotriz (fem) induzida sempre terá

direção contrária à variação do fluxo concatenado, ou seja, o efeito será oposto à causa.

A lei de Lenz é aplicada nos casos onde há força eletromotriz induzida, inclusive em transformadores, motores de indução, motores, geradores com volts em corrente contínua (Vcc).

2.2.4 Lei de Faraday-Neumann-Lenz

Entre 1831 e 1845, os físicos Faraday, Lenz e Franz Ernst Neumann quantificaram a indução eletromagnética: lei que rege o eletromagnetismo clássico e relaciona a força eletromotriz gerada entre os terminais do condutor sujeito à variação de fluxo magnético com o módulo da variação do fluxo num intervalo de tempo.

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2-10)$$

Sendo que:

ε = força eletromotriz gerada ou induzida em V;

d_ϕ = variação de fluxo magnético em W_b;

d_t = variação de tempo em s.

O sinal negativo da equação descrita é derivado dos estudos de Lenz, onde foi comprovado que a corrente induzida tem sentido que gera fluxo induzido oposto ao fluxo indutor.

A lei da indução eletromagnética serve de base para o funcionamento dos alternadores, dínamos e transformadores.

2.2.5 Regra de Fleming

A regra de Fleming da mão direita determina o sentido de orientação da força eletromotriz induzida no campo magnético.

Fleming pressupõe que o campo é estacionário e que o condutor se move em relação ao campo de referência.

Kosow (2008) descreveu que o condutor pode revolucionar sentido ascendente ou descendente. Entre 0° e 180° , o movimento do condutor é ascendente e positivo e entre 180° e 360° é descendente e negativo.

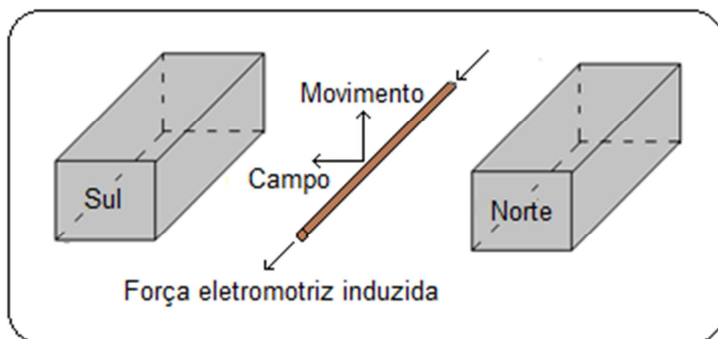


FIGURA 6 - Regra da mão direita de Fleming
Fonte: adaptado KOSOW, 2008

A figura 6 ilustra a regra de Fleming.

O polegar indica o sentido do movimento, o indicador o sentido do campo magnético e o dedo médio a força eletromotriz induzida (CARVALHO, 2008).

2.2.6 Força eletromotriz senoidal induzida

Falcone (2009) relatou que a força eletromotriz induzida corresponde à propriedade física de um determinado dispositivo produzir corrente elétrica no circuito. Ela varia conforme a variação de fluxo magnético no circuito, como também ao ângulo formado entre campo e condutor.

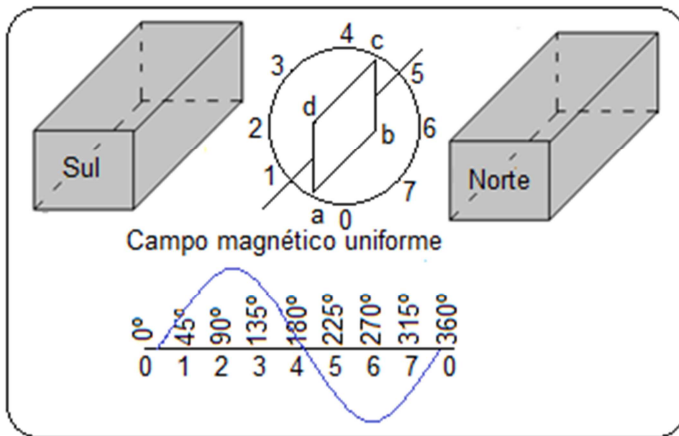


FIGURA 7 - Força eletromotriz senoidal induzida
Fonte: adaptado KOSOW, 2008

A figura 7 mostra a bobina com espira unitária girando sentido horário a velocidade constante.

Segundo Kosow (2008), no ponto zero não há força eletromotriz induzida, pois o condutor se movimenta paralelo o campo magnético. Quando a bobina estiver 90° em relação ao campo magnético, o fluxo concatenado será máximo.

Quanto ao sentido de movimentação das espiras, a fem será positiva ao revolucionar sentido horário e negativo sentido anti-horário.

A força eletromotriz induzida está descrita na equação 2-11:

$$e_{ind} = N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \text{sen}(\theta) \quad (2-11)$$

Na qual:

e_{ind} = força eletromotriz induzida em V;

ϕ = fluxo magnético em W_b ;

B = densidade de fluxo magnético em T;

A = área da bobina em m^2 ;

θ = ângulo formado entre o condutor e o campo magnético.

2.3 Máquina primária

De acordo com Toro (1999), máquina primária é um dispositivo que transforma a energia proveniente de uma fonte natural em energia mecânica.

O acionamento mecânico do eixo central da máquina primária é determinado através do ajuste de potência do conjunto máquina-gerador.

O tipo de turbina utilizado no processo de geração ou cogeração de energia é projetado de acordo com a fonte natural de energia trabalhada: hidráulica, pneumática, eólica (FALCONE, 2009).

2.3.1 Microturbina pneumática

Nas máquinas elétricas, a turbina pneumática funciona como um elo entre a fonte primária de energia e o gerador.

Conforme Stewart (2007), as ferramentas pneumáticas são responsáveis em transformar o fluxo pneumático a alta pressão em energia cinética de rotação. Posteriormente, a energia gerada pela turbina é transportada ao gerador, onde sofrerá novo processo de transformação de energia.

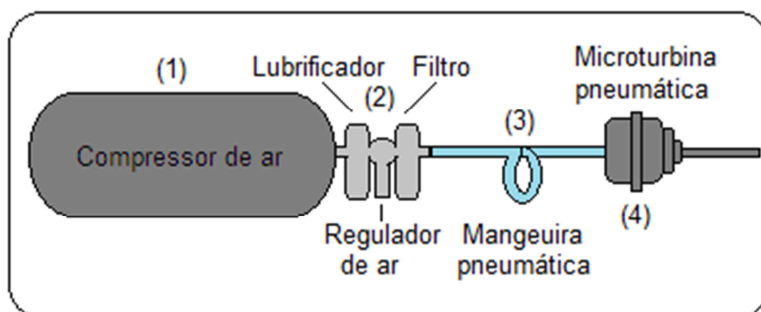


FIGURA 8 - Parafusadeira de impacto
Fonte: adaptado Manual FG3500

O manual técnico da ferramenta pneumática modelo FortG 3500 está disponível em anexo no *Disc Compact* que acompanha o projeto, em *Portable Document Format*.

A figura 8 apresenta a ligação da turbina pneumática:

1. Compressor ou linha de compressores de ar

Mantêm a fonte de energia natural pressurizada.

2. Sistema de filtragem e de lubrificação

Durante o trabalho, o excesso de óleo se mistura as partículas de impurezas do ar comprimido.

3. Mangueira de transporte

Conduz o fluxo pneumático do compressor de ar até a máquina primária à alta pressão.

4. Microturbina pneumática

Transforma a fonte primária em energia cinética de rotação.

2.4 Geradores elementares

Kusko, Fitzgerald e Junior (1975) citaram que os geradores elementares são máquinas que convertem potência mecânica em potência elétrica através do movimento linear ou alternativo produzido por uma fonte primária.

O processo de transformação de energia dos geradores está fundamentado na lei de Lenz.

Lenz afirmou que: quando existe indução magnética, a direção da força eletromotriz induzida é tal, que o campo magnético dela resultante tende a parar o movimento que produz a força eletromotriz.

Em 1831 Michael Faraday, posicionou um ímã no centro de uma espira, gerando força eletromotriz.

Os estudos de Faraday deram origem aos geradores elementares. Basicamente, o gerador elementar é constituído por uma espira que revoluciona no campo magnético estacionário através de anéis coletores.

Conforme o gerador é constituído, esses aparelhos geram tensão em corrente contínua ou tensão em corrente alternada (Vca).

Umans, Fitzgerald e Junior (2006) disseram que há dois tipos de máquinas elétricas de corrente alternada: máquinas assíncronas e máquinas síncronas. A diferença entre os geradores consiste basicamente na excitação do sistema: modelos assíncronos não necessitam de excitatriz.

2.4.1 Gerador síncrono trifásico

Possui um enrolamento trifásico equilibrado, com o eixo de cada fase deslocado 120° (figura 9).

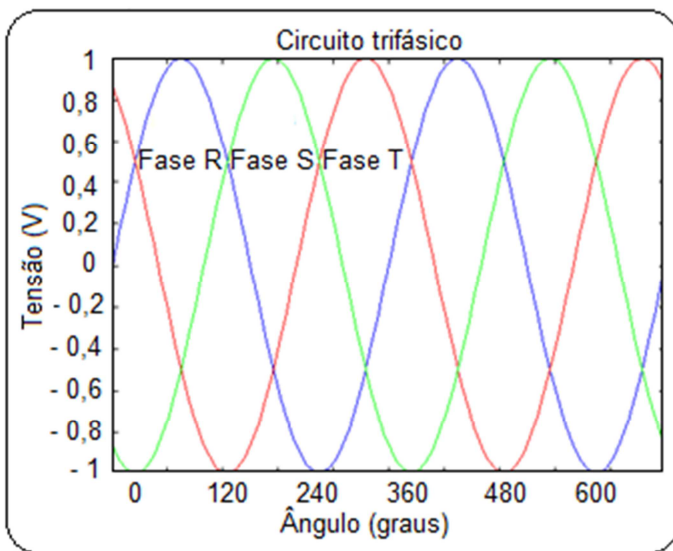


FIGURA 9 - Sistema trifásico

De acordo com Toro (1999), o gerador síncrono trifásico converte energia mecânica em energia elétrica a partir de uma fonte de excitação externa. É chamado de síncrono por que o campo magnético girante e o rotor operam na mesma velocidade, a síncrona.

A seguir, serão descritos os principais componentes do gerador síncrono trifásico.

- Rotor

Conforme Umans, Fitzgerald e Junior (2006), o rotor geralmente corresponde à parte girante da máquina elétrica. É constituído por um conjunto de lâminas ferromagnético arranjado sobre o enrolamento de campo, e que ao ser excitado com corrente contínua produz o campo magnético responsável por interagir com o campo produzido pelo enrolamento do estator.

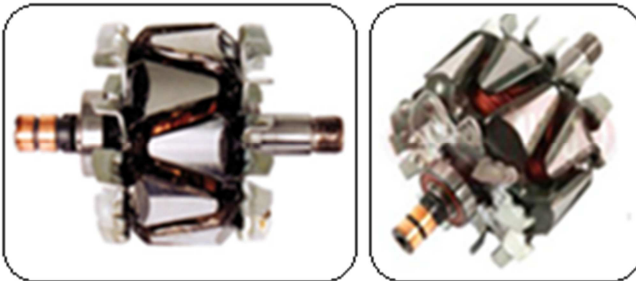


FIGURA 10 - Rotor

A figura 10 ilustra o rotor do alternador automotivo.

Falcone (2006) disse que os rotores são constituídos com pólos não salientes ou com pólos salientes.

Os rotores de pólos não salientes ou lisos são utilizados em máquinas que operam com média ou alta velocidade síncrona e que geram baixa frequência.

Os rotores de pólos salientes são utilizados em máquinas que operam com baixa ou média velocidade síncrona e que geram alta frequência. As bobinas desse tipo de rotor

apresentam descontinuidade entre o entreferro e as periferias do núcleo de ferro.

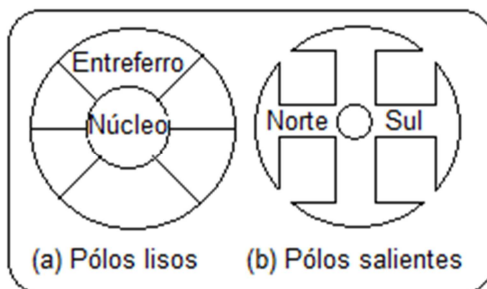


FIGURA 11 - Tipos de pólos

A figura 11 mostra o rotor de pólos não salientes e o rotor de pólos salientes.

De acordo com Kosow (2008), a máquina elétrica girante de corrente alternada pode ser construída com enrolamento de campo fixo ou móvel. O campo móvel possui campo rotativo e armadura estacionária e o campo fixo armadura rotativa e campo estacionário.

- Estator

Kosow (2008) descreveu que o estator geralmente corresponde à parte estacionária da máquina elétrica. É constituído por bobinas de fios de cobre fixadas sobre um núcleo de aço, onde a corrente elétrica circulante no estator é induzida através do campo magnético gerado no rotor.

Conforme as bobinas são arranjadas nas ranhuras da armadura, o sistema é classificado em monofásico, bifásico ou trifásico.

Monofásico quando as bobinas são dispostas em série sem separação mecânica; bifásico quando dois enrolamentos são separados mecanicamente e trifásico quando há separação mecânica de três enrolamentos em série.

Para saber qual o número de condutores, basta saber qual o número de espiras, pois o número de condutores é o dobro do número de espiras em uma dada bobina:

$$\text{Onde: } Z = 2. a \quad (2-12)$$

Z = número de condutores na armadura;
 a = número total de espiras da armadura.

Conforme mencionado por Kosow (2008), nos geradores síncronos, normalmente são utilizados bobinas de passo inteiro, ou seja, a isolação é realizada de centro a centro de pólo.

Kosow (2008) ainda descreveu que de acordo com a intensidade de corrente circulante no estator, a armadura pode ser constituída ondulado ou imbricado.

Armaduras onduladas operam a alta tensão e baixa corrente. O tipo ondulado requer apenas duas escovas e o número de caminhos independe da quantidade de pólos.

$$a = 2. m \quad (2-13)$$

Conforme a equação 2-13 o número de caminhos em paralelo é diretamente proporcional à multiplicidade.

Sendo que:

a = número de caminhos em paralelo na armadura;
 m = multiplicidade de armadura.

Armaduras imbricadas são utilizadas em operações com alta corrente contínua e baixa tensão. Esse sistema requer que o número de escovas seja proporcional ao número de pólos.

O número de caminhos em paralelo na armadura é diretamente proporcional o produto entre a multiplicidade de armadura e ao número de pólos.

$$a = m. P \quad (2-14)$$

Na qual:

a = número de caminhos em paralelo na armadura;

m = multiplicidade de armadura;

P = número de pólos.

Esse sistema requer que o número de escovas seja proporcional ao número de pólos.

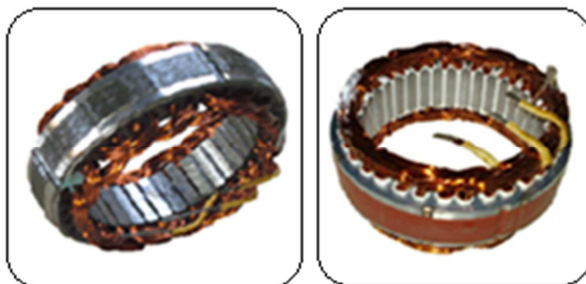


FIGURA 12 - Estator

A figura 12 ilustra o estator em perfil e na vista superior.

2.4.1.1 Princípio de funcionamento

Como já destacado por Kosow (2008), quando o eixo do rotor girar à velocidade angular constante ocorrerá variação do fluxo concatenado e geração de campo magnético no entreferro.

O campo gerado, ao interagir com os condutores da armadura, varia em função do tempo e induzem tensão no enrolamento do estator.

A equação correspondente à tensão gerada no gerador síncrono é descrita a seguir:

$$E_f = 4,44 \cdot f \cdot N_f \cdot \phi_f \cdot K_w \quad (2-15)$$

Onde:

E_f = tensão eficaz induzida na bobina da armadura;

f = frequência em Hz;

N_f = número de espiras/bobinas;

Φ_f = fluxo por pólos em linhas o maxwells.

A equação 2-16 descreve a tensão gerada nos terminais por fase, tanto em circuito monofásico quanto trifásico.

$$V_f = E_{gf} - I_a \cdot R_a - I_a \cdot (jX_a) \pm E_{ar} \quad (2-16)$$

Sendo que:

V_f = tensão terminal por fase;

E_{gf} = tensão gerada por fase;

$I_a \cdot R_a$ = queda de tensão no enrolamento da armadura, tendo uma resistência efetiva (corrente alternada) de R_a , por fase ;

$I_a \cdot (jX_a)$ = queda de tensão na reatância do enrolamento da armadura associada ao fluxo disperso, por fase;

E_{ar} = efeito da reação da armadura.

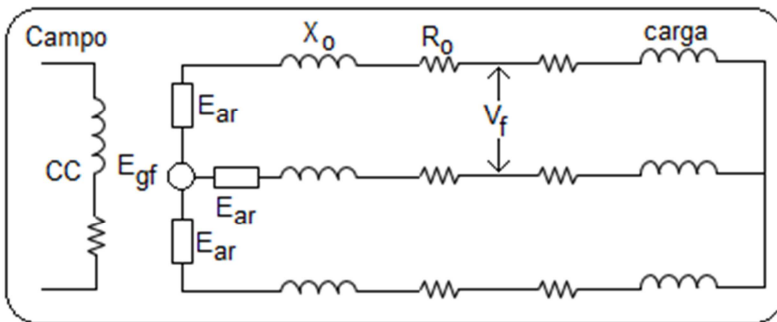


FIGURA 13 - Circuito equivalente do gerador síncrono

A figura 13 ilustra o circuito elétrico de um gerador síncrono trifásico.

2.4.1.2 Ação motora e ação geradora

Como a ação motora e a ação geradora ocorrem simultaneamente, a máquina elétrica girante poderá funcionar como motor ou como gerador (KOSOW, 2008).

Na ação motora, a força eletromotriz é gerada a partir do conjugado inicial do motor.

Umans, Fitzgerald e Junior (2006) relataram que na ação geradora, no momento em que o rotor gira por meio de uma máquina primária, a força eletromotriz é induzida nos terminais dos enrolamentos.

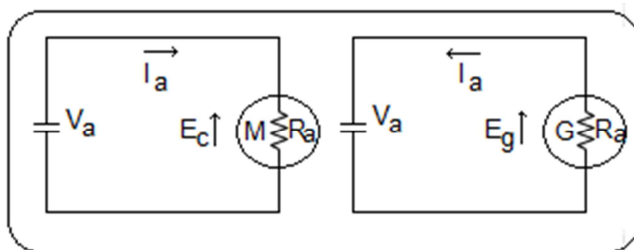


FIGURA 14 - Circuito elétrico motor x gerador

A figura 14 apresenta o circuito equivalente ao motor e ao gerador.

Conforme a lei de Lenz: na ação motora a tensão gerada se opõe a corrente da armadura e na ação geradora, o torque eletromagnético se opõe a rotação.

Ao aplicar a Lei de Kirchhoff das tensões nas malhas.

Para o circuito correspondente ao motor:

$$V_a = I_a \cdot R_a + E_c \quad (2-17)$$

Para o circuito correspondente ao gerador:

$$E_g = I_a \cdot R_a + V_a \quad (2-18)$$

Na qual:

I_a = corrente na armadura em A;

R_a = resistência na armadura em Ω ;

V_a = tensão nos terminais da armadura em V;

E_c = fem gerada na armadura em V;

E_g = fem gerada na armadura em V.

As características operacionais na ação geradora são descritas a seguir:

- Frequência gerada

No dispositivo de dois pólos, a força eletromotriz gerada pela armadura muda de direção a cada meia revolução. Nesse processo, é produzido um pulso negativo e um pulso positivo (KUSKO, FITZGERALD e JUNIOR, 1975).

A frequência em ciclos por segundo depende do número de rotação por segundo:

$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{n_s}{60} = \frac{P \cdot n_s}{120} \quad (2-19)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-20)$$

Onde:

f = frequência em Hz;

P = número de pólos;

n_s = velocidade síncrona em rpm;

T = período em s.

- Número de pólos

Segundo Umans, Fitzgerald e Junior (2006), a velocidade síncrona do gerador é inversamente proporcional ao número de pólos. Rotores com pólos salientes operam com baixa ou média

velocidade e rotores com pólos não salientes com velocidades altas.

Visando acondicionarem vários condutores no enrolamento de excitação e de armadura, os geradores de baixa ou média velocidade síncrona requerem armaduras do estator de grande circunferência e pequeno comprimento axial.

Geradores de alta velocidade síncrona devem ser dispostos em estatores cuja área possui pequena circunferência e grande comprimento axial.

TABELA 1- Efeito do número de pólos

Pólos	Frequência gerada (Hz)	Velocidade síncrona (rpm)
4	50	1500
4	60	1800
12	50	500
12	60	600
36	50	166,66
36	60	200

De acordo com a tabela 1, máquinas elétricas girantes com elevado número de pólos operam com baixa velocidade síncrona.

- Regulação de tensão

A regulação de tensão é definida a partir da variação de tensão sem carga até plena carga.

A tensão da armadura a plena carga é obtida através da equação 2-21:

$$V_R = \left(\frac{V_{NL}}{V_{FL}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2-21)$$

Sendo que:

V_R = regulação de tensão percentual;

V_{NL} = tensão nominal sem carga em V;

V_{FL} = tensão terminal a plena carga em V.

- Curva de magnetização

A curva de magnetização corresponde à variação entre a densidade de fluxo e a força eletromotriz induzida da origem ao ponto de saturação (KUSKO, FITZGERALD E JUNIOR, 1975).

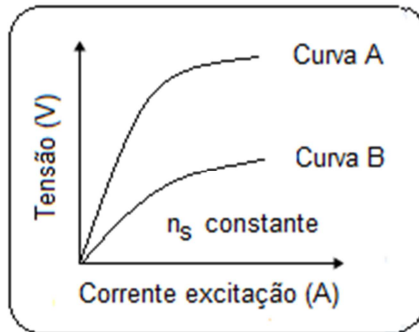


FIGURA 15 - Curva de magnetização

A figura 15 mostra as características de circuito aberto das máquinas A e B.

Ao excitar o gerador sem carga com velocidade síncrona constante, notamos diferença de potencial (ddp) entre o ferro e o entreferro.

De acordo com Falcone (2009), a curva de saturação em vazio é levantada para cada velocidade de acionamento da máquina síncrona.

2.5 Transformadores

Umans, Fitzgerald e Junior (2006, p.69) argumentaram que, “um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum”.

O transformador é constituído basicamente por um núcleo de ferro laminado e por bobinas primárias e secundárias.

Segundo Toro (1999), três transformadores monofásicos ligados em triângulo, estrela, triângulo-estrela ou estrela-triângulo formam um banco trifásico de transformadores.

A equação do coeficiente de acoplamento magnético é descrita a seguir:

$$K = \frac{\Phi_m}{\Phi_m - \Phi_1} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (2-22)$$

O rendimento do transformador é determinado de acordo com a disposição das bobinas sobre o núcleo de ferro e o coeficiente de acoplamento magnético (TORO, 1999).

A equação 2-23 determina a indutância mútua entre as bobinas primária e secundária.

$$M = K \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (2-23)$$

Na qual:

K = coeficiente de acoplamento;

Φ_m = fluxo mútuo concatenado das bobinas 1 e 2 em W;

Φ_1 = dispersão de fluxo concatenado da bobina 1 em W;

M = indutância mútua entre as bobinas 1 e 2 em H;

$L_{1,2}$ = indutância do primário e no secundário em H.

2.5.1 Transformador ideal

Conforme Umans, Fitzgerald e Junior (2006), o transformador ideal não possui perdas por dispersão de fluxo eletromagnético entre o primário e o secundário, ou seja, o rendimento é igual a 100 %. Nesse tipo de aparelho, a permeabilidade magnética do núcleo é elevada.

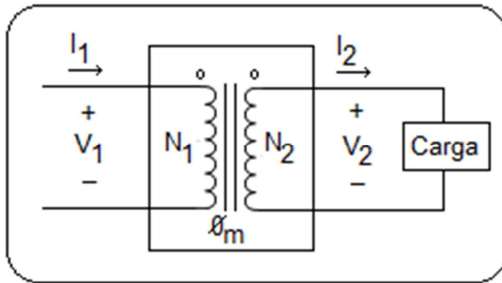


FIGURA 16 - Transformador de núcleo ferromagnético

A figura 16 apresenta um transformador ideal com carga.

O princípio da quantificação de Neumann da lei de Faraday diz que:

$$E_{1,2} = N_{1,2} \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2-24)$$

Portanto a relação de transformação é dada a seguir:

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2-25)$$

A relação de transformação pode ser calculada em qualquer tipo de transformador.

Onde:

$I_{1,2}$ = corrente em A;

$N_{1,2}$ = número de espiras;

α = relação de transformação;

$V_{1,2}$ = tensão em V.

2.6 Sistema de controle

Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada (NICE, 2012, p.2).

A seguir, serão descritos as principais variáveis do sistema de controle:

- Variável controlada

A variável que será controlada é a grandeza ou condição que é medida e controlada.

- Sinal de controle

Manipula e gera o sinal que será aplicado no sistema.

- Planta

Corresponde a qualquer objeto físico a ser controlado.

- Sistema

“É a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo” (OGATA, 2010, p.3).

Atualmente, para controlar um sistema são utilizados métodos de controle clássico, moderno, ou robusto.

2.6.1 Método clássico

O processo ou planta pode ser controlado por um sistema de controle em malha aberta (SCMA) ou por um sistema de controle em malha fechada (SCMF).

2.6.1.1 Sistema de controle em malha aberta

Nesse sistema, a ação de controle independe do sinal de saída. Logo, a saída não é comparada ao sinal de referência.

Segundo Ogata (2010), o sistema de controle em malha aberta é indicado quando a relação entre a entrada e a saída seja conhecida, em plantas onde não há perturbações significativas ou quando a estabilidade não interfere na eficácia do sistema.

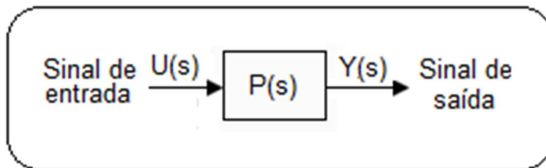


FIGURA 17 - Sistema de controle em malha aberta

A figura 17 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle em malha aberta.

2.6.1.2 Sistema de controle em malha fechada

Análogo ao que diz Nice (2012), no sistema de controle em malha fechada a planta é realimentada com o objetivo de reduzir o sinal de erro atuante (oscilações na amplitude). A ação de controle interfere diretamente no sinal de saída.

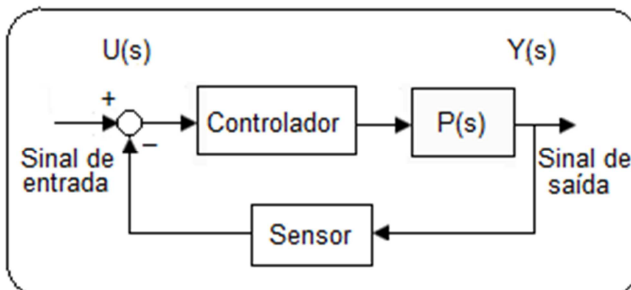


FIGURA 18 - Sistema de controle em malha fechada

A figura 18 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada.

2.6.2 Modelo matemático

Para descrever o modelo matemático é necessário conhecer o comportamento dos sinais de entrada/saída e a estrutura interna do sistema.

As equações dos sistemas elétricos, mecânicos, fluídicos, térmicos, químicos são descritas a partir das leis da física.

Conhecendo o modelo matemático do sistema, é possível descrever sua função de transferência (FT).

Nice (2012) enfatizou que a função de transferência é limitada a sistemas de equações diferenciais (ED) invariantes no tempo e relaciona o sinal de saída com o sinal de entrada do sistema.

Considerando as condições iniciais nulas:

$$Y(s) = G(s).X(s) \quad (2-26)$$

Sendo que:

$G(s)$ = função de transferência;

$Y(s)$ = transformada de Laplace da saída;

$X(s)$ = transformada de Laplace da entrada.

Quando a função de transferência não for conhecida ou o sistema se comportar de modo não linear, ela pode ser determinada de modo experimental até se obter a saída desejada.

Ogata (2010) destacou que as plantas e as variáveis envolvidas no sistema de controle geralmente são representadas por diagramas de blocos (DB). Os diagramas de blocos estabelecem a relação entre o sinal de referência e o de saída. As variáveis do sistema de controle são interligadas por blocos funcionais em sentido único.

Considerando um sistema de controle em malha fechada, o diagrama de blocos pode ser construído em série ou em paralelo.

Nos blocos interligados em série, quando a saída de um bloco é afetada pelo bloco seguinte, é necessário combinar as plantas em um único bloco. Esse procedimento é chamado de redução de blocos (NICE, 2012).

Blocos complexos, com muitas ramificações também devem ser reorganizados.

No sistema em série ou cascata:

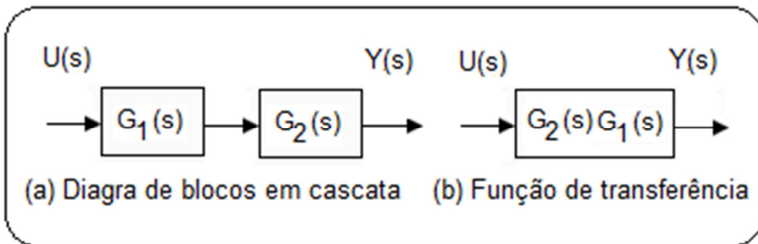


FIGURA 19 - Diagrama de blocos em cascata

2.6.3 Análise da resposta

Conhecido o modelo matemático do sistema, é necessário descrever o seu desempenho e as suas características.

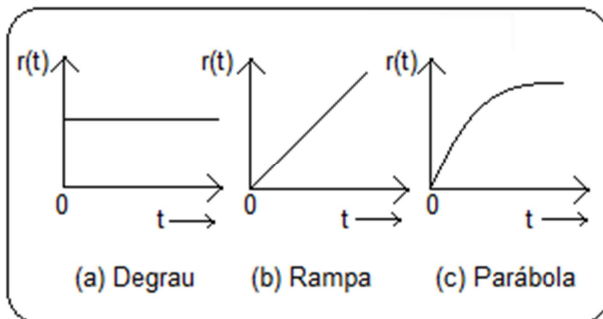


FIGURA 20 - Sinal de teste

As características do sistema são determinadas através da análise do comportamento do sinal de entrada (figura 20).

Nice (2012) argumentou que no tempo, a resposta subdivide-se em: parte transitória e de estado estacionário. A resposta transitória inicia no sinal de entrada e termina no sinal de saída. A resposta de regime permanente inicia a partir do sinal de saída.

Logo:

$$y(t) = y_t(t) + y(\infty) \quad (2-27)$$

Na qual:

$y_t(t)$ = resposta transitória;

$y(\infty)$ = resposta estado estacionário ou de regime permanente.

A resposta ao sistema transitório pode ser de primeira, segunda ou de ordem superior.

2.6.3.1 Sistema de primeira ordem

Segundo Nice (2012), os sistemas de primeira ordem são as equações diferenciais que envolvem apenas a primeira derivada da saída na equação.

Para controlar sistemas de primeira ordem:

$$c(S) = \frac{1}{T_S + 1} \quad (2-28)$$

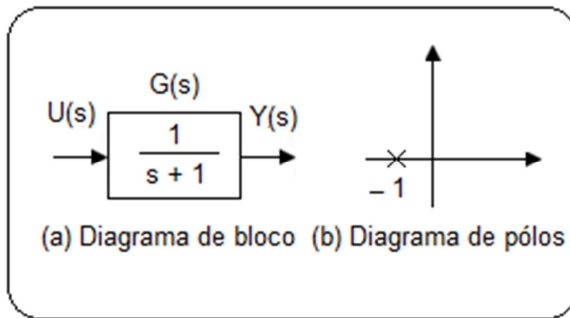


FIGURA 21 - Sistema de primeira ordem

A figura 21 apresenta os diagramas de bloco e de pólos do sistema de primeira ordem.

2.6.3.2 Sistema de segunda ordem

Conforme Ogata (2010), os sistemas de segunda ordem envolvem a primeira e a segunda derivada da saída na equação, sendo que o fator de amortecimento e a frequência natural não amortecida interferem diretamente no desempenho do sistema.

$$c(S) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-29)$$

A equação 2-30 determina a frequência natural amortecida:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2-30)$$

Onde:

ζ = fator de amortecimento;

ω_n = frequência natural não amortecida em rad/s;

ω_d = frequência natural amortecida em rad/s.

TABELA 2 - Classificação do sistema de segunda ordem		
Coefficiente	Equação	Sistema
$\zeta=0$	jw_n	Não amortecido
$0<\zeta<1$	$-\zeta w_n \pm jw_n\sqrt{1-\zeta^2}$	Subamortecido
$\zeta=1$	$-w_n$	Criticamente amortecido
$\zeta>1$	$-\zeta w_n \pm w_n\sqrt{\zeta^2-1}$	Sobreamortecido
$\zeta<0$	$-\zeta w_n \pm jw_n\sqrt{1-\zeta^2}$	Instável

A tabela 2 relaciona o coeficiente de amortecimento com a resposta do sistema de segunda ordem.

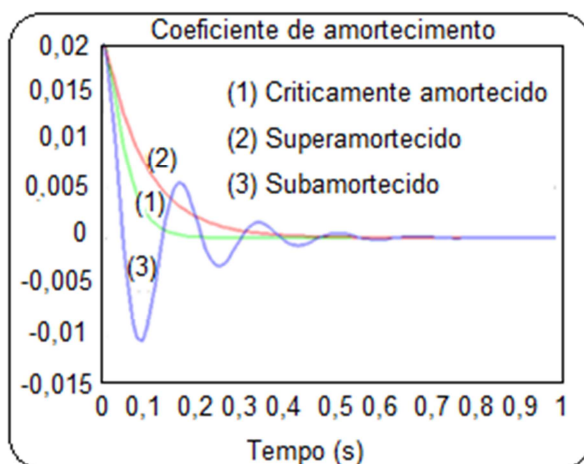


FIGURA 22 - Resposta ao sistema de controle de segunda ordem
Fonte: adaptado Ogata, 2010

A figura 22 apresenta respostas diferentes para o mesmo sistema.

2.6.3.3 Especificações da resposta transitória

As condições iniciais do sistema influenciam diretamente na resposta transitória. Até atingir o regime permanente, o sistema de controle apresenta oscilações amortecidas.

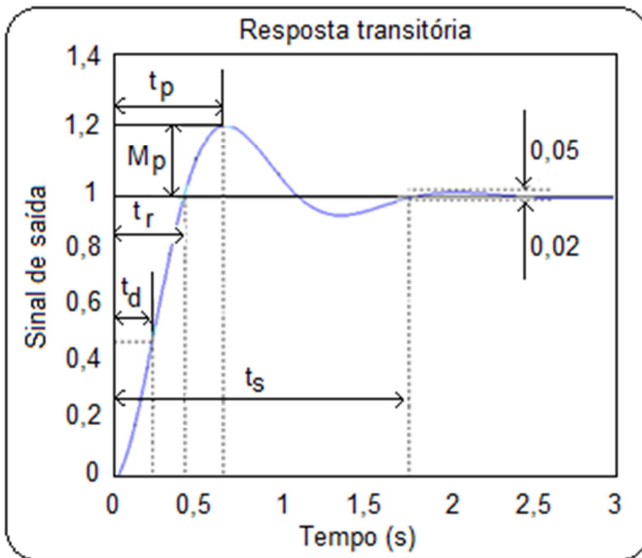


FIGURA 23 - Resposta transitória
Fonte: adaptado Ogata, 2010

A figura 23 mostra as características do sinal gerado na resposta transitória e os tempos de resposta.

Na resposta transitória, o sistema de controle apresenta as seguintes características (Ogata, 2010).

- Tempo de atraso (t_d)

Tempo necessário para que a resposta chegue à metade do valor final pela primeira vez.

- Tempo de subida (t_r)

Tempo estimado para que a resposta passe, geralmente, de 10 a 100% do valor final.

Logo, a expressão do tempo de subida é dado por:

$$t_r = \frac{\pi - tg^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)}{w_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2-31)$$

- Tempo de pico (t_p)

Trata-se do tempo relacionado ao primeiro pico de sobressinal.

A equação do tempo de pico é:

$$t_p = \frac{\pi}{w_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2-32)$$

- Máximo sobressinal (M_p)

Máximo valor da curva de resposta. A expressão do máximo sobressinal é:

$$M_p\% = e\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \cdot 100 \quad (2-33)$$

- Tempo de acomodação (t_s)

Tempo onde a curva de resposta atinge valor definitivo de 2% (equação 2-34) ou 5% (equação 2-35) do valor final.

$$ts2\% = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2-34)$$

$$ts5\% = \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (2-35)$$

Sendo que:

t_d = tempo de atraso em s;

β = ângulo beta em radianos;

ω_d = frequência natural amortecida em rad/s.

σ = tal em s;

t_r (raise time) = tempo de subida em s;

ω_n = frequência natural não amortecida em rad/s;

ζ = fator de amortecimento;

t_p (peak time) = tempo de pico em s;

M_p (maximum peak) = máximo de sobressinal em s;

t_s (settling time) = tempo de acomodação em s.

2.6.3.4 Erro estacionário

Ogata (2010) enfatizou que alterações no sinal de referência causam erro durante o regime transitório. Imperfeições nos componentes do sistema, desgaste ou deterioração causam erro no regime permanente.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{1}{1 + G(s)H(s)} \right) \cdot R(s) \quad (2-36)$$

Para determinar o erro estacionário, basta relacionar o coeficiente de erro com o ganho proporcional (tabela 3) e aplicar na equação 2-36.

TABELA 3 - Ganho

Entrada	Degrau	Rampa	Parábola
Tipo sistema	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S^2}$	$\frac{A}{S^3}$
Tipo 0	$\frac{A}{1 + K_p}$	∞	∞
Tipo 1	0	$\frac{A}{K_v}$	∞
Tipo 2	0	0	$\frac{A}{K_a}$

2.6.4 Método de Ziegler e Nichols

Ogata (2010) destacou que obtido o modelo matemático da planta, é possível determinar os parâmetros de controle que atenderão às especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema em malha fechada. Porém, plantas complexas dificultam a abordagem analítica do controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Nesses casos, torna-se necessário utilizar abordagens de controle experimentais.

Ziegler e Nichols (ZN) sugeriram regras de ajustes para a sintonia de controladores Proporcional-Integral-Derivativo baseadas na resposta experimental ao degrau. (OGATA, 2010).

Inicialmente, Ziegler e Nichols verificaram se o ganho (K_c) do controle proporcional (P) é positivo ou negativo. O ganho é positivo nos sistemas que o sinal de saída aumenta proporcional ao aumento do sinal de referência.

Visando estabilizar o sistema, os cientistas incrementaram o sistema e monitoram a resposta.

Ziegler e Nichols ainda determinaram o ganho crítico (K_u) através do referencial crítico do ganho e o período de oscilação (P_u).

O tipo de controlador e os parâmetros referente à constante de tempo derivativa (T_d) e constante de tempo integradora (T_i) são utilizados de acordo com a resposta do sistema.

TABELA 4 - Ziegler e Nichols

Controlador	k_c	T_i	T_d
P	$\frac{K_u}{2}$		
PI	$\frac{K_u}{2,2}$	$\frac{P_u}{1,7}$	
PID	$\frac{K_u}{1,7}$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$

A tabela 4 apresenta os parâmetros de controle utilizados pelo método experimental de Ziegler e Nichols.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico apresenta às etapas correspondentes ao conceito do projeto, como também ao projeto mecânico, eletrônico e aos experimentos elétricos da pesquisa realizada.

3.1 Conceito do projeto

Visando transformar energia mecânica em energia elétrica a partir de ar comprimido, foi projetada uma microestação de geração de energia elétrica composta por uma turbina pneumática e por um gerador de energia.

O projeto foi executado em três etapas distintas: projeto mecânico, experimentos elétricos e projeto eletrônico, onde a descrição de cada etapa será descrita a seguir.

3.2 Projeto mecânico

Neste tópico, serão apresentadas as fases relacionadas ao desenvolvimento da estrutura mecânica da máquina elétrica.

3.2.1 Estrutura e componentes eletromecânicos

Os elementos de ligação, suporte, apoio e transmissão das máquinas e equipamentos compõe a estrutura eletromecânica da máquina.

A máquina foi projetada para satisfazer determinados critérios de qualidade: boa rigidez mecânica, baixa manutenção e custo operacional, fácil operação, durabilidade, segurança e ergonomia.

A qualidade e aplicabilidade das máquinas são garantidas através de diferentes processos de modelagem e fabricação.

Os componentes da máquina elétrica foram modelados no *software Solid Works* e a estrutura mecânica desenvolvida através do processo de fabricação e montagem mecânica.

O detalhamento técnico das peças modeladas no *software Solid Works* está disponível no *Disc Compact* que acompanha o projeto, em *Portable Document Format*.

3.2.1.1 Fabricação mecânica

O processo de fabricação das peças da estrutura mecânica da máquina elétrica projetada foi desenvolvido no laboratório de fabricação mecânica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina campus Joinville e envolveram os seguintes métodos e equipamentos:

- Corte em serra mecânica.
- Faceamento, desbaste, canal interno em torno convencional.
- Contorno interno e contorno externo em fresadora convencional.
- Contorno externo em fresadora *Computer Numeric Control* (CNC).
- Furação em furadeira de bancada.
- Conformação por processo de dobra.

O processo de fabricação dos componentes usinados está disponível no apêndice A e B.

3.2.1.2 Montagem mecânica

A montagem dos componentes da máquina elétrica foi executada conforme as seguintes etapas:

1. A turbina e o gerador foram acoplados através de acoplamento direto, pois esse tipo de conexão garante rendimento próximo ao ideal.

2. Os elementos de fixação (parafusos, arruelas de pressão e porcas) foram empregados visando manter os componentes do gerador e da turbina ajustados.
3. Na extremidade anterior da máquina primária, foi acoplado um registro de esfera. O registro, além de garantir a passagem de fluxo pneumático, permite que o sistema seja lubrificado.
4. Foi fixado sob o gatilho da microturbina um servo motor e na saída do sistema, um disco de encoder. O servo motor ajusta a vazão de fluxo pneumático e o encoder contabiliza os pulsos elétricos a partir do movimento de rotação do eixo do gerador.
5. Por fim, o servo motor e o disco de encoder foram interligados eletronicamente a partir do arduino uno. O servo motor corresponde ao atuador e o encoder ao sensor do sistema de controle (SC) projetado.

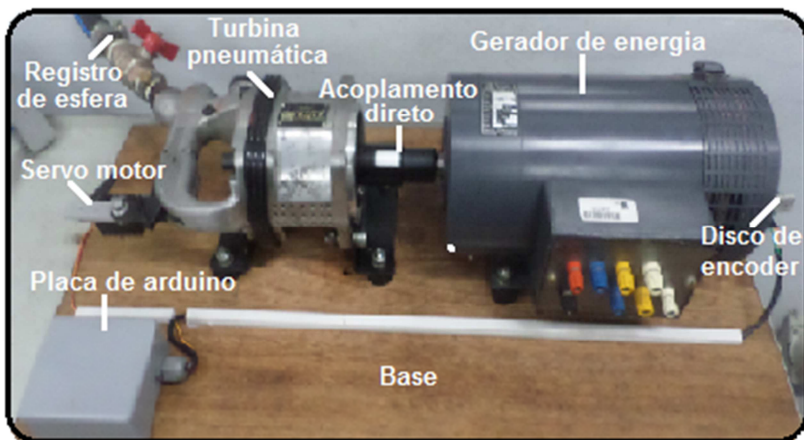


FIGURA 24 - Estrutura mecânica do projeto

A figura 24 ilustra a estrutura mecânica da microestação de geração de energia elétrica projetada.

3.3 Experimentos elétricos

Nesta etapa foram realizados experimentos elétricos com a máquina projetada operando a vazio e com carga, em ligações triângulo e estrela.

Os testes foram realizados no laboratório da fabricação mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina campus Joinville com dois tipos de geradores distintos (alternador automotivo e gerador de energia GST 80013) alimentados a partir do compressor de ar com potência mecânica máxima de 3,7 KW.

3.3.1 Alternador

Nos testes a seguir, foi utilizado um alternador automotivo trifásico de pólos salientes e uma microturbina pneumática de alto conjugado e velocidade livre.

TABELA 5 - Especificações técnicas do alternador

Modelo	Trifásico síncrono
Rotor	Pólos salientes
Número de pólos no rotor	12
Número de pólos no estator	36
Corrente nominal	70 A
Tipo de ligação	Estrela ou triângulo

Fonte: Manual Bosch

As especificações técnicas do alternador automotivo utilizado nos ensaios realizados a vazio e com carga estão descritas na tabela 5.

3.3.1.1 Alternador a vazio

Máquinas síncronas com pólos salientes trabalham com baixa rotação e alta frequência. Para garantir que o sistema

opere com 1800 rpm e a 60 Hz, o conjunto rotor e estator foi reduzido para 4 pólos.

Neste ensaio, as bobinas do alternador foram ligadas em estrela e o sistema excitado com tensão contínua e constante de 15,5 volts.



FIGURA 25 - Sinal gerado a 9,29 Volts em corrente alternada

A figura 25 mostra que, ligado em estrela, o alternador gerou 9,29 Volts em corrente alternada.

Para adequar a tensão gerada pela máquina elétrica ao consumo energético local, três transformadores monofásicos abaixadores de tensão (220 Volts em corrente alternada - 9 Volts em corrente alternada) foram ligados invertidos no gerador.

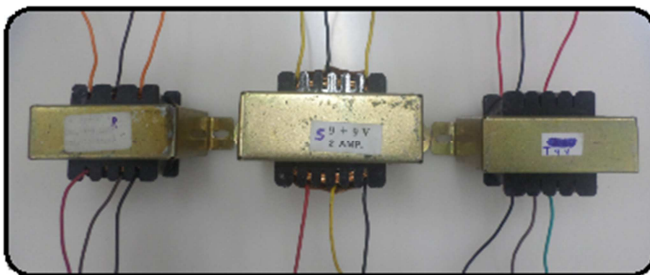


FIGURA 26 - Transformadores monofásicos

Na próxima etapa, com as bobinas ligadas em triângulo, o enrolamento de campo foi excitado gradualmente até o ponto de saturação.

O objetivo desse ensaio foi determinar a máxima tensão de linha gerada pelo alternador.

TABELA 6 - Referencial prático do ensaio a vazio

Corrente de excitação (A)	Frequência gerada (Hz)	Tensão de linha (Vca)
0,48	60,24	30,1
1,11	60,83	69,5
1,66	60,24	105
2,13	60,61	129
2,67	59,81	146
3,15	60,58	166
3,75	60,44	176
4,15	60,41	184
4,60	60,41	184
5,13	60,50	193
5,63	60,35	190
6,13	60,06	192

A tabela 6 apresenta os parâmetros de entrada e o resultado prático obtido com o alternador excitado a vazio.

Inicialmente, o campo foi excitado a 0,48 A, sendo que entre 5,13 A e 6,13 A, o sistema começou a saturar.

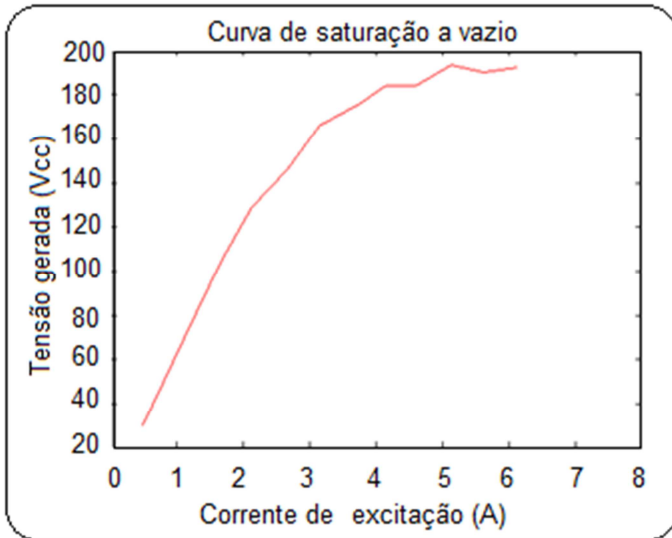


FIGURA 27 - Curva de magnetização

A figura 27 mostra que o sistema saturou próximo a 200 Volts em corrente alternada.

3.3.1.2 Alternador com carga

Neste ensaio, o gerador foi ligado em triângulo. Para verificar a corrente circulante na saída do sistema, o conjunto de cargas com 100 W foi interligado entre as bobinas do alternador.

A figura 28 apresenta o esquema elétrico do ensaio com cargas de 100 W por fase.

TABELA 7 - Ensaio com cargas de 100 W

Fase	Tensão de excitação (Vca)	Frequência gerada (Hz)	Tensão de linha (Vca)	Corrente na saída (A)
R	19,47	678	35,4m	0,00
S	19,52	60,85	101	0,09
T	19,57	60,58	55,9	0,13

A tabela 7 mostra a tensão gerada nas fases R, S, T no ensaio com cargas de 100 W por fase.

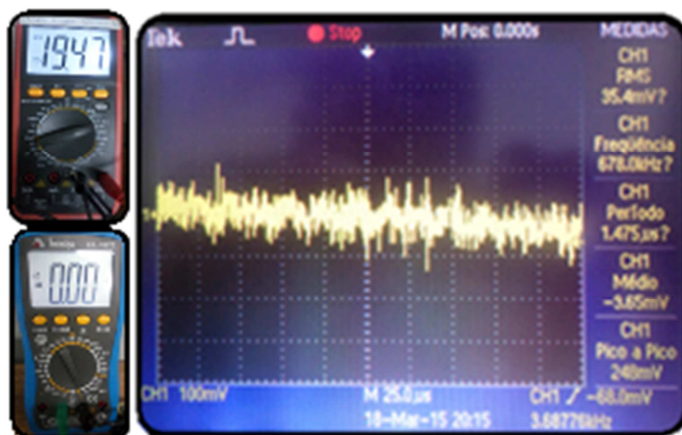


FIGURA 28 - Sinal gerado na fase R

Neste ensaio a fase R não registrou potência elétrica (figura 28).

A potência elétrica gerada na fase S foi calculada a seguir:

$$P_{el} = V_{in} \cdot I_{in} \cdot 3$$

$$P_{el} = 101 V_{cc} \cdot 0,19 A \cdot 3$$

$$P_{el} = 27,27 W$$

Devido o alternador ter gerado baixa potência elétrica e a fase R ter queimado durante os experimentos com carga, o alternador foi descartado do projeto.

3.3.2 Gerador GST 80013

Nos próximos ensaios, foi utilizado o gerador síncrono modelo GST 80013 trifásico de pólos não salientes, cedido em caráter didático pelo laboratório de eletrotécnica do Instituto

Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, campus Joinville e a microturbina pneumática de alto conjugado e velocidade livre.

TABELA 8 - Especificações técnicas da microturbina pneumática

Marca	Bosch
Tipo	FortG
Eixo	1 polegada
Velocidade livre	3900 rpm
Torque	2400 Nm
Entrada de ar	½ polegada
Pressão de ar	116-145 PSI

Fonte: Manual Bosch

TABELA 9 - Especificações técnicas do gerador

Modelo do gerador	Síncrono GST 80013
Número do gerador	801353
Potência mecânica	1 KW
Tipo de rotor	Pólos não salientes
Velocidade síncrona	1800 rpm
Ligação triângulo	220 Vca
Ligação estrela	380 Vca
Frequência gerada	60 Hz
Corrente nominal por fase	4,1 A

Fonte: Manual (gerador GST 80013)

As tabelas 8 e 9 expõem as especificações técnicas da microturbina pneumática e do gerador utilizado nos próximos experimentos elétricos.

Foram realizados ensaios com o gerador de energia elétrica excitado a vazio e com degrau de cargas. O fluxograma dos experimentos elétricos é descrito a seguir:

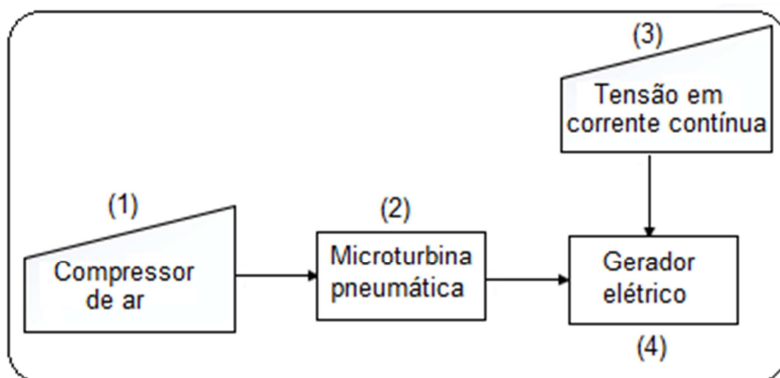


FIGURA 29 - Fluxograma do ensaio

1. Compressor de ar com potência máxima de 3,7 KW tipo pistão (deslocamento positivo)

Alimenta a máquina primária com vazão de fluxo pneumático variável.

2. Microturbina de alta velocidade livre e alto conjugado

Processa a energia pneumática e a transforma em energia mecânica.

3. Fonte externa de energia

Excita o sistema com tensão em corrente contínua variável.

4. Gerador trifásico síncrono modelo GST 80013

Converte energia cinética proveniente da máquina primária em energia elétrica.

3.3.2.1 Gerador a vazio

O objetivo desse ensaio foi determinar o limite de saturação do gerador. Para traçar a curva, o campo foi excitado gradualmente até a tensão de saída atingir o ponto de saturação.

TABELA 10 - Ensaio a vazio

Corrente de excitação (A)	Frequência gerada (Hz)	Tensão gerada (Vca)
0,65	60,39	50,4
0,99	60,83	72,9
1,66	60,17	109
2,06	60,05	127
2,67	60,48	153
3,05	60,46	173
3,66	60,07	189
4,17	60,31	196
4,87	60,20	204
5,07	60,19	209
6,24	60,28	210
6,70	60,72	211
7,04	60,17	215
7,39	59,99	217

Inicialmente, o campo foi excitado a 0,65 A sendo que entre 7,04 A e 7,39 A, o sistema começou a saturar (tabela 10).

A potência elétrica de excitação do sistema no ponto de saturação foi calculada a seguir:

$$P_{el} = V_{in} \cdot I_{in} \cdot 3$$

$$P_{el} = 14,76 \text{ Vcc} \cdot 7,39 \text{ A} \cdot 3$$

$$P_{el} = 327,2292 \text{ W}$$

Ao aplicar potência elétrica de 327,2292 W na entrada do sistema, a estação gerou 217 Volts em corrente alternada.

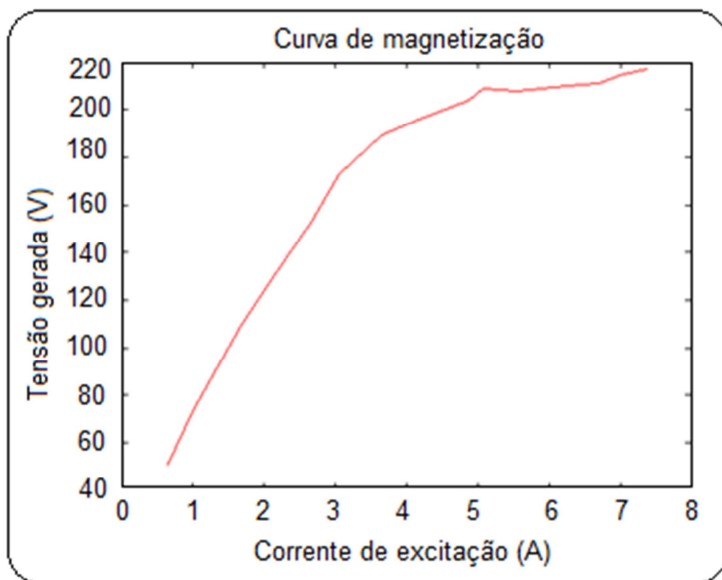


FIGURA 30 - Curva de magnetização

A figura 30 mostra a curva de magnetização do gerador GST 80013.

O sistema saturou próximo aos 220 Volts em corrente alternada. Portanto, conclui-se que a microestação de transformação de energia elétrica poderá ser utilizada na iluminação de ambiente industrial, como proposto inicialmente.

3.3.2.2 Gerador com carga

O objetivo deste ensaio foi determinar o rendimento do gerador, a potência máxima gerada a plena carga do compressor de ar, a regulação de tensão da máquina elétrica e o nível de ruído produzido pela máquina elétrica em operação.

- Rendimento

Para determinar o rendimento do gerador, o enrolamento de campo foi excitado a 7,5 A e três cargas de 100 W conectadas em triângulo entre as bobinas do gerador.

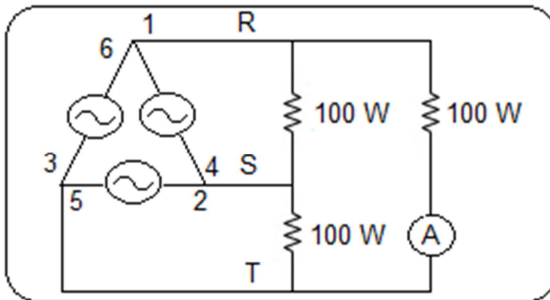


FIGURA 31 - Circuito elétrico

A figura 31 apresenta o esquema elétrico do ensaio com cargas de 100 W por fase.

TABELA 11- Cargas de 100 W por fase

Fase	Tensão de excitação (Vcc)	Frequência gerada (Hz)	Tensão de linha (Vca)	Corrente na saída (A)
R	13,50	60,24	212	0,45
S	13,87	60,39	217	0,47
T	13,52	60,58	214	0,46

A tabela 11 apresenta os resultados práticos obtidos no ensaio com carga de 100 W por fase.

Para calcular o rendimento do gerador:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3-1)$$

$$n = \left(\frac{217 \text{ Vca} \cdot 0,47 \text{ A} \cdot 3}{13,87 \text{ Vcc} \cdot 7,5 \text{ A} \cdot 3} \right) \cdot 100$$

$$n = 98,04373949 \%$$

O gerador apresentou bons resultados e atende a proposta inicial do projeto: gerou 217 Volts em corrente alternada com rendimento de aproximadamente 98 %.

- Potência máxima gerada a plena carga

O objetivo deste ensaio foi determinar a potência elétrica máxima gerada à plena carga do compressor de ar.

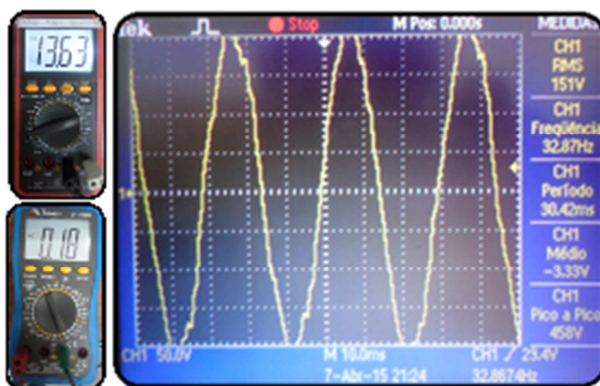


FIGURA 32 - Tensão gerada a plena carga do compressor de ar

A figura 32 apresenta a tensão gerada à plena carga do compressor de ar.

Neste teste, o compressor de ar com potência mecânica de 3,7 KW alimentou a máquina primária a plena carga e três lâmpadas de 60 W foram conectadas tipo triângulo nas fases do gerador.

A potência elétrica do sistema trifásico é determinada a partir da seguinte equação:

$$P_{el} = V_{out} \cdot I_{out} \cdot 3 \quad (3-2)$$

$$P_{el} = 151 V_{ca} \cdot 0,18 A \cdot 3$$

$$P_{el} = 81,54 \text{ W}$$

Devido à baixa potência primária, a máquina elétrica gerou no máximo 151 Volts em corrente alternada a 0,18 A, o que confere potência útil de 81,54 W.

- Regulação de tensão

A regulação de tensão é definida a partir da variação de tensão sem carga até plena carga.

Considerando que o sistema saturou próximo aos 217 Volts em corrente alternada e a máquina elétrica a plena carga gerou 151 Volts em corrente alternada:

$$V_R = \left(\frac{V_{NL}}{V_{FL}} - 1 \right) \cdot 100$$

$$V_R = \left(\frac{217 \text{ Vca}}{151 \text{ Vca}} - 1 \right) \cdot 100$$

$$V_R = 43,70860927 \%$$

- Nível de ruído produzido pela máquina elétrica em operação

Visando garantir o conforto dos usuários diretos e indiretos da máquina elétrica projetada, foi aferido o nível de ruído em condições de trabalho.

O nível de ruído em máquinas e equipamentos pneumáticos foi aferido em consonância a *Pneuro test code for the measurement of sound from pneumatic equipment* (CAGI).

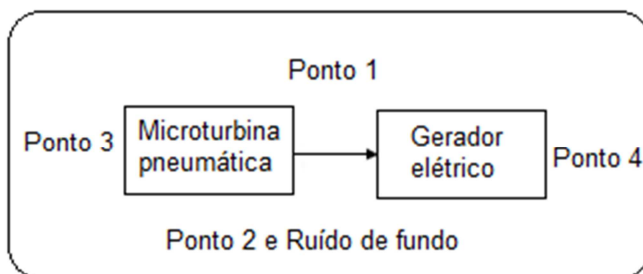


FIGURA 33 - Perspectiva do ensaio

A figura 33 ilustra os pontos de teste em sistemas que envolvem máquinas e equipamentos pneumáticos.

A média logarítmica dos pontos de teste é obtida através das seguintes equações:

$$M = 10 \cdot \log[0,25 \cdot (10^{0,1 \cdot p_1} + 10^{0,1 \cdot p_2} + 10^{0,1 \cdot p_3} + 10^{0,1 \cdot p_4})] \quad (3-3)$$

$$M_{log} = 10 \cdot \log(10^{0,1 \cdot \text{ruído de fundo}} - 10^{0,1 \cdot M}) \quad (3-4)$$

Onde:

M_{log} = média logarítmica em dB;

p_1, p_2, p_3, p_4 = pontos de teste 1,2,3,4 em dB;



FIGURA 34 - Nível de ruído

A figura 34 apresenta o nível de ruído aferido em cada ponto de teste.

A média logarítmica foi calculada a seguir:

$$M = 10. \log[0,25. (10^{0,187,5} + 10^{0,188,3} + 10^{0,195,3} + 10^{0,196,2})]$$

$$M = 10. \log 2198889924$$

$$M = 10,9,342203489$$

$$M = 93,42203489 \text{ dB}$$

$$M_{log} = 10. \log(10^{0,193,42203489} - 10^{0,158,2})$$

$$M_{log} = 10. \log(2198229230)$$

$$M_{log} = 10,9,342203475$$

$$M_{log} = 93,42203475 \text{ dB}$$

Em operação, a máquina elétrica gerou nível de ruído de 93,4 dB, comprometendo a saúde auditiva dos seus usuários.

3.4 Projeto eletrônico

O objetivo desta etapa foi desenvolver um sistema de controle capaz de manter a velocidade síncrona do gerador constante em 1800 rpm, como também garantir que a máquina elétrica opere com frequência gerada de 60 Hz.

A primeira etapa para se desenvolver um sistema de controle consiste em descrever a função de transferência a partir do comportamento físico do sistema.

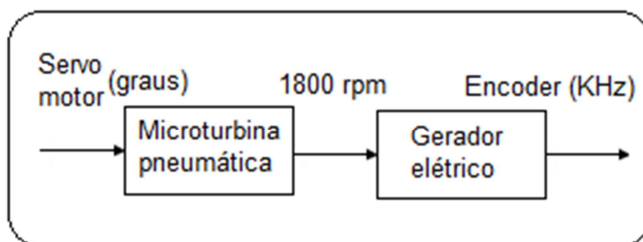


FIGURA 35 - Diagrama de blocos em malha aberta

A figura 35 ilustra o diagrama de blocos em malha aberta da curva de estabilização do sistema projetado.

O comportamento do sistema foi determinado através da relação entre a posição angular do gatilho do servo motor e a frequência gerada através do encoder de 1000 pulsos elétricos por revolução.

Neste ensaio, a máquina elétrica operou a 1800 rpm, sendo que o fluxo pneumático foi aumentado gradualmente durante 10 s, o eixo do servo motor reposicionado ponto a ponto e a frequência gerada aferida.

TABELA 12 - Curva de estabilização

Eixo servo motor (Graus)	Frequência (KHz)
52,5	23,88
75	29,77
97,5	30,28
120	29,95

A tabela 12 relaciona a posição do servo motor e a frequência gerada pelo encoder de mil pulsos elétricos por revolução.

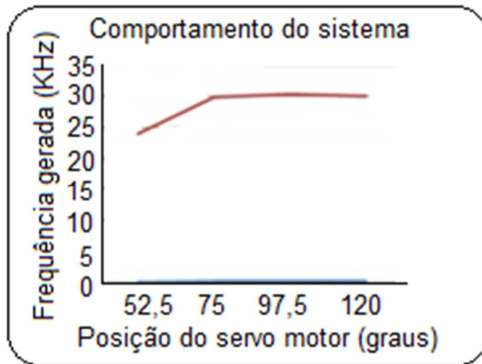


FIGURA 36 - Comportamento do sistema

No sistema de controle proposto, o servo motor atua entre 30° e 120° (vazão mínima e vazão máxima). A figura 36 mostra que, entre 75° e 120° a vazão do fluxo pneumático praticamente não interfere sobre a variação de frequência gerada, tornando o sistema desequilibrado e aperiódico.

Os comportamentos dinâmicos não lineares representam modelos físicos complexos, onde o atuador age ponto a ponto de modo não uniforme, o que dificulta o modelo matemático correspondente e tornam ineficazes os métodos de controle clássico e moderno conhecidos.

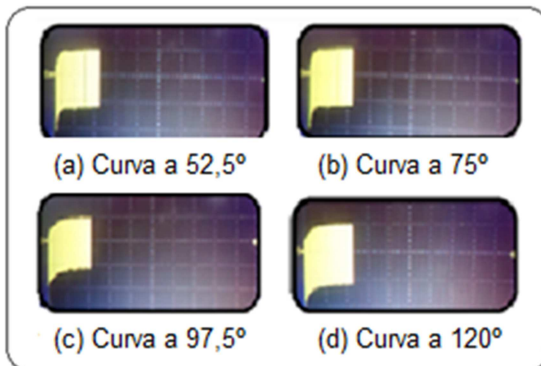


FIGURA 37 - Curva de estabilização

A resposta transitória, observada através da parábola (figura 37), ilustra do sinal de entrada ao sinal de saída e representa o comportamento do sistema estudado.

Conhecido o desempenho do sistema, foi fechada a malha de controle correspondente. A estação de microgeração de energia é composta por uma turbina pneumática e por um gerador, onde, a máquina primária corresponde à primeira planta e o gerador a segunda planta.

Ao aplicar a regra dos blocos em cascata: $P(s) = P(1) \cdot P(2)$, as plantas foram reduzidas a um único bloco.

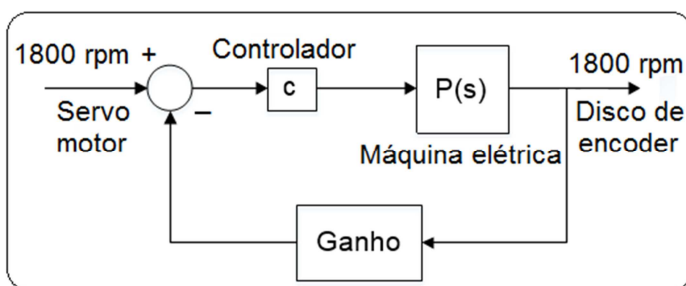


FIGURA 38 - Diagrama de blocos em malha fechada

A figura 38 mostra o diagrama de blocos em malha fechada da máquina elétrica projetada.

Como a planta correspondente a máquina elétrica se comporta de modo não linear, o algoritmo do sistema de controle em malha fechada desenvolvido foi programado de modo experimental, através das regras de controle de Ziegler Nichols.

De acordo com os parâmetros de Ziegler Nichols, a máquina elétrica apresentou ganho positivo, ou seja, ao aumentar a vazão do fluxo pneumático o sinal de saída também aumentou.

Como o algoritmo de controle utilizado para converter os pulsos elétricos registrados através do encoder H40-8-1000VL em rpm travou a partir de 20 KHz gerados, o sensor foi substituído por um disco de encoder de oito pulsos elétricos por volta e um optoacoplador.

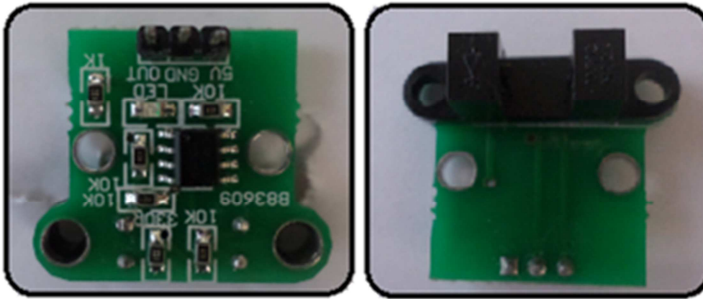


FIGURA 39 - Optoacoplador

A figura 39 mostra o optoacoplador e o circuito equivalente.

Nas próximas etapas, o sistema de controle em malha fechada projetado passou a operar com os seguintes componentes: servo motor, arduino uno e disco de encoder de oito pulsos elétricos por volta.

Os componentes empregados no sistema de controle são descritos a seguir:

- Sensor de rotação (disco de encoder)

O disco de encoder com resolução de 8 pulsos elétricos por volta afere a velocidade síncrona do gerador elétrico.

1. Controlador (arduino uno)

Os controladores comparam à rotação instantânea com a rotação desejada e através do sinal do erro estacionário geram o sinal de saída desejado.

O arduino é programado a partir de uma plataforma dedicada ao *hardware* e fornecida pelo fabricante do microcontrolador, onde a linguagem de programação é semelhante à programação utilizada na linguagem de programação C.



FIGURA 40 - Arduino uno

A figura 40 ilustra a placa de arduino utilizado no sistema de controle em malha fechada projetado.

A programação utilizada no projeto executado se desenvolve conforme as seguintes etapas: aferição da velocidade síncrona, análise do erro estacionário e cálculo do sinal de saída desejado.

- Aferição da velocidade síncrona em rpm

Através da leitura e conversão dos pulsos elétricos gerados pelo sensor de rotação em um determinado período de tempo.

- Análise do erro estacionário e cálculo do sinal de saída desejado

Foram utilizados controles Proporcional e Proporcional-Integral, sendo que o controle Proporcional foi descartado da pesquisa por que quando o sistema estabiliza o controlador para de atuar e ocorre novo erro estacionário.

2. Atuador (servo motor)

Controla a vazão do fluxo pneumático. No sistema de controle projetado, rotações menores ou maiores de 1800 rpm direcionam o reposicionamento angular do gatilho do atuador,

porém, devido limitação mecânica o servo motor somente atua entre 30° e 120° (variação da vazão de fluxo pneumático mínimo e máximo).

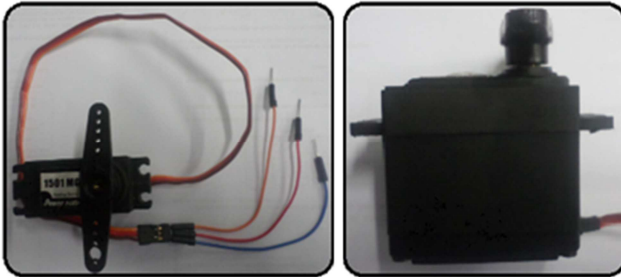


FIGURA 41 - Servo motor

Ao receber o sinal do sensor, o atuador aciona o motor do servo (figura 41) e o comando *Pulse Width Modulation* (PWM) reposiciona o eixo na posição desejada.

A lista de apêndices C apresenta o algoritmo do sistema de controle em malha fechada projetado para manter a velocidade síncrona do gerador elétrico e a frequência gerada constante.

Os parâmetros de controle das constantes proporcional e integral foram determinados conforme o comportamento do sistema e em consonância com as regras de Ziegler Nichols.

O fluxograma do controle Proporcional-Integral (PI) utilizado nos próximos ensaios é apresentado a seguir:

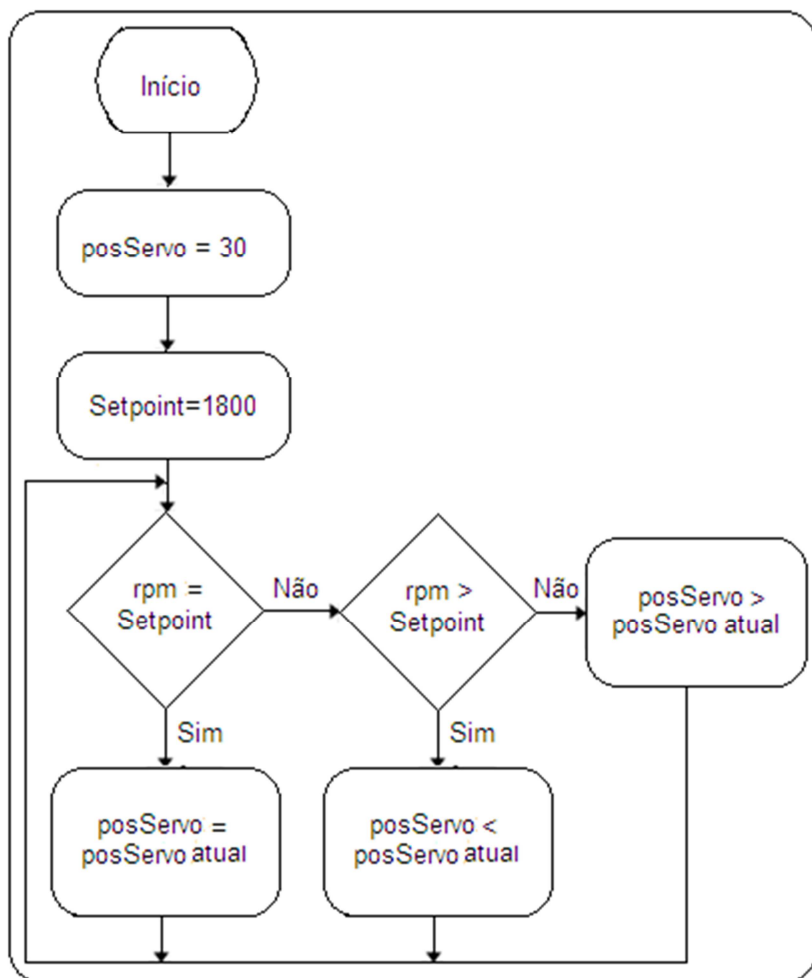


FIGURA 42 - Fluxograma do controle

A figura 42 apresenta o fluxograma do sistema de controle Proporcional-Integral projetado.

Inicialmente, o servo motor é posicionado a 30°. Nessa posição, a máquina primária é alimentada com mínima vazão de fluxo pneumático.

O microcontrolador verifica a rotação instantânea e a compara com o set point, variável que corresponde ao sinal de referência.

Para rotações instantâneas menores ou maiores do set point, a vazão do fluxo pneumático é diminuída ou aumentada através do reposicionamento do servo motor pela acúmulo do erro estacionário.

Quando a rotação instantânea for igual ao set point (requisito de controle) o sistema estará estabilizado, porém o controlador Proporcional-Integral continua atuando.

Na próxima etapa, foram testados modelos de controle conservadores e agressivos ao sistema sem carga, sendo que os gráficos correspondentes à velocidade síncrona em função do tempo são ilustrados a seguir:

1. $K_p = 0,1$ $K_i = 0,01$

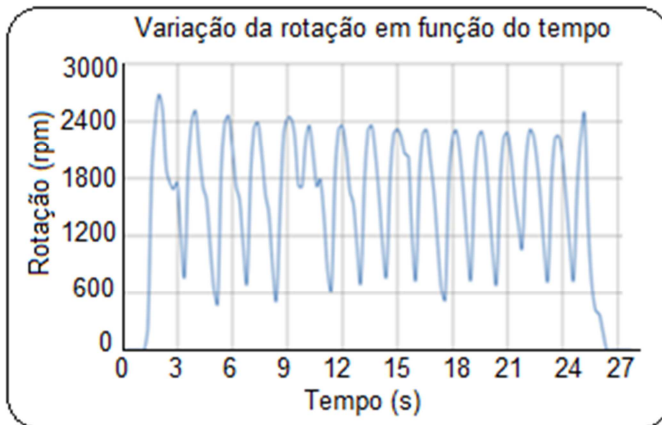


FIGURA 43 - Variação de rotação em função do tempo

A figura 43 mostra a variação de rotação em função do tempo no sistema de controle em malha fechada agressivo.

Nesse sistema, o atuador agiu em duas posições ou ON/OFF, gerando instabilidade ao sistema.

2. $K_p = 0,009$ $K_i = 0,0009$

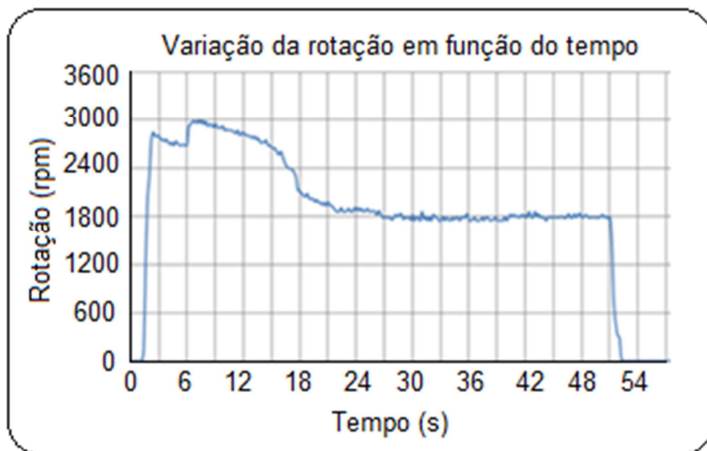


FIGURA 44 - Variação de rotação em função do tempo

A figura 44 ilustra o comportamento do sistema de controle em malha fechada projetado a partir do modelo conservador.

A seguir, foram levantadas as curvas de controle do sistema alimentado com cargas de 100 W por fase.

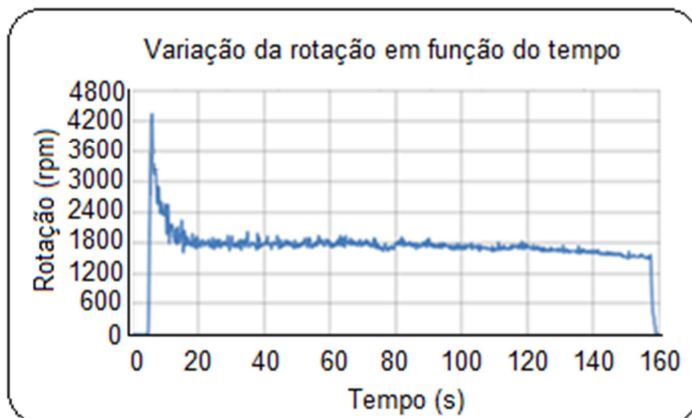


FIGURA 45 - Variação de rotação em função do tempo

Após aproximadamente 80 s em operação, devido queda de rendimento da máquina primária, o motor do compressor religou automaticamente.

A figura 45 mostra que entre 120 s e 160 s a curva de variação da rotação em função do tempo apresentou declínio linear. Fato evidenciado devido o compressor de ar limitar a potência primária.

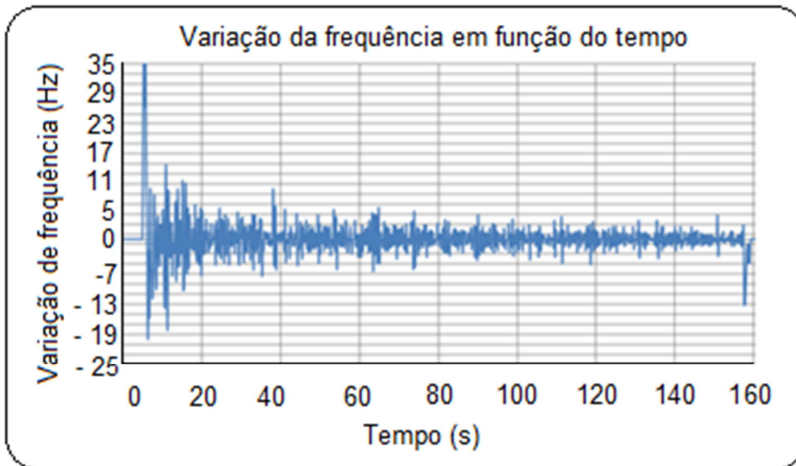


FIGURA 46 - Variação da frequência

Ao analisar o desempenho do sistema a vazio e com carga e os diferentes coeficientes proporcional e integral, conclui-se que a máquina elétrica responde com maior eficácia ao sistema de controle em malha fechada conservador.

Portanto, para controlar a velocidade síncrona do gerador de energia foi utilizado o controlador Proporcional-Integral conservador ($K_p = 0,009$ e $K_i = 0,0009$).

TABELA 13 - Especificações da resposta transitória

Tempo de subida	5 s
Tempo de pico	11 s
Tempo de acomodação	19 s
Máximo sobressinal	2400 rpm

Esse modelo de controle estabilizou o sistema sem carga a aproximadamente 26 s e com carga a 19 s, sendo que o tempo de acomodação variou no máximo entre 2% e 5%.

De acordo com a tabela 13, com cargas de 100 W por fase, o sistema gerou máximo sobressinal de 2400 rpm e atingiu o sinal de referência pela primeira vez aos 5 s.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o alternador e com o gerador síncrono GST 80013.

1. Alternador trifásico de pólos salientes

Os primeiros testes foram realizados a vazio, sendo que o aparelho gerou baixa tensão a alta frequência: 15 Volts em corrente alternada a 720 Hz.

Em seguida, após o estator e o rotor terem sido adaptados para atuar com 4 pólos, o alternador gerou aproximadamente 9 Volts em corrente alternada a 60 Hz.

Para elevar a tensão gerada para 220 Volts em corrente alternada, três transformadores monofásicos foram ligados na saída da máquina elétrica, sendo que, com carga de 100 W por fase a fase R não registrou tensão.

Devido não ter gerado bons resultados, o alternador foi descartado do projeto.

2. Gerador trifásico modelo GST 80013 de pólos não salientes

Nos ensaios iniciais, o gerador foi alimentado a vazio e com carga. Nesta etapa, a máquina elétrica desenvolvida gerou aproximadamente 220 Volts em corrente alternada a frequência de 60 Hz.

No próximo teste, a máquina elétrica foi excitada a plena carga do compressor de ar, onde se obteve potência máxima de 81,54 W.

Uma empresa do porte da Schulz desperdiça, na área de desenvolvimento de compressores de ar, aproximadamente 115 KW de energia mecânica.

Considerando que a plena carga do compressor de ar (3,7 KW) a microestação de geração de energia elétrica gerou 81,54 W, 115 KW de potência primária podem gerar aproximadamente 2,5277 KW. Potência elétrica suficiente para alimentar 63 lâmpadas de 40 W.

A Central Elétrica de Santa Catarina (CELESC) classifica as indústrias como unidade consumidora da classe A. A prestadora de serviço ainda considera os horários de consumo: convencional, azul e verde e a faixa de consumo: bandeira verde, amarela e vermelha.

Conforme as bandeiras tarifárias da Central Elétrica de Santa Catarina, uma indústria do porte da Schultz economizaria aproximadamente R\$ 36.398,88 em doze meses.

Em suma, o gerador apresentou bons resultados e sua aplicabilidade está de acordo com a proposta inicial.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentados os projetos mecânico, eletrônico e os experimentos elétricos da máquina desenvolvida. Máquina composta basicamente por uma microturbina pneumática de alto conjugado e alta velocidade livre e por um gerador de energia com pólos não salientes.

Foram testados a vazio e com carga dois tipos de geradores distintos, sendo que durante os ensaios, alguns componentes não produziram bons resultados.

O alternador, utilizado durante os testes iniciais, saturou em aproximadamente 200 Volts em corrente alternada e com carga de 100 W por fase não registrou potência elétrica na fase R, por isso foi descartado do projeto.

O compressor de ar, cedido pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - campus Joinville, em caráter didático possui motor com potência mecânica de 3,7 KW. Devido às perdas e ao baixo rendimento observado no ensaio a plena carga do compressor, conclui-se que é necessário utilizar um compressor com motor mais potente.

Para manter frequência gerada e velocidade síncrona constante, foi desenvolvido um sistema de controle em malha fechada Proporcional-Integral composto por um servo motor, arduino uno e disco de encoder de oito pulsos elétricos por volta.

Na primeira tentativa em controlar o sistema, foi utilizado um encoder modelo H40-8-1000VL. Esse sensor, ao registrar frequência de 20 KHz, travou o algoritmo de controle. Portanto, esse sensor foi descartado do projeto e substituído pelo disco de encoder de oito pulsos elétricos por volta.

Sanado os problemas e analisando os resultados obtidos, conclui-se que o objetivo geral e os específicos desse estudo foram alcançados com êxito:

A microestação de geração de energia elétrica a partir de ar comprimido converteu a fonte primária em energia elétrica, como proposto inicialmente.

O compressor de ar utilizado como fonte primária de energia deixou de depositar o fluxo pneumático diretamente na

atmosfera, vindo a colaborar na melhoria da qualidade de vida coletiva.

A máquina elétrica gerou 220 Volts em corrente alternada a 60 Hz, ou seja, a potência gerada pode ser utilizada no ambiente de iluminação industrial.

Quanto à viabilidade econômica e financeira do projeto desenvolvido, ressalta-se que a eficiência da máquina elétrica é baixa, porém, considerando o custo médio do equipamento e o fluxo pneumático desperdiçado pelas indústrias fabricantes de compressores de ar, a utilização dessa tecnologia torna-se vantajosa e viável tecnicamente.

Por último, o projeto executado proporcionou a aplicação de conhecimentos mecânico, elétrico e eletrônico, como também sinalizou oportunidades de melhorias para pesquisas futuras.

Oportunidades de melhoria

Visando pesquisas futuras, algumas oportunidades de melhoria são descritas a seguir:

1. Em operação, a máquina elétrica produz 93,4 dB de ruído.

Trabalhadores expostos a níveis acentuados de poluição sonora podem sofrer danos físicos. Os danos se desenvolvem a curto, médio ou longo prazo, em menor ou maior intensidade.

Como solução, se propõe a utilização de equipamentos de proteção individual (EPIs) e a criação de uma cabine acústica. O objetivo central da cabine é reduzir a poluição sonora, conforme a Norma Regulamentadora 9 (NR-9), a níveis aceitáveis. De modo secundário, a cabine contribui para que o ambiente de trabalho se torne mais confortável.

Visando facilitar a montagem, movimentação e manutenção da máquina elétrica, a cabine deve ser confeccionada sob medida.

Sugere-se ainda que no processo de fabricação da cabine acústica sejam utilizados materiais não convencionais: placas ou mantas de lã de vidro ou lã de rocha, revestidas por chapas de materiais convencionais: aço carbono, galvanizado ou inox.

2. Utilizar uma máquina primária com baixo conjugado.

O fluxo pneumático proveniente do compressor determina o movimento de rotação do eixo central da turbina.

Considerando que o torque é diretamente proporcional ao produto entre força e deslocamento; que a máquina primária utilizada no projeto possui alto conjugado e alta velocidade livre; e que o eixo central da estação de microgeração de energia elétrica projetada deverá operar a 1800 rpm, para pesquisas futuras, é possível utilizar uma turbina pneumática com conjugado e velocidade livre mais baixo.

3. A máquina elétrica não possui sistema de supervisão.

Para monitorar o sistema sugere-se integrar o sistema de controle a ambientes supervisórios, como por exemplo: LABVIEW ou Elipse Scada.

4. O compressor de ar utilizado limitou a potência primária.

A baixa potência da fonte primária de energia acarretou prejuízos aos experimentos realizados a vazio e com carga. Em pesquisas futuras, sugere-se que seja utilizado compressor com potência acima de 3,7 KW.

5. Projetar uma malha de controle visando manter a tensão alternada gerada constante a 220 Volts.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, Geraldo do Nascimento Junior. **Máquinas Elétricas: Teorias e Ensaios**. 2 ed. São Paulo (SP): Érica, 2008. 260 p.

FALCONE, Aurio Gilberto. **Eletromecânica: Máquinas Elétricas Rotativas**. 6 ed. São Paulo (SP): Blucher, 2009. 478 p.

KOSOW, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo (SP): Globo, 2008. 667 p.

KUSKO, Alexander; FITZGERALD, Arthur E.; JUNIOR, Charles Kingsley. **Máquinas elétricas**. 1 ed. São Paulo (SP): McGraw-Hill, 1975. 623 p.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos**. 6 ed. São Paulo (SP): Érica, 2008.

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6 ed. Rio de Janeiro (RJ): LTC, 2012. 745 p.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5 ed. São Paulo (SP): Pearson Prentice Hall, 2010. 809 p.

STEWART, Harry L. **Pneumática & Hidráulica**. 3 ed. Curitiba (PR): Hemus, 2007. 481 p.

TORO, Vicent Del. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1 ed. Rio de Janeiro (RJ): Livros Técnicos e Científicos, 1999. 550 p.

UMANS, Stephen D.; FITZGERALD, Arthur E.; JUNIOR, Charles Kingsley. **Máquinas Elétricas**. 6 ed. Porto Alegre (RS): Bookmann, 2006. 648 p.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BARSANO, Paulo Roberto. **Segurança do trabalho**: guia prático e didático. São Paulo (SP): Érica, 2012. 350 p.

CENTRAL ELÉTRICA DA SANTA CATARINA - CELESC. **Bandeiras tarifárias**. Disponível em:< <http://novoportal.celesc.com.br/portal/index.php/duvidas-mais-frequentes/1140-tarifa>>. Acesso em 13 abr. 2015.

DUARTE, Janderson; MARQUES, Luiz Sérgio Barros; SAMBAQUI, Ana Barbara Knolseisen. **Máquinas Elétricas**. Apostila. Jul. de 2013. Disponível em:<<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~janderson.duarte/ApostilaMaq.pdf>>. Acesso em 12 out. 2014.

MICROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. 1 ed. São Paulo (SP): Novatec, 2013. 453 p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EDUCAÇÃO – MTE. **NR 9 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais**. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~eliana.franco/HST_STR/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20MTE/NR9%20Risco%20Ambien/NR-9%20Riscos%20Ambientais.pdf>. Acesso em 11 mar. 2015.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EDUCAÇÃO – MTE. **NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~eliana.franco/HST_STR/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20MTE/NR10%20Eletricidade/Seguran%C3%A7a%20em%20Eletricidade.pdf>. Acesso em 11 mar. 2015.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EDUCAÇÃO – MTE. **NR 12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**.

Disponível em: < [http://www.joinville.ifsc.edu.br/~eliana.franco/HST_STR/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20MTE/NR12%20Seguran%C3%A7a%20em%20M%C3%A1quinas%20%20Equipamen/NR12%20\(atualizada%202011\)%20II.pdf](http://www.joinville.ifsc.edu.br/~eliana.franco/HST_STR/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20MTE/NR12%20Seguran%C3%A7a%20em%20M%C3%A1quinas%20%20Equipamen/NR12%20(atualizada%202011)%20II.pdf)>. Acesso em 11 mar. 2015.

ROBOT GEAR. Power HD 1501MG. Datasheet. Disponível em: <www.pololu.com/file/download/HD-1501MG.pdf?file_id=0J729>. Acesso em 19 fev. 2015.

Rotary Encoder. Datasheet. Disponível em: < http://diencongnghip.com/upload/ls_mecapion/encoder_ls_mecapion_h40.pdf>. Acesso em 25 fev. 2015.

APÊNDICES

Apêndice A - Processo de fabricação

Os componentes listados a seguir foram usinados no laboratório de fabricação mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), campus Joinville e envolveram processos manuais e automáticos.

Legenda:

- 1) Nome da peça
- 2) Quantidade de peças produzidas
- 3) Processo de fabricação
- 4) Material utilizado

	<ol style="list-style-type: none"> 1) Suporte de apoio da microturbina pneumática 2) 1 peça 3) Corte, contorno externo, furação e dobramento 4) Aço 1020
	<ol style="list-style-type: none"> 1) Suporte de apoio da microturbina pneumática 2) 1 peça 3) Corte, contorno externo, furação e dobramento 4) Aço 1020
	<ol style="list-style-type: none"> 1) Suporte de apoio do gerador de energia elétrica 2) 2 peças 3) Corte, contorno externo, furação e dobramento 4) Aço 1020

	<ol style="list-style-type: none">1) Pino de acoplamento2) 1 peça3) Corte, faceamento, desbaste, canal interno e furação4) Aço 1020
	<ol style="list-style-type: none">1) Pino de ligação2) 1 peça3) Corte, faceamento e desbaste4) Aço 1020
	<ol style="list-style-type: none">1) Suporte de apoio do servo motor2) 1 peça3) Corte, contorno interno, contorno externo e furação4) Aço galvanizado
	<ol style="list-style-type: none">1) Suporte de apoio do servo motor2) 1 peça3) Corte, contorno externo e furação4) Alumínio
	<ol style="list-style-type: none">1) Disco de encoder de oito pulsos elétricos por revolução2) 1 peça3) Corte, faceamento, desbaste, canal interno e furação4) Latão

Apêndice B - Código G

O contorno externo dos suportes de apoio da microturbina pneumática e do gerador de energia elétrica foi executado na fresadora *Computer Numeric Control* (CNC).

A fresadora CNC utiliza o código G, possui boa linearidade e garante simetria e precisão geométrica nas peças usinadas.

Suporte de apoio da microturbina pneumática

O 001 (rotina principal)

Linha	Código de implementação	Comentários
N5	G17 G21 G40 G54 G90;	Início do ciclo
N10	G0 Z100;	Ponto de afastamento
N15	T03 M06;	Fresa de 10 mm
N20	G0 X-1 Y-1;	Ponto de aproximação
N25	M03 S3183;	-----
N30	G43 Z2 H03;	Ferramenta 03
N35	Z1 F1273;	-----
N40	M98 P0002 L3;	Acessa a subrotina
N45	G0 Z100 M09;	Desliga o fluido de resfriamento
N50	M05;	Desliga a árvore
N55	M30;	Encerra o ciclo

O 0002 (subrotina - contorno externo)

Linha	Código de implementação	Comentários
N5	G91 Z-1;	Desbasta 1mm por etapa
N10	G90 G41 X0 Y0 D03 M08;	Liga o fluido de resfriamento
N15	G1 X0 Y57;	Ponto B
N20	G1 X12 Y57;	Ponto C
N25	G3 X113 Y57 R55;	Ponto D
N30	G1 X125 Y57;	Ponto E
N35	G1 X125 Y0;	Ponto F
N40	G1 X0 Y0;	Ponto A
N45	G40 Z100;	Ponto de afastamento
N50	M99;	Encerra a subrotina

Suporte de apoio do gerador de energia elétrica

O 003 (rotina principal)

Linha	Código de implementação	Comentários
N5	G17 G21 G40 G54 G90;	Início do ciclo
N10	G0 Z100;	Ponto de afastamento
N15	T03 M06;	Fresa de 10 mm
N20	G0 X-1 Y-1;	Ponto de aproximação
N25	M03 S3183;	-----
N30	G43 Z2 H03;	Ferramenta 03
N35	Z1 F1273;	-----
N40	M98 P0004 L5;	Acessa a subrotina
N45	G0 Z100 M09;	Desliga o fluido de resfriamento
N50	M05;	Desliga a árvore
N55	M30;	Encerra o ciclo

O 0004 (subrotina - contorno externo)

Linha	Código de implementação	Comentários
N5	G91 Z-1;	Desbasta 1mm por etapa
N10	G90 G41 X0 Y0 D03 M08;	Liga o fluido de resfriamento
N15	G1 X0 Y50;	Ponto B
N20	G1 X40 Y50;	Ponto C
N25	G3 X130Y50 R85;	Ponto D
N30	G1 X170 Y50;	Ponto E
N35	G1 X170 Y0;	Ponto F
N40	G1 X0 Y0;	Ponto A
N45	G40 Z100;	Ponto de afastamento
N50	M99;	Encerra a subrotina

Apêndice C - Algoritmo de controle

As variáveis e rotinas utilizadas no sistema de controle em malha fechada projetado para manter o sinal de referência (*set point*) constante a 1800 rpm estão descrito a seguir:

// Programa: Controle de rotação da estação de microgeração de energia elétrica a partir de ar comprimido

// Projetistas: Luis Rafael Antunes e Marcio Luiz Moretti

include <Servo.h>

// inclui a biblioteca do servo motor

Servo myservo;

// nomeia o servo motor

// declaração das variáveis

volatile byte rpmcount;

// variável de alocação dos pulsos elétricos do sensor de rotação (disco de encoder de oito pulsos elétricos por revolução)

unsigned int rpm;

// variável que mostra a rotação calculada

unsigned long timeold;

// variável de alocação do tempo de cada leitura

int sp=1800;

// variável de setpoint do sinal de referência

int erro=0;

// variável de alocação do erro entre a rotação instantânea e o sinal de referência

int angi=30;

// variável da posição inicial do servo motor


```
int long soma=0;
// variável de alocação do acúmulo de erro do sinal de referência

float kp=0.009;
// constante de proporcionalidade

float ki=0.0009;
// constante de integralidade

int posServo;
// variável de alocação da posição do servo motor

int flag=0;
// variável que desliga o controle quando a posição do servo
motor é maior ou igual a 120° e menor ou igual a 30°

void rpm_fun ()
// rotina de verificação dos pulsos elétricos do sensor de rotação

{

rpmcount++;
// alocação dos pulsos elétricos do sensor de rotação

}

void setup()

// setup das variáveis

{

Serial.begin(9600);
// comando para utilização da comunicação serial

myservo.attach(9);
// set do pino de saída do servo motor

myservo.write(angi);
// escreve o ângulo inicial do servo motor
```

```
attachInterrupt(0, rpm_fun, FALLING);
// leitura do pino 2 através de interrupção na borda de descida,
quando o pino vai de nível alto para baixo

rpmcount = 0;
// inicia a variável em 0

rpm = 0;
// inicia a variável em 0

timeold = 0;
// inicia a variável em 0

}

void loop()

// rotina de repetição

{

delay(200);
// atualiza a leitura da rpm a cada 200 ms

detachInterrupt(0);
// desanexa a interrupção do pino 2

//Medição da rotação

rpm = (7.5*1000)/(millis() - timeold)*rpmcount;
// equação matemática que converte os pulsos elétricos gerados
em rpm

timeold = millis();
// grava o tempo da última leitura

Serial.print("RPM: ");
// escreve na tela a palavra "RPM"

Serial.print(rpm,DEC);
```

```
// escreve na tela o valor da rotação, variável RPM

Serial.print(" ");
// deixa um espaço vazio na tela

// rotina de Controle

erro=sp-rpm;
// calcula o erro do sinal de referência

posServo = angi+(kp*erro)+(ki*soma);
// calcula a posição do servo motor

flag=0;
// set da variável em 0

if (posServo>120)
// ponto de saturação, se o ângulo calculado para o servo for
maior que 120°

{

    posServo=120;
// posiciona o servo motor a 120°

    flag=1;
// set da variável em 1

}

if (posServo<30)
// ponto de saturação, se o ângulo calculado para o servo for
menor que 30°

{

    posServo=30;
// posiciona o servo motor a 30°

    flag=1;
// set da variável em 1
```

```
    }  
  
    if (flag==0)  
    // se o valor da variável flag for igual à zero  
  
    {  
  
        soma=soma+erro;  
    // calcula o acúmulo de erro  
  
    }  
  
    myservo.write(posServo);  
    // move o eixo do servo, de acordo com o ângulo calculado  
  
        Serial.print("PosServo:");  
    // escreve na tela a palavra "PosServo"  
  
        Serial.print(posServo);  
    // escreve na tela a posServo  
  
        Serial.println();  
    // pula linha na tela  
  
    rpmcount = 0;  
    // set da variável em 0  
  
    attachInterrupt(0, rpm_fun, FALLING);  
    // anexa interrupção do pino 2 e reinicia o processamento de  
    interrupção  
  
}
```