

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

SEL0329 – CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR SÍNCRONO

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari

Eric Guilherme Escovar
Lucas Eduardo Besttêti Romão
Vitor Manuel de Almeida Petrilli

São Carlos
2019

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação do rotor e estator de um gerador síncrono	7
Figura 2 – Desenvolvimento de um modelo de reação de armadura	9
Figura 3 – Circuito simples	10
Figura 4 – Circuito equivalente do gerador ligado em (a) Y e (b) em Δ	11
Figura 5 – Aro de bicicleta utilizado no projeto	12
Figura 6 – Imãs de Magnetron de microondas	13
Figura 7 – Pregos usados para fixar os circuitos	13
Figura 8 – Fios de cobre tirados de um motor de portão basculante	14
Figura 9 – Base de madeira - Porta de um guarda roupa	14
Figura 10 – Fios de telefone	14
Figura 11 – Lâmpada de Rêsidencia comum de LED 4.9W	15
Figura 12 – Bocal para a lâmpada	15
Figura 13 – Motor	15
Figura 14 – Palitos de sorvete	16
Figura 15 – Transformador 22V : 127V	16
Figura 16 – Interruptor para acionar o motor e a lâmpada	16
Figura 17 – Componentes da Ponte retificadora de Tensão	17
Figura 18 – Placa para a solda dos diodos e capacitor	17
Figura 19 – Esquema final de montagem do gerador e suas funcionalidade	18
Figura 20 – Ligação das bobinas do Estator	18
Figura 21 – Base de madeira do projeto do gerador síncrono	19
Figura 22 – Instalação do aro na base - Processo inicial de encaixe	20
Figura 23 – Processo retirada dos imas do magnetron	20
Figura 24 – Colocando os núcleos no Imãs	21
Figura 25 – Furo dos núcleos	21
Figura 26 – Furos no aro	22
Figura 27 – Colocando os Imãs no aro de bicicleta	22
Figura 28 – Base com o aro e os imãs	23
Figura 29 – bobinas instaladas no gerador e os palitos base	23
Figura 30 – bobinas instaladas no gerador	24
Figura 31 – Esquema de montagem do gerador e suas funcionalidade	24
Figura 32 – Distância ideal para o entreferro	25
Figura 33 – Curva característica do circuito	25
Figura 34 – Curva característica do circuito com trafo	26

Figura 35 – Rotações por minuto obtidas pelo Tacômetro	27
--	----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Variação da velocidade em gerador síncrono	8
---	---

Sumário

1	Resumo	5
2	Introdução	6
3	Fundamentação Teórica	7
3.1	<i>Leis físicas envolvidas</i>	7
3.2	<i>Aspectos construtivos dos geradores síncronos</i>	7
3.3	<i>Velocidade de rotação de um gerador síncrono</i>	8
3.4	<i>Tensão interna gerada por um gerador síncrono</i>	8
3.5	<i>Circuito equivalente de um gerador síncrono</i>	9
4	Roteiro de Pesquisa	12
5	Descrição do projeto de gerador síncrono	12
5.1	<i>Materiais utilizados</i>	12
5.2	<i>Caracterização do projeto</i>	17
6	Procedimentos Experimentais	19
7	Análise dos Resultados e Discussões	25
8	Conclusão	27

1 Resumo

O processo de geração de energia elétrica é complexo e exige precauções ao ser executado. No Brasil, grande parte da geração provém de usinas hidrelétricas utilizando como fonte o potencial energético da água. Assim, uma vez que a energia é produzida, ocorre à elevação de tensão por meio dos transformadores, em seguida a transmissão por meio das linhas de transmissão, e por fim a tensão é rebaixada na subestação abaixadora. Por meio das redes de distribuição, a energia é entregue ao consumidor final. Entretanto, para o desenvolvimento deste projeto será considerado apenas a parte da geração. Sendo assim, abordaremos a construção semelhante de um gerador síncrono discorrendo sobre suas principais características e conceitos físicos. Ao final do projeto será possível compreender mediante as práticas realizadas o princípio de máquinas elétricas.

2 Introdução

Neste projeto desenvolveremos a análise sobre um gerador síncrono, isto é, uma máquina rotativa que transforma energia mecânica em energia elétrica. Para isso, o princípio referente em questão é a excitação de fluxo no rotor produzindo um campo magnético, o qual será realizado por meio de ímãs permanentes.

Sendo caracterizadas pela igualdade da frequência elétrica das tensões geradas no estator com a velocidade de rotação do eixo do rotor, as máquinas síncronas ao operarem como motor apresentam velocidades de rotação do campo magnético girante igual às velocidades de rotação.

Com isso, referente aos enrolamentos de uma máquina, há uma caracterização em enrolamentos de campos e enrolamentos de armadura. O primeiro termo remete-se a produção do campo magnético principal, enquanto o segundo termo é referente aos enrolamentos aos quais é induzida a tensão principal.

Para o caso dos geradores, conforme estudaremos, o modelo a ser desenvolvido é baseado em um gerador síncrono eólico de tipo 1. Dessa maneira, para um evento realístico espera-se que a velocidade de rotação do gerador seja constante, uma vez que, a velocidade do rotor é atrelada as frequências elétricas geradas nas tensões induzidas produzidas no estator. Como o objetivo é uma frequência constante, logo a velocidade também deve ser constante, independente do consumo de potência ativa.

Portanto, para simulação de um gerador síncrono, o desenvolvimento a seguir expressa os meios mais viáveis para representar a geração de tensão elétrica induzida com polaridade dependente do sentido do campo e valor de fluxo que atravessa um condutor submetido a um campo magnético variável.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Leis físicas envolvidas

O princípio da conversão eletromecânica de energia baseia-se em uma das descobertas mais importantes na história do eletromagnetismo: a Lei de Indução de Faraday. Tal lei afirma que, quando um circuito é submetido a um campo magnético variante no tempo, uma força eletromotriz será criada sobre o mesmo. Matematicamente, a força eletromotriz gerada é igual à taxa de variação temporal do fluxo magnético, e descrita pela equação 1, abaixo.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

3.2 Aspectos construtivos dos geradores síncronos

Para compreensão do funcionamento de um gerador síncrono, iniciaremos a análise mediante aos conceitos básicos dos aspectos construtivos, no caso, do rotor e do estator conforme ilustrado na figura 1, abaixo:

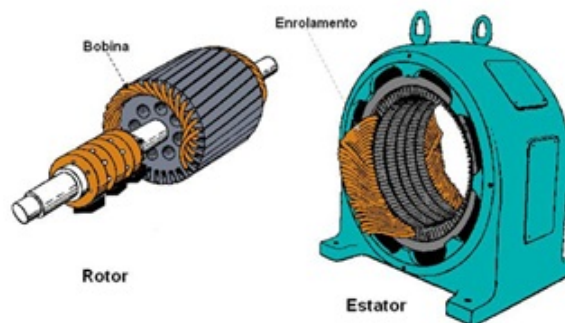


Figura 1 – Representação do rotor e estator de um gerador síncrono

O gerador síncrono é composto por um rotor com campo CC, isto é, a corrente elétrica presente nas bobinas do rotor é uma corrente contínua, o que implica diretamente na geração de um campo magnético contínuo. Assim, com o movimento de rotação do rotor, o campo magnético contínuo irá gerar um fluxo magnético no ar, que por sua vez, ao atravessar as bobinas do estator, haverá geração de um conjunto de tensões senoidais que serão induzidas nas determinadas espiras.

É importante observar que embora o campo magnético no rotor seja invariável, o fluxo que atravessará a área das espiras é senoidal devido ao movimento ser rotatório. Assim as tensões induzidas nas bobinas do estator serão senoidais.

3.3 Velocidade de rotação de um gerador síncrono

Como já vimos, a frequência elétrica produzida está vinculada com a velocidade mecânica de rotação do gerador. Isto implica que a taxa de rotação dos campos magnéticos está relacionada com a frequência elétrica do estator por meio da equação 2, abaixo:

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120} \quad (2)$$

Assim, a frequência elétrica das tensões e correntes do estator é diretamente relacionada com o produto da velocidade mecânica do campo magnético girante correspondente a velocidade do rotor com o número de pólos do estator, dividido por 120. Dessa maneira, quanto maior o número de pólos, menor será a velocidade de rotação para obtenção de uma determinada tensão mediante a uma determinada frequência.

No caso do projeto em questão, consideraremos um total de 16 pólos a fim de gerar uma tensão com frequência constante de 60 Hz com velocidade constante de rotação de 450 rpm, conforme presente nos dados da tabela 1 ,abaixo:

Tabela 1 – Variação da velocidade em gerador síncrono

Número de Pólos	f = 60 Hz [rpm]	f = 50 Hz [rpm]
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600
12	600	500
14	514.29	428.57
16	450	375

3.4 Tensão interna gerada por um gerador síncrono

A tensão induzida em uma determinada fase do estator é dada pela equação 3, abaixo:

$$E_A = \sqrt{2} \pi N_c \phi f \quad (3)$$

Ou de maneira simplificada, podemos escrever como a equação 4, abaixo:

$$E_A = K \phi \omega \quad (4)$$

Logo, a tensão induzida em uma fase do estator é dependente da constante K, do valor do fluxo produzido no rotor e da velocidade que o rotor é posto a girar. A equação 4 é oriunda da lei de Faraday para movimentos circulares rotatórios, onde a tensão induzida em uma fase é dependente da taxa de variação de fluxo e do número de espiras.

Portanto, sendo a tensão induzida diretamente proporcional ao fluxo e à velocidade, e sendo o fluxo, depende da corrente que flui no circuito de campo do rotor, conclui-se que quanto maior a corrente de campo, maior a tensão interna gerada.

3.5 Circuito equivalente de um gerador síncrono

No processo de produção da tensão induzida da equação 4, espera-se que haja igualdade com a tensão nos terminais do gerador V_ϕ . Entretanto, isto não ocorre devido a reação de armadura, autoindutância e resistência das bobinas da armadura e o efeito dos pólos salientes do rotor, o qual será desconsiderado visto que possui influência desprezível para a análise em questão.

Por outro lado, a distorção do campo magnético do entreferro é oriunda da produção do campo magnético na máquina devido a uma corrente trifásica circulando no estator. A figura 2 abaixo ilustra esta relação de armadura:

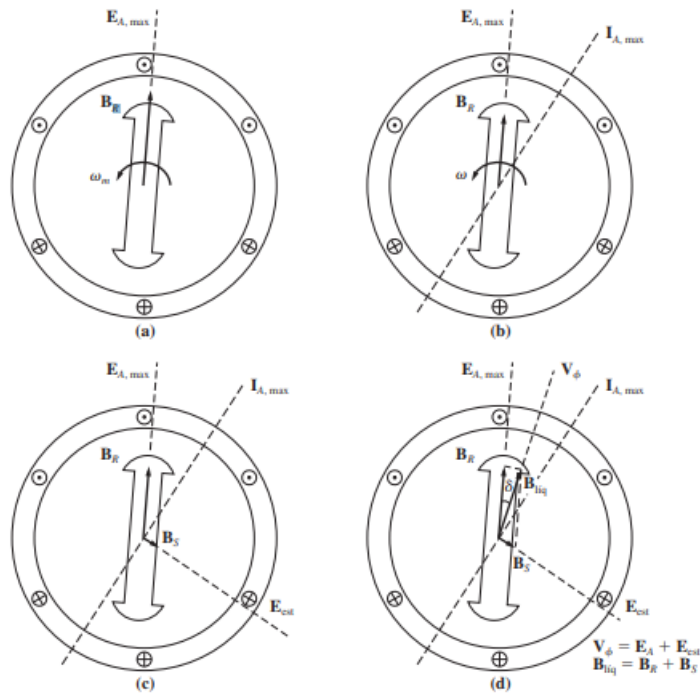


Figura 2 – Desenvolvimento de um modelo de reação de armadura

Nota-se que o campo magnético B_R do rotor é responsável por produzir a tensão E_A . Entretanto, se não houver carga conectada ao gerador, não háverá fluxo de corrente na armadura, e portanto, E_A será equivalente a V_ϕ .

Todavia, uma vez que há carga aplicada ao gerador, há alteração do pico de corrente quando comparada ao pico de tensão, como demonstrado na figura 2 item b, o qual representa uma carga reativa atrasada.

O campo magnético oriundo da corrente que flui no estator retratado como B_S respeitando a regra da mão direita é responsável por produzir uma tensão própria E_{est} , conforme demonstrado na figura 2 item c. Portanto, sendo esta tensão também presente no estator, a tensão por fase é dada pela equação 5, abaixo:

$$E_\phi = E_A + E_{est} \quad (5)$$

Assim, também temos que a soma dos campos magnéticos do rotor e do estator é representada pelo campo magnético líquido conforme a equação 6, abaixo:

$$B_{liq} = B_R + B_S \quad (6)$$

A representação das tensões e correntes resultantes são expressas na figura 2 item d.

Por fim, pode-se modelar os efeitos da reação de armadura sobre a tensão de fase. Isto é possível, visto que, a tensão E_{est} é proporcional a corrente I_A e está atrasada em 90° . Com isso, sendo X uma constante de proporcionalidade, podemos equacionar o circuito da figura 3 por meio da lei das tensões de Kirchhoff como retratado na equação 7, abaixo:

$$V_\phi = E_A - jXI_A \quad (7)$$

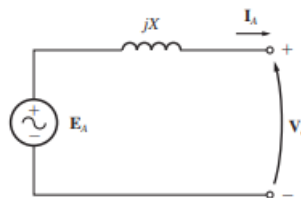


Figura 3 – Circuito simples

Além do efeito da armadura como mencionado, o parâmetro da tensão sofre influência da autoindutância com reatância X_A e resistência R_A das bobinas do estator. Com isto, a equação 7 é reescrita como a equação 8, abaixo:

$$V_\phi = E_A - jXI_A - jX_A I_A - jR_A I_A \quad (8)$$

Combinando as reatâncias em uma reatância síncrona $X_S = X + X_A$, obtém-se finalmente a equação 9, abaixo:

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (9)$$

Portanto, com os conceitos definidos, torna-se possível construir um circuito equivalente de um gerador síncrono trifásico, sendo que cada fase possui tensão interna com uma resistência

R_A e indutância X_A em série. Tais fases possuem tensões e correntes estão defasadas em 120° e podem ser ligadas tanto em Y como em Δ como mostra a figura 4, abaixo:

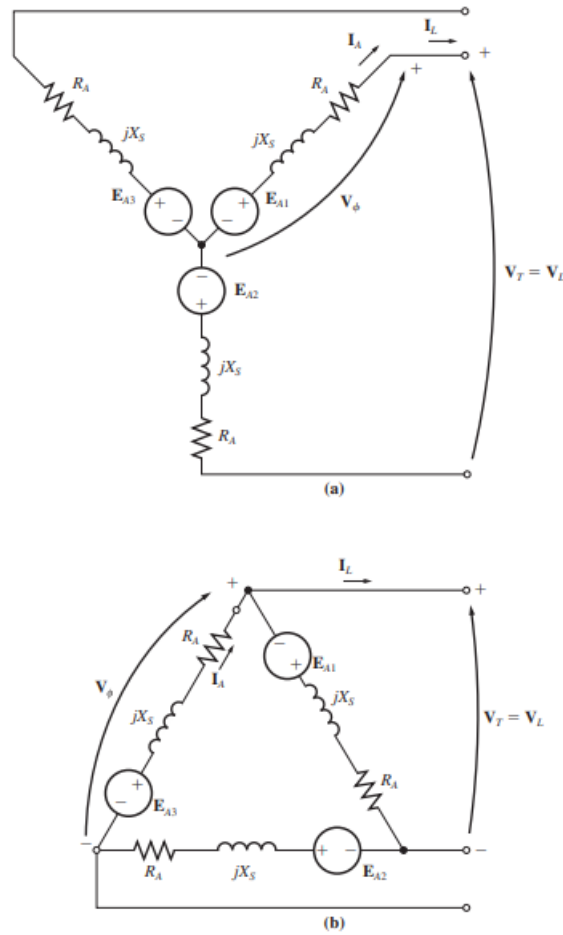


Figura 4 – Circuito equivalente do gerador ligado em (a) Y e (b) em Δ

4 Roteiro de Pesquisa

Mediante ao estudo e desenvolvimento sobre geradores síncronos, conforme presente na seção anterior, as etapas constituintes para desenvolvimento do projeto seguiram uma lógica, conforme expressa abaixo:

- Levantamento bibliográfico sobre aspectos e modos de geradores síncronos;
- Pesquisa sobre geradores de baixo custo;
- Escolha do tipo de gerador;
- Desenvolvimento dos procedimentos experimentais e testes;
- Análise dos resultados e discussões

5 Descrição do projeto de gerador síncrono

Uma vez realizada a análise teórica e as partes constituintes de um gerador síncrono, damos início a análise em questão. Sendo assim, o projeto conta com o desenvolvimento de um gerador síncrono de 16 pólos magnéticos onde almeja-se uma velocidade de rotação equivalente a 450 rpm para induzir uma tensão com a frequência de 60 Hz.

5.1 Materiais utilizados

- Aro 26 de bicicleta comum;



Figura 5 – Aro de bicicleta utilizado no projeto

- 16 ímãs Magnetron de Microondas;



Figura 6 – Ímãs de Magnetron de microondas

- Pregos;



Figura 7 – Pregos usados para fixar os circuitos

- Fio de cobre 18 AWG;



Figura 8 – Fios de cobre tirados de um motor de portão basculante

- Madeira;



Figura 9 – Base de madeira - Porta de um guarda roupa

- Fio de telefone;

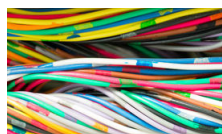


Figura 10 – Fios de telefone

- Lâmpada 4.9W 100-240V Led;



Figura 11 – Lâmpada de Rêidência comum de LED 4.9W

- Bocal para lâmpada;



Figura 12 – Bocal para a lâmpada

- Motor DC 6V - Retirado de um DVD;



Figura 13 – Motor

- Palitos de sorvete;



Figura 14 – Palitos de sorvete

- Transformador de fonte de PC;



Figura 15 – Transformador 22V : 127V

- Interruptor Comum de Residência ;



Figura 16 – Interruptor para acionar o motor e a lâmpada

- Elementos do Retificador de Onda Completa : Diodos e Capacitor ;



Figura 17 – Componentes da Ponte retificadora de Tensão

- Placa para Soldar o Retificador de onda completa ;



Figura 18 – Placa para a solda dos diodos e capacitor

5.2 Caracterização do projeto

A estrutura será montada conforme explicitado na figura 31 abaixo. Como pode ser observado, os ímãs encontram-se fixados na parte externa da roda de bicicleta, sendo esta, fixa na base confeccionada pela madeira.

Com a representação de nosso rotor, como presente na figura 31, caracterizou-se o estator por bobinas ligadas em série instaladas ao redor da roda de bicicleta. Com a rotação da roda de bicicleta, existe uma variação do fluxo magnético que atravessa as bobinas, pois a cada ciclo de rotação existirá linhas de campo do polo N e polo S atravessando a bobina, gerando uma tensão induzida. O esquema é representado na figura 31, abaixo:



Figura 19 – Esquema final de montagem do gerador e suas funcionalidade

Essa configuração do projeto de gerador é caracterizada como um gerador monofásico, uma vez que, definimos uma configuração das bobinas em série, conforme representado na figura 26 abaixo.

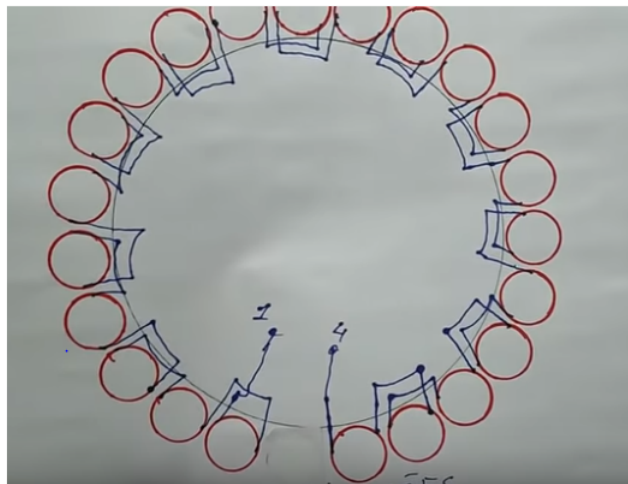


Figura 20 – Ligação das bobinas do Estator

Entretanto, para o caso de uma geração trifásica, basta triplicar o projeto monofásico e fazer a ligação entre as fases em forma de delta ou estrela.

O tipo de cabo utilizado, foi pensando na corrente total produzida pelo gerador. O número de espiras foi estimado a partir do tamanho da bobina, no qual é do mesmo tamanho do ímã de uma fase. Dessa forma, estimou-se cerca de 100 espiras para cada bobina. O mesmo tamanho entre as bobinas e os ímãs do rotor influencia no maior aproveitamento das linhas de campo do fluxo magnético, assim como a distância associada do entreferro entre o estator e o rotor.

6 Procedimentos Experimentais

Todo material utilizado na confecção do gerador síncrono foi recolhido em centros de sucatas. O procedimento de obtenção de peças e montagem do gerador está descrito adiante.

O processo da montagem do gerador síncrono de característica eólica foi representado nos seguintes passos:

A base de madeira, mostrado na figura a seguir, foi conseguido vasculhando-se um ecoponto no bairro Santa Angelina, próximo ao campus 2 da USP de São Carlos. Nessa peça, montou-se todos os equipamentos e materiais para a formação do gerador síncrono.



Figura 21 – Base de madeira do projeto do gerador síncrono

Essa base de madeira foi furada, com um auxílio de uma furadeira, e fixou-se o aro de bicicleta na base, assim como mostrado nas figuras a seguir.

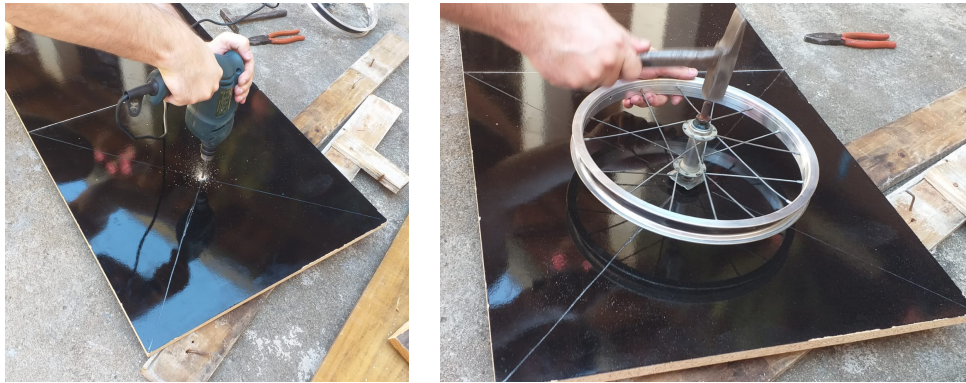


Figura 22 – Instalação do aro na base - Processo inicial de encaixe

Como o encaixe da roda foi ajustado de modo simétrico na base, retirou-se a roda para fixar os Imãs retirados dos magnétrons de micro ondas comprados no ferro velho. A seguir, as imagens mostram o processo de retirada dos Imãs dos magnétrons:

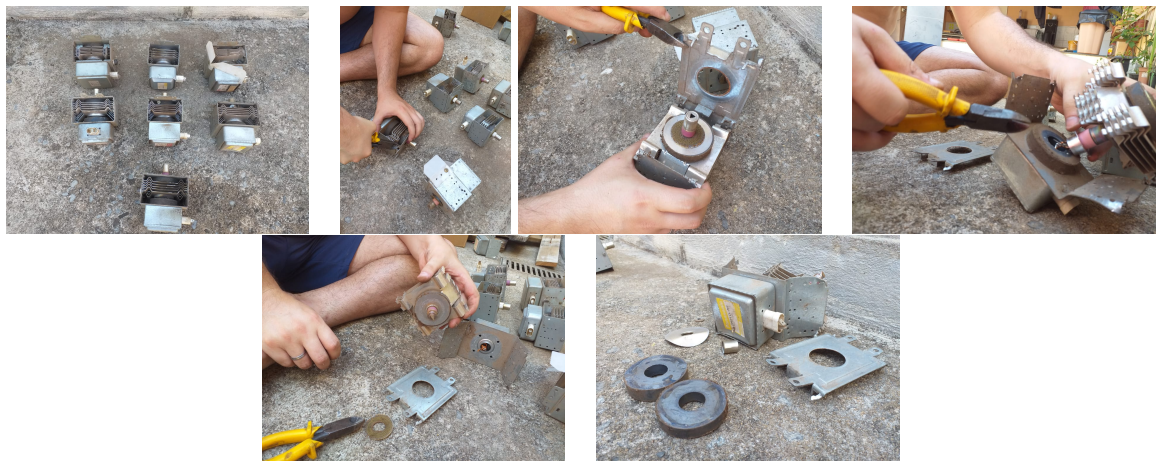


Figura 23 – Processo retirada dos imas do magnetron

Logo após a retirada dos Imãs dos magnétrons, realizou-se os cortes dos núcleos de madeira caracterizados por segmentos de um cabo de vassoura. Esses núcleos são responsáveis pela fixação dos Imãs na pate externa do aro de bicicleta. Em seguida, fixou-se com superponder os núcleos de madeira em cada um dos 16 Imãs, que formariam os 16 polos do gerador. O processo de corte dos núcleos e sua fixação nos ímãs, está em detalhe na sequencia de imagens a seguir:



Figura 24 – Colocando os núcleos no Imãs

Em seguida, furou-se os núcleos de madeira de cada Imãs com o auxílio de uma furadeira. Esses furos foram necessários para posteriormente parafusar os Imãs ao lado externo do aro da bicicleta.



Figura 25 – Furo dos núcleos

Logo após furar os núcleos, repetiu-se o processo para o aro de bicicleta. Furou-se em uma distribuição uniforme, 16 furos para a instalação dos Imãs na parte externa do aro.



Figura 26 – Furos no aro

Logo após o processo de furagem do aro e dos núcleos, instalou-se os Imãs no aro, distribuídos o mais uniforme possível, com um auxílio de uma chave de fenda e parafusos. Um detalhe a se ressaltar, a instalação dos Imãs foi realizada de forma alternada em relação ao polo norte e sul de cada elemento.



Figura 27 – Colocando os Imãs no aro de bicicleta

Por fim, instalou-se o aro em definitivo na base de madeira, prendendo-se com uma porca no verso da base como mostra as figuras a seguir:



Figura 28 – Base com o aro e os ímãs

Com o aro e com os ímãs instalados na base do gerador, temos que instalar as bobinas. As bobinas foram feitas, enrolando-se o fio de cobre pegado de um motor de portão basculante. Enrolou-se as bobinas com o auxílio de uma parafusadora e um pote que tinha as dimensões dos Ímãs. Cada bobina foi enrolada com 100 espiras.

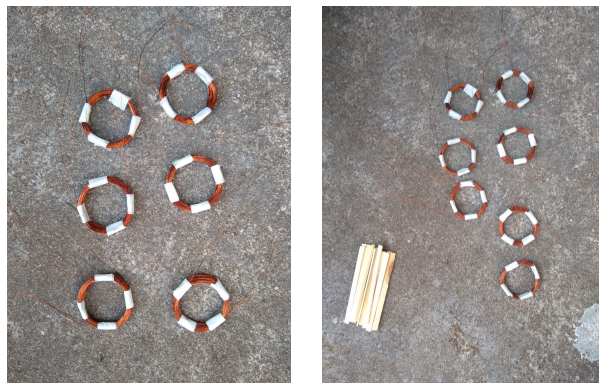


Figura 29 – bobinas instaladas no gerador e os palitos base

Com uma furadeira, furou-se ao redor do aro com os Ímãs orifícios para o encaixe dos palitos de sorvete que serviriam de suporte para a instalação das bobinas. Realizado isso, instalou-se as 16 bobinas ao redor do gerador, como mostra as imagens a seguir:



Figura 30 – bobinas instaladas no gerador

Finalizou-se o Projeto, instalando-se o motor, interruptor, transformador, bocal, lâmpada, retificador de onda completa e os circuitos de ligação. Detalhou-se as funcionalidade.



Figura 31 – Esquema de montagem do gerador e suas funcionalidade

7 Análise dos Resultados e Discussões

Nota-se que a distância adotada para o entreferro influenciou diretamente na obtenções dos parâmetros de análise. Tal fato é exemplificado e explicado na figura 32, abaixo:

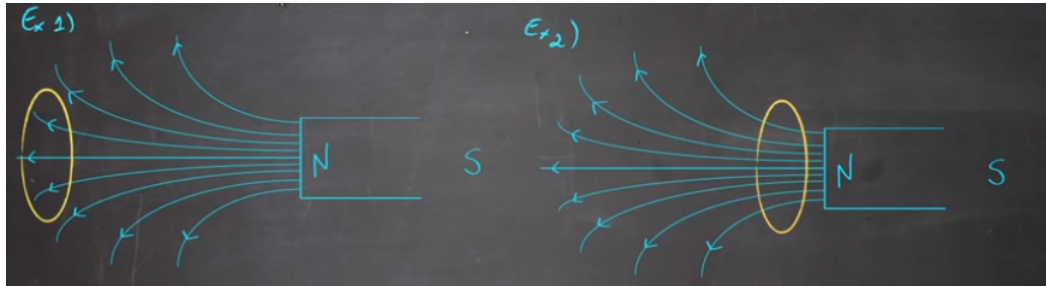


Figura 32 – Distância ideal para o entreferro

Com isto, têm-se duas situações, respectivamente representadas no *exemplo1* e *exemplo2*.

Para o primeiro caso, a variação de fluxo magnético produzido pelo rotor não está sendo aproveitada de maneira adequada para obtenção dos parâmetros. Isto ocorre porque a distância do entreferro é tal que as linhas de fluxo magnético atravessam em pouca concentração as bobinas.

Com isto, nota-se que ao atravessar uma bobina, o fluxo magnético induz uma corrente no circuito. Por sua vez, esta corrente cria um campo magnético contrário ao fluxo magnético. Sendo assim, quanto maior o fluxo maior será o campo magnético contrário e portanto maior a corrente.

Esse fato é evidenciado no segundo caso. Logo com a distância mínima do entreferro, torna-se possível aproveitar qualitativamente o fluxo magnético. Em vista disto, com o projeto em questão desenvolvido, adotou-se a menor distância possível para o entreferro e por meio de um osciloscópio, observou-se o comportamento dos parâmetros de análise conforme retratado na figura 33, abaixo:

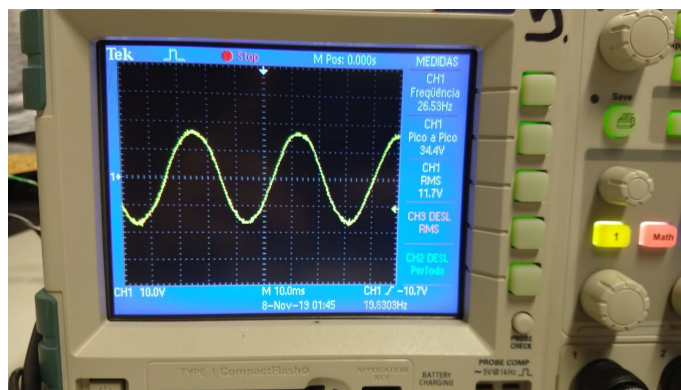


Figura 33 – Curva característica do circuito

Dessa forma, observa-se os dados referentes aos seguintes parâmetros:

- $f = 26.53 \text{ Hz}$;
- $V_{pp} = 34.4 \text{ V}$;
- $V_{RMS} = 11.7 \text{ V}$.

Em seguida, adotou-se as configurações de circuitos para aproveitar o máximo da geração de energia. Com isto, acoplou-se o transformador de para ligar a lâmpada de e assim, mediu-se novamente os parâmetros de análise, conforme evidenciado na figura 34, abaixo:

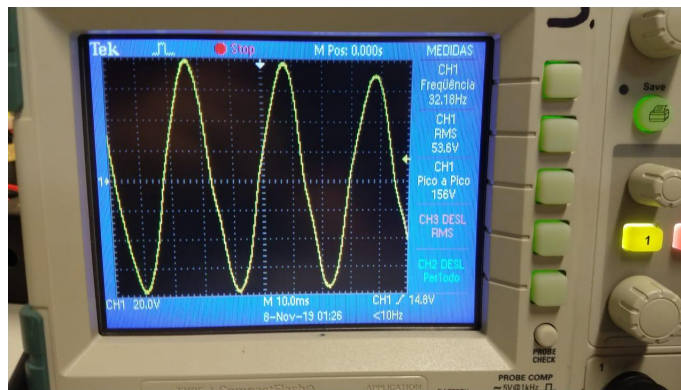


Figura 34 – Curva característica do circuito com trafo

Dessa forma, observa-se os dados referentes aos seguintes parâmetros:

- $f = 32.18 \text{ Hz}$;
- $V_{pp} = 156 \text{ V}$;
- $V_{RMS} = 53.6 \text{ V}$.

Para verificar se o processo estava de acordo com o esperado, recorreu-se a equação 2 onde isolando a velocidade do rotor, determinou-se se o número de rotações na prática estava de acordo com o teórico.

O processo levou em consideração a configuração do circuito que originou a forma de onda presente na figura 33.

Para o caso teórico, têm-se:

$$n_m = \frac{f_{se} \cdot 120}{P} = \frac{26.53 \cdot 120}{16} = 198.975 \text{ rpm} \quad (10)$$

Para a prática, utilizou-se do tacômetro digital e assim tornou-se possível verificar as rotações por minuto conforme presente na 35, abaixo:

Nota-se portanto que os valores são condizentes sendo a prática referente a 171 rpm e o valor teórico a aproximadamente 198.9 rpm . Esta diferença ocorreu devido a dificuldade de manuseio do tacômetro, assim como a baixa refletância do material para leitura do tacômetro.

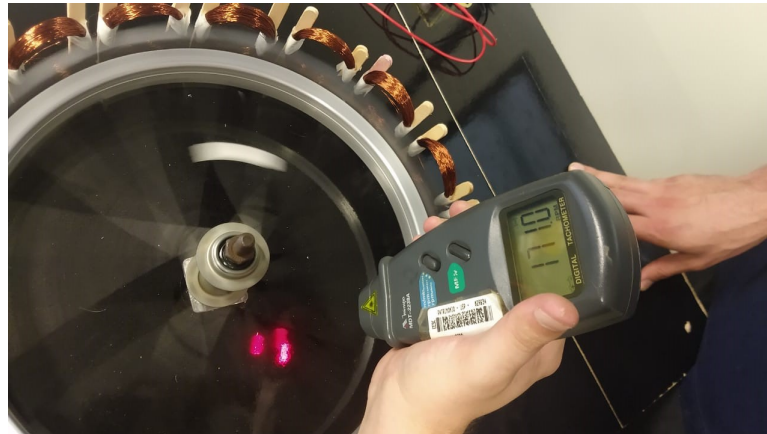


Figura 35 – Rotações por minuto obtidas pelo Tacômetro

8 Conclusão

O projeto ocorreu de acordo com o esperado, sendo possível compreender os principais conceitos de um gerador síncrono. O desenvolvimento contou com a interpretação do princípio de indução de Faraday e como projetar uma máquina capaz de produzir energia elétrica.

A curva característica do circuito elétrico, mediante a configuração do sistema adotado correspondeu a uma senoide e tornou-se possível medir valores de corrente e tensão mediante a análise AC, conforme previsto.

Por fim, analisou-se as possíveis aplicações em demais circuitos a fim de compreender aspectos qualitativos e quantitativos do projeto desenvolvido em questão.