

Tecnologias no ensino de física: gerador com motor de máquina de lavar

Technologies in physics Teaching: washing machine engine generator

André Luíz Alves^{*1}, Kaio Alan Littike², Luan Souza Coelho², Cledrlon Pereira Machado²

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Ciências Naturais, São Mateus, ES, Brasil.

²Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, Brasil.

Recebido em 16 de novembro de 2022. Aceito em 09 de dezembro de 2022.

Neste trabalho foi construído um gerador elétrico do tipo trifásico, utilizando um motor de máquina de lavar. Por sua potência, este é capaz de ligar diversos equipamentos eletrodomésticos, e máquinas industriais de pequena potência, como furadeiras, liquidificador e lâmpadas. O gerador foi acoplado às peças de uma bicicleta em um sistema denominado “gerador acoplado a uma bicicleta”. As teorias relevantes ao ensino da produção e caracterização da energia elétrica alternada foram abordadas e comprovadas experimentalmente. Este experimento pode ser utilizado tanto para fins demonstrativos, em feiras de ciências, atividades lúdicas, e também no ensino da geração da energia elétrica.

Palavras-chave: Ensino, Construção, Gerador Elétrico, Corrente Alternada.

A three-phase electric generator was built, using a washing machine motor. Due to its power, it is capable of connecting various household appliances and small-power industrial machines, such as drills, electric saws and grinders. The generator was coupled to the parts of a bicycle in a system called “generator coupled to a bicycle”. Theories relevant to teaching the production and characterization of alternating electrical energy were approached and experimentally proven. This experiment can be used both for demonstrative purposes, in science fairs, recreational activities, and also in the teaching of electric energy generation.

Keywords: Teaching, Construction, Electric Generator, Alternating Current.

1. Introdução

A energia elétrica tem um papel significativo no desenvolvimento e, até mesmo, na existência da sociedade atual, na qual faz parte do cotidiano do brasileiro desde o final do século XIX. De 1920 em diante, houve uma ampliação progressiva na instalação de hidrelétricas, sendo a maior fonte de geração de energia do país [1]. A maior parte da energia elétrica usada nos meios residenciais, industriais entre outros é do tipo Corrente Alternada (CA), por ter uma melhor eficiência e um melhor controle.

Ademais, essa geração de energia elétrica é disposta na forma de um sistema trifásico, onde, numa configuração simples, três bobinas são defasadas uma da outra em 120° no estator e no rotor temos a presença de ímãs/eletroímãs que quando giram, fornecem às bobinas uma variação de fluxo de campo magnético, induzindo assim tensão na bobina com defasagem de 120° [2]. Esse sistema, conhecido ainda no século XIX, pode ser utilizado em sala de aula para aproximar teorias do eletromagnetismo com a realidade dos estudantes.

O uso de sistemas físicos reais como recurso didático, de caráter teórico-experimental, potencializa o diálogo

em sala de aula, aproxima o estudante da realidade que o cerca e tem a função pedagógica de propiciar uma melhor compreensão conceituadas teorias físicas [3]. Neste contexto o aluno ao vivenciar o funcionamento de um equipamento elétrico estará vivenciando fenômenos eletromagnéticos abordados em sala. De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio:

“O desenvolvimento dos fenômenos elétricos e magnéticos, por exemplo, pode ser dirigido para a compreensão dos equipamentos elétricos que povoam nosso cotidiano, desde aqueles de uso doméstico aos geradores e motores de uso industrial, provendo competências para utilizá-los, dimensioná-los ou analisar condições de sua utilização. Dessa forma, o sentido para o estudo da eletricidade e do eletromagnetismo pode ser organizado em torno de equipamentos elétricos e telecomunicações” [4].

Com isso, se tem uma formação de alunos que consigam associar seus conhecimentos teóricos com práticas em seus cotidianos. Portanto, neste trabalho é apresentado a montagem de um aparato experimental que relaciona uma vivência do aluno (andar de bicicleta) com um processo muito essencial (geração de energia

* Endereço de correspondência: andre.alves@ufes.br

elétrica) e um assunto muito importante da física, a geração de energia elétrica. Utiliza-se uma máquina elétrica rotativa, um motor de máquina de lavar, na função inversa, como um gerador de energia elétrica. A grande inovação deste trabalho é que o gerador proposto tem potência suficiente para ascender lâmpadas incandescentes e ligar aparelhos eletrodomésticos como ventilador, liquidificador e outros.

Na introdução teórica, aborda-se de forma simples, as partes de um gerador e seu funcionamento de forma intuitiva. Em seguida, dá-se uma ênfase detalhada da montagem do sistema para que qualquer professor possa replicar este experimento em sua instituição de ensino. Nas propostas experimentais realizam-se medições com instrumentos elétricos, caracterizando as formas de onda geradas de tensão, medem-se a defasagem entre elas e verifica-se a relação entre a frequência elétrica gerada e o número de polos do gerador. Trata-se de um trabalho voltado para: (i) a instrumentação no ensino de física, (ii) ensino de física de forma lúdica e (iii) a inserção da experimentação no ensino de física.

O gerador elétrico fabricado neste trabalho poderá ser utilizado por qualquer professor como recurso didático, de caráter teórico-experimental para potencializar o ensino de eletromagnetismo em sala de aula, levando a física para a vida cotidiana do estudante, tornando-se mais prática e interessante para ele. A construção do sistema aqui abordado foi realizada por uma equipe de três estudantes bolsistas, integrantes de projetos de ensino distintos. Todas as medições foram realizadas pela equipe, e foi aplicado no ensino de eletromagnetismo a um grupo de cinco estudantes do Instituto Federal de Educação do Espírito Santo, IFES, vinculados ao projeto de ensino: “Promovendo a Ciência por Meio de Práticas Experimentais”.

2. Referencial Teórico

2.1. Geradores síncronos de ímãs permanentes de fluxo radial

Os geradores, ou alternadores, pertencem à categoria das máquinas síncronas, isto é, máquinas cuja frequência da tensão gerada é diretamente relacionada ao número de polos magnéticos e à rotação do rotor (veja a seção 2.2). Não há, basicamente, diferenças construtivas entre um alternador e um motor síncrono, podendo um substituir o outro sem prejuízo de desempenho. Assim, um alternador quando tem seu eixo acionado por um motor, produz energia elétrica nos terminais e, ao contrário, recebendo energia elétrica nos seus terminais, produz energia mecânica na ponta do eixo, com o mesmo rendimento [5, 6]. A forma no qual o fluxo do campo magnético atravessa as bobinas do gerador, para produzir a força eletromotriz (fem) define se o gerador será de fluxo radial ou axial. No primeiro caso, o fluxo magnético é perpendicular ao eixo de rotação; já no segundo, o fluxo é paralelo ao eixo [6].

A origem do campo magnético que produzirá o fluxo sobre as bobinas do gerador define uma classificação entre os geradores. Este campo pode ser produzido por ímãs permanentes ou pode ser produzido por uma bobina eletroímã, cuja corrente inicial em seus enrolamentos (corrente de excitação), é fornecida por uma fonte externa. Uma vez que o gerador está em funcionamento, a corrente nesta bobina pode ser alimentada pelo próprio gerador [7]. A maior vantagem no uso dos geradores elétricos de ímãs permanentes é que se torna desnecessário o uso de uma fonte de excitação externa para produzir corrente inicial no eletroímã, reduzindo custos. Adicionalmente, não há perdas por efeito Joule no eletroímã, o que aumenta a eficiência do gerador. Neste trabalho, o gerador didático produzido é do tipo síncrono de ímãs permanentes de fluxo radial, adaptado de um motor de uma máquina de lavar do tipo lava e seca da marca Eletrolux®.

2.2. A frequência elétrica num gerador síncrono

Para um número N total de polos (norte ou sul), a relação entre f_m e f_{el} , medidas em unidades de RPM ou Hz, é dada por [2]:

$$f_{el} = \frac{N}{2} f_m. \quad (1)$$

Entretanto, se f_m é dada em unidades de RPM e deseje-se obter f_{el} em Hz, basta dividir o membro direito da Equação (1) por 60. O termo $N/2$ representa o número de pares de polos (n_p).

De acordo com a Equação (1), um gerador com muitos ímãs não necessitará de uma frequência de rotação muito elevada. Isto pode ser observado, por exemplo, nos geradores eólicos, quando se percebe a baixa velocidade da rotação mecânica das hélices.

2.3. Gerador trifásico com ligação estrela

Os geradores trifásicos são caracterizados por produzirem tensões alternadas periódicas, balanceadas e defasadas em 120° entre si. Quando as formas dos ímãs e bobinas são adequadas e a disposição destes no gerador estão de acordo com um bom projeto elétrico, baseado em teorias bem fundadas, haverá sob certas condições uma tensão típica cuja forma se aproxima muito de funções senoidais [8]. O sistema trifásico, por apresentar diversas vantagens sobre os sistemas monofásicos e polifásicos, tornou-se padrão na produção da energia elétrica no mundo. Por exemplo, na questão da transmissão, são requeridos condutores com diâmetros menores que o sistema monofásico para geradores de mesma potência. Com a tensão trifásica, é possível produzir motores elétricos menores, mas de potência igual ou superior aos monofásicos. Outra vantagem é que a potência fornecida por este sistema, ao contrário dos monofásicos é constante [9].

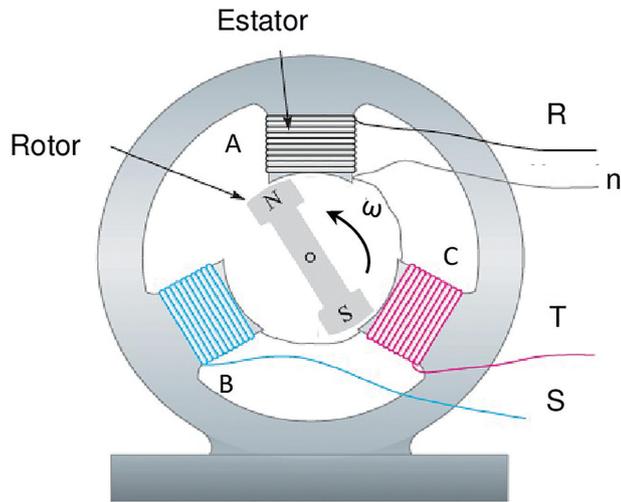


Figura 1: Um gerador trifásico de tensão alternada. Adaptado de Electrical (2017) [11].

Na Figura 1 está ilustrado um gerador trifásico de fluxo tipo radial, comumente utilizado para abordar o sistema trifásico de maneira mais simples e didática. Nesta ilustração o ímã, com polaridade norte e sul, no rotor, gira passando em frente a cada uma das três bobinas *A*, *B* e *C* fixadas no estator. Estas bobinas estão defasadas geometricamente de 120° e geram tensões elétricas que também são defasadas de 120°, quando os ímãs se movem, descrevendo um movimento circular. Para um bom projeto, as tensões terão a forma [10]:

$$V_A(t) = V_{Am} \text{sen}(\omega t), \tag{2}$$

$$V_B(t) = V_{Bm} \text{sen}(\omega t + 120), \tag{3}$$

$$V_C(t) = V_{Cm} \text{sen}(\omega t - 120), \tag{4}$$

nos quais $V_{Am} = V_{Bm} = V_{Cm}$ são as amplitudes de tensão nas bobinas *A*, *B* e *C* respectivamente.

Como as tensões estão defasadas de 120° os inventores deste sistema notaram que ao se unir três terminais comum de cada uma destas bobinas, tipo final de uma com o final de outra, pode-se extrair um fio condutor com tensão nula. Este fio é denominado de neutro (*n*), pode ser ligado à Terra, no qual a diferença de potencial é nula. A ligação trifásica no qual se obtém o neutro é denominada de estrela, ou ‘*Y*’ [2, 10]. Os demais fios são comumente, designados pelos eletricitistas de fases *R*, *S* e *T*. A forma de onda das tensões nas fases *R*, *S* e *T*, aqui representadas por senoides e medidas relativamente ao neutro, estão ilustradas na Figura 2(a). Nesta Figura também estão representadas as amplitudes de tensão V_{Am} , V_{Bm} e V_{Cm} para as respectivas fases *R*, *S* e *T*, que saem das bobinas *A*, *B* e *C*, respectivamente.

A abordagem de um sistema trifásico pode ser feita de forma menos trabalhosa quando se utiliza um diagrama de fasores. As Equações (2)–(4) podem ser obtidas deste diagrama, representados na Figura 2(b), pelas setas coloridas, cujos tamanhos/módulos são iguais às

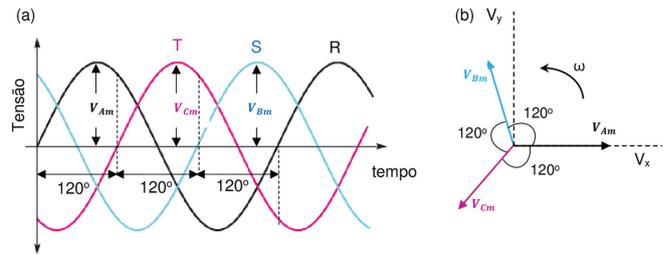


Figura 2: (a) Formas de ondas defasadas em 120°, típicas em um gerador trifásico. (b) Um diagrama fasorial para o sistema em (a). Adaptado de Electrical (2017) [11].

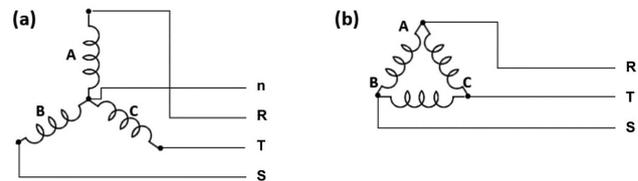


Figura 3: Ligações convencionais em geradores e transformadores de tensão alternada. Em (a) a ligação das bobinas em *Y* e em (b) a ligação em Δ [2].

amplitudes de tensão nas fases *R*, *S* e *T* (compare com a Figura 2(a)). Todos os fasores giram no sentido anti-horário com a mesma frequência angular ω . Verifique, neste diagrama, que a soma fasorial das tensões é nula, resultando no neutro. Nos geradores trifásicos as amplitudes de tensão V_{Am} , V_{Bm} e V_{Cm} tem o mesmo módulo, sendo designadas por amplitude da tensão de fase, V_F . Adicionalmente, a diferença de potencial entre qualquer uma das fases, denominada de tensão de linha, com amplitude V_L , é também uma função que oscila no tempo com a mesma frequência ω , porém com amplitude dada por [10]:

$$V_L = \sqrt{3} V_F. \tag{5}$$

A Equação (5) pode ser obtida pelo módulo da diferença de quaisquer um dos fasores ilustrados na Figura 2(b). Outro tipo de ligação, feita nas bobinas, é a do tipo delta (Δ). Nas Figuras 3(a) e (b) estão ilustradas, para comparação, as ligações do tipo *Y* e Δ , empregadas em geradores trifásicos e transformadores de energia. A ligação do tipo Δ é vantajosa num sistema de distribuição de energia elétrica, por requerer apenas três condutores. Quando necessário, um transformador é utilizado para transformar uma ligação do tipo Δ para outra do tipo *Y*. Neste trabalho, dá-se ênfase apenas a ligação do tipo *Y* e, portanto, a ligação do tipo Δ não será abordada.

As Equações de (2) a (4) podem ser descritas em termos de valores eficazes ou valores médios quadráticos (*Root Mean Square*, RMS) dada por:

$$V^{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}. \tag{6}$$

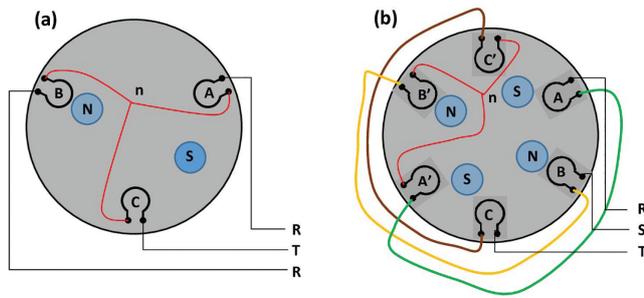


Figura 4: (a) Ilustração de um gerador de dois polos (ímãs em azul) e três bobinas. (b) Gerador de quatro polos e seis bobinas. As bobinas são indicadas pelas letras A, B, C, A', B' e C' e, a ligação entre elas pelas linhas coloridas, é a do tipo estrela.

Em termos de valores eficazes a Equação (5) torna-se:

$$V_L^{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_F^{RMS} \approx 1,73 \cdot V_F^{RMS} \quad (7)$$

No Brasil, nos sistemas de distribuição residencial e comercial, a tensão eficaz de fase utilizada é de $V_F^{RMS} = 127 \text{ V}$, o que equivale a uma tensão de linha de $V_L^{RMS} = 220 \text{ V}$.

2.4. Sistema trifásico com diversas bobinas e ímãs

Em projetos de geradores elétricos, exige-se um sistema com mais ímãs e bobinas ocupando maior parte do rotor e estator, respectivamente, para melhoria na eficiência. Nas Figuras 4(a)–(b) estão ilustrados dois geradores, sendo um de 3 bobinas e 2 polos e o outro de 6 ímãs e 4 polos. Os ímãs foram ilustrados na frente das bobinas, como polos norte, N, e sul, S. A Figura 4(a) é semelhante ao sistema ilustrado na Figura 1 e foi colocada aqui apenas para fins comparativos com o sistema do gerador de 6 bobinas da Figura 4(b). Neste sistema com 6 bobinas, a defasagem geométrica entre elas é de 60° . Para os ímãs a defasagem é de 90° . As linhas coloridas representam uma ligação do tipo Y. A, B, C, A', B' e C' são as bobinas e n, representa o neutro.

Demonstra-se que, através de uma análise comparativa e intuitiva, o sistema da Figura 4(b) é equivalente ao da Figura 4(a) [2]. Nele, a ligação entre as bobinas é realizada da seguinte forma: liga-se as extremidades direita de três bobinas adjacentes (A', B', C'), para a formação do neutro. Pega a extremidade da primeira (C'), salta-se duas bobinas e liga em série com a terceira bobina (C). Desta maneira, as bobinas C e C' na Figura 4(b) fazem o papel de uma única bobina, quando comparado ao sistema ilustrado na Figura 4(a). Destes pares de bobinas saem a fase T. As ligações entre os pares de bobinas A e A' e B e B' são conectadas de forma semelhante ao par C e C', saindo delas as outras duas fases.

Para um sistema com um número maior de bobinas e ímãs a situação descrita anteriormente deve se repetir.

Nesta condição, é conhecida a relação entre o número de bobinas (n_b) e o número de par de polos (n_p) [2]:

$$n_b = 3n_p. \quad (8)$$

Esta relação foi demonstrada experimentalmente no qual construíram-se diversos geradores, variando-se o número de bobinas e o número de pares de polos [2].

3. Materiais Utilizados e Construção

Para a construção do gerador acoplado à bicicleta dispunha-se inicialmente de um sistema montado, no qual o motor de máquina de lavar era girado manualmente, por um sistema mostrado na Figura 5(a). Entretanto, o sistema tornou-se inadequado, quando se desejavam ligar equipamentos de potência mais elevada. O sistema então foi desmontado, para que suas peças pudessem fazer parte do novo sistema, acoplado às partes de uma bicicleta. Na Figura 5(b) tem-se, à esquerda, uma peça retirada do motor da máquina de lavar, cortado em formado circular. Esta peça tem com função sustentar tanto o estator quanto o rotor. Designa-se esta peça como “peça de sustentação”. A peça no meio da Figura 5(b) é o estator. Este é uma peça que contém as bobinas com furos por onde se passam parafusos fixando-a na peça de sustentação. O rotor, à direita, contém os ímãs e um furo maior central. Ele também se encaixa na peça de sustentação, por meio de um eixo central. A peça de sustentação contém um rolamento necessário para fazer o rotor girar. A fixação do estator na peça de sustentação e o encaixe do rotor nela, pode ser visualizado na Figura 5(c).

Nas Figuras que se seguem estão mostradas fotos dos materiais adicionais utilizados na construção do sistema da bicicleta. Na Figura 6(a) estão um banco selim, garfo, barras roscadas, um garfo uma catraca, guidão, parafusos, pedal e arruelas. Na Figura 6(b) estão mostradas uma ampliação dos pedais utilizados, dos punhos para o guidão e as porcas com arruelas para fixação do garfo ao quadro. A abraçadeira com

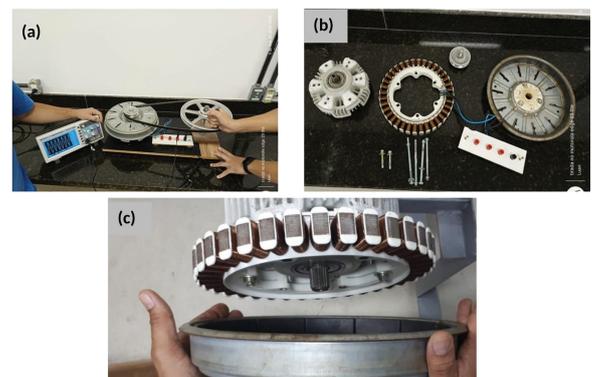


Figura 5: (a) Um sistema no qual o motor de máquina de lavar é utilizado como gerador didático. (b) peças do gerador. (c) Fixação do estator e encaixe do rotor na peça de sustentação.

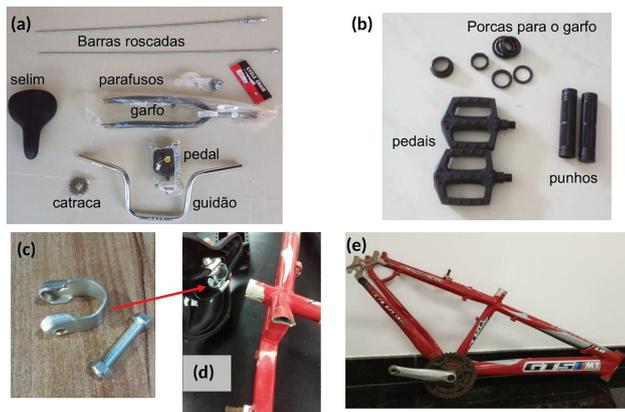


Figura 6: Materiais adicionais de peças de bicicleta utilizados para o sistema do gerador.

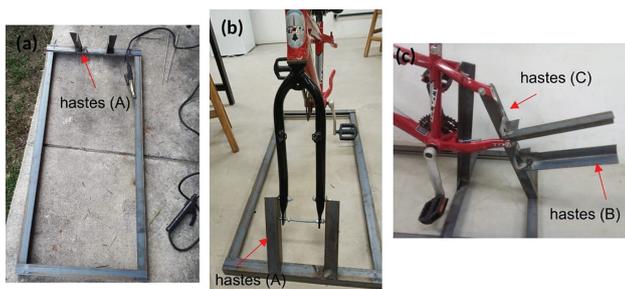


Figura 7: (a) Base retangular utilizada para sustentação das partes da bicicleta. (b) Vista frontal do acoplamento do garfo às hastes (A). (c) Vista lateral das hastes (B) e (C).

parafuso, apresentada na Figura 6(c) foi utilizada no selim, para fixar o mesmo numa parte do quadro da bicicleta, utilizado como assento (Figura 6(d)). O quadro da bicicleta, juntamente com a coroa mostrado na Figura 6(e) foi doado por uma loja de bicicleta. Nele serão colocados, por meio de barras roscadas, parafusos e porcas apropriadas, o guidão, o selim, o garfo, os pedais e o motor de máquina de lavar, que terá a funcionalidade de gerador.

Para que o sistema todo da bicicleta e gerador se mantivesse na posição vertical, foi construído uma base em forma retangular, utilizando cantoneiras de aço comum. Na Figura 7(a) está mostrado a base em cantoneira, já soldada, com dimensões $\approx 1,08 \text{ m} \times 0,49 \text{ m}$. Nesta mesma base, foram soldadas duas hastes (A) no qual o garfo da bicicleta será acoplado. Uma vista frontal do garfo acoplado nestas hastes, já colocado no quadro, pode ser observada na Figura 7(b). Para a fixação do motor de máquina de lavar no quadro da bicicleta, a parte traseira do quadro teve de ser cortada. O corte foi feito utilizando um disco de corte e uma esmerilhadeira. Outro conjunto de hastes (B) foram soldadas à base retangular e foram utilizadas para dar suporte para que o quadro se mantivesse sustento (Figura 7(c)). Uma outra haste (C) foi utilizada como suporte adicional para fixar o quadro da bicicleta à base retangular,



Figura 8: Sistema pintado com tinta para metais e colocado para secar.

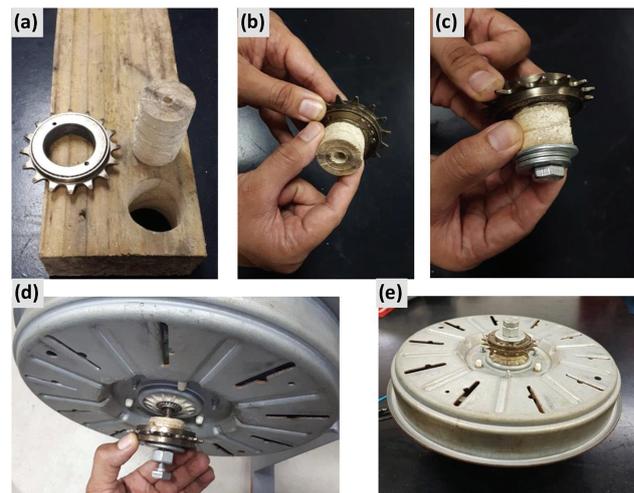


Figura 9: Etapas dos procedimentos utilizados para acoplamento da catraca ao rotor do gerador.

o que possivelmente evita acidentes. As hastes (B) foram utilizadas para acoplar o motor de máquina de lavar no sistema como um todo. Após a montagem dessa parte do sistema, o mesmo foi pintado com tinta para metais, para não mostrar logomarcas e evitar oxidações Figura 8.

Para fazer com que o motor gire e funcione como gerador de energia, quando se pedala na bicicleta, foi necessário construir um sistema no qual a catraca é acoplada ao motor de máquina de lavar. Na Figura 9(a) está mostrado a catraca utilizada e uma peça cilíndrica de madeira com diâmetro $\approx 3,5 \text{ cm}$ e profundidade de $\approx 2,1 \text{ cm}$. Essa peça foi feita cortando-se a madeira com uma serra do tipo copo. Essa peça se encaixa perfeitamente no interior da catraca, conforme mostrado na Figura 9(b). Um furo em seu centro foi feito, com uma broca de numeração $\approx 10 \text{ mm}$, por onde penetrou-se um parafuso com o mesmo diâmetro do furo central, conforme mostrado na Figura 9(c). Este conjunto será acoplado ao rotor do motor de máquina de lavar, como pode ser visto nas Figuras 9(d) e 9(e), desempenhando duas funções: fixar o rotor ao estator e servir como um

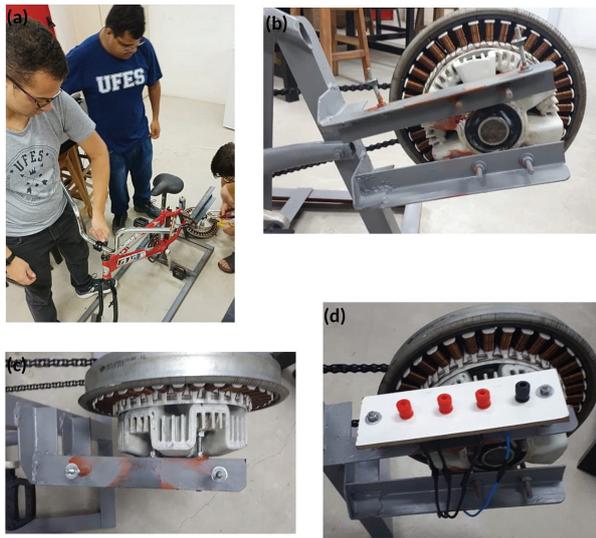


Figura 10: Etapas finais da montagem do sistema: gerador movido pela corrente acoplada à catraca.

“sistema de rodagem” – uma corrente dentada ao passar pela catraca acoplada e pela coroa, fará o rotor girar ao se pedalar a bicicleta.

Na Figura 10(a) é possível observar a equipe trabalhando na etapa final do sistema gerador acoplado à bicicleta. O principal foco dessa parte foi a acoplagem da peça de sustentação às hastes B. Para isto as barras roscadas foram cortadas em quatro pedaços e em tamanhos adequados e inseridos em furos que já haviam na peça de sustentação (Figura 10(b)). Do outro lado, está a corrente que foi passada na catraca. Na Figura 10(c) é possível observar o sistema por uma vista de cima. Outros dois parafusos com arruelas foram utilizados para fixar uma peça de madeira contendo borne. Os bornes, em vermelho, são aqueles nos quais saem três fios do estator (fases *R*, *S* e *T*) e o borne em preto é aquele no qual sai o fio neutro (*n*).

O aparato experimental pronto para demonstrações em aulas lúdicas experimentais e para análise das formas de ondas está mostrado na Figura 11. Um sistema adicional contendo duas Lâmpadas em paralelo e uma tomada fêmea (não mostrados aqui), no qual se podem ligar aparelhos domésticos ou outros, também foi construído. Um de nossos alunos integrantes postou em seu canal no *youtube* o funcionamento deste sistema. Encoraja-se os leitores a ver o funcionamento deste sistema no link:

<https://www.youtube.com/watch?v=mxsWvdSAPmA&t=97s>.

4. Propostas Experimentais

4.1. Análises iniciais

Antes do início da montagem do aparato experimental a equipe analisou o estator e o rotor da máquina de lavar, para a verificação do número de bobinas e o tipo da



Figura 11: Sistema “gerador acoplado a bicicleta”.

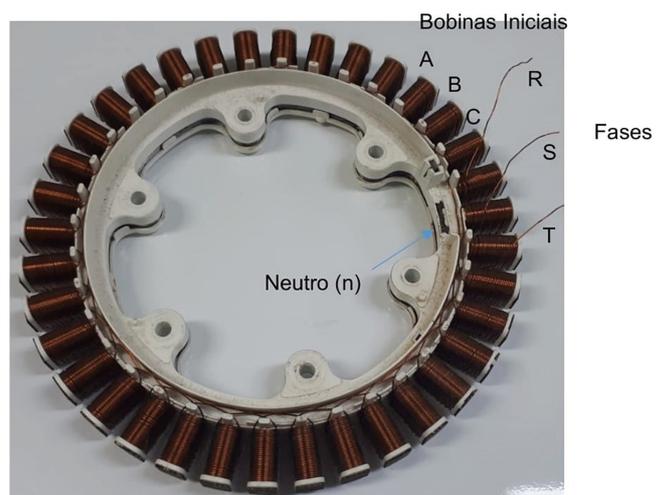


Figura 12: O estator do gerador e indicação das fases e o neutro.

ligação do estator e o número de ímãs no rotor. Por meio da Figura 12 verificou-se que o estator é constituído por 36 bobinas e a ligação é a do tipo estrela, semelhante a apresentada nas seções 2.4 e 2.5. Nesta Figura está indicada as três bobinas iniciais *A*, *B* e *C*, de onde saem as fases *R*, *S*, *T*, respectivamente e do neutro *n*. O neutro é o fio em comum, nos quais se conectam os terminais iniciais das bobinas *A*, *B* e *C*. Como discutido na seção 2.4, o terminal que sai da bobina *A*, por exemplo, é ligado em série com outras bobinas na seguinte forma: saltam-se duas bobinas consecutivas e liga-se com uma terceira bobina e assim por diante, até chegar no terminal designado por fase *R*. A mesma lógica é válida para as demais bobinas e fases.

O rotor está apresentado na Figura 13. A equipe verificou que haviam 12 ímãs igualmente espaçados entre si. Estes são constituídos por uma liga de samário-cobalto, semelhante aos utilizados em alto-falantes. Para uma verificação mais detalhada do número total, *N*, de



Figura 13: O rotor do gerador e uma análise da quantidade de polos com um pequeno ímã de neodímio.

polos que constituem o gerador, utilizou-se um ímã de neodímio em formato circular e passou-se o mesmo próximo a cada ímã do rotor. Através da sensibilidade de forças de atração e repulsão, a equipe verificou que cada “aparente ímã” no gerador possui “quatro polos” – sendo na verdade dois ímãs, cada um com dois polos – e que o número total de polos no rotor é de $N = 4 \times 12 = 48$ polos. Conseqüentemente o número de pares de polos é: $n_p = 24$. Trata-se de um sistema constituído por 36 bobinas e 24 pares de polos, o que não segue à risca, a Equação (8). De acordo com essa equação, o número de pares de polos era para ser de:

$$36 \text{ bobinas} = 3.n_p, \tag{9}$$

$$n_p = 12,$$

entretanto, n_p foi duplicado. Por meio de uma análise qualitativa, a equipe verificou que duplicar, neste contexto, o número de pares de polos, não alterará as condições de funcionamento do gerador podendo, entretanto, alterar sua frequência elétrica e a eficiência do mesmo. Como exemplo e, por uma analogia com o sistema da Figura 5(a), duplicar o n_p não altera a análise intuitiva feita sobre o funcionamento do gerador. Para se verificar uma equação que relaciona n_b com n_p , utiliza-se a Equação (8) no qual se obtém a seguinte relação:

$$\frac{n_b}{n_p} = 3. \tag{10}$$

Se o número de pares de polos é duplicado, então esta relação passa a ser:

$$\frac{n_b}{n_p} = \frac{3}{2}, \tag{11}$$

e portanto:

$$2n_b = 3n_p, \tag{12}$$

com n_b múltiplo de 3. Esta relação também foi utilizada por Nardini et al. (2017) [12].

O número de pares de polos será verificado por análise gráfica, conforme os procedimentos experimentais que serão demonstrados na próxima seção.

4.2. Frequência elétrica, frequência mecânica e o número de polos

Para a verificação da relação entre a frequência elétrica (F_{el}), a frequência de rotação mecânica (F_m) e o número de pares de polos (n_p) foi realizada a montagem experimental apresentada nas Figuras 14(a). Foi utilizado um tacômetro digital a laser, modelo Minipa MDT 2244B para a medição de F_m , e um osciloscópio modelo Minipa MO 2000 para a medição de F_{el} . Nesta etapa experimental foi necessário envolver a carcaça externa do rotor com papel preto (Figura 14(b)). Neste papel foi passado uma fita adesiva de cor branca. Quando a fita passa pelo laser emitido do tacômetro, ela reflete a luz e contabiliza um dado valor de rotação. A F_m foi medida em unidades de RPM e posteriormente convertida para Hz. Os dados foram obtidos simultaneamente pela equipe, por filmagem utilizando um celular. Na Figura 14(c) está mostrado como a medida foi realizada. Constatou-se que o papel em vermelho não levou a resultados satisfatórios, sendo o preto mais eficiente para tais medições.

O resultado das medições da F_{el} em função de F_m está demonstrado por meio do gráfico na Figura 15, que sugere um comportamento tipo linear. Por meio de um ajuste seguindo este comportamento, reta em azul, verifica-se para esta, uma inclinação de $\alpha = 24, 2 \pm 0, 7$. De acordo com a Equação (1) apresentada na seção 2.1, este valor representa justamente o número de pares de polos do gerador. Além disto, confirma-se por meio

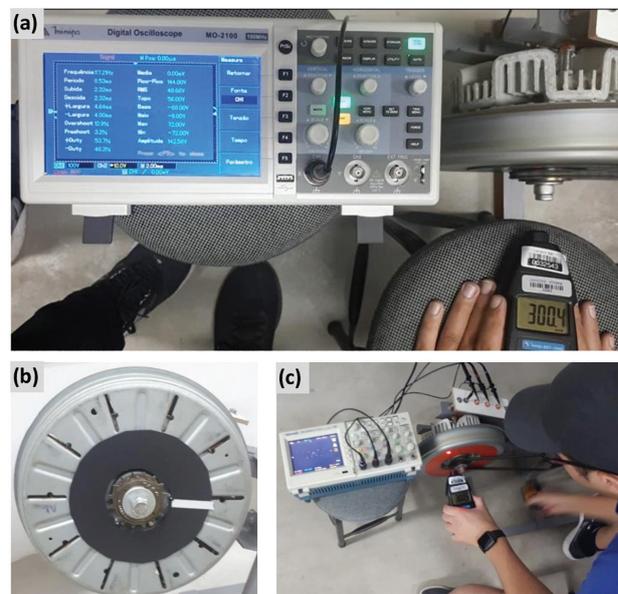


Figura 14: Montagem experimental para a verificação da relação entre a F_{el} , F_m e n_p .

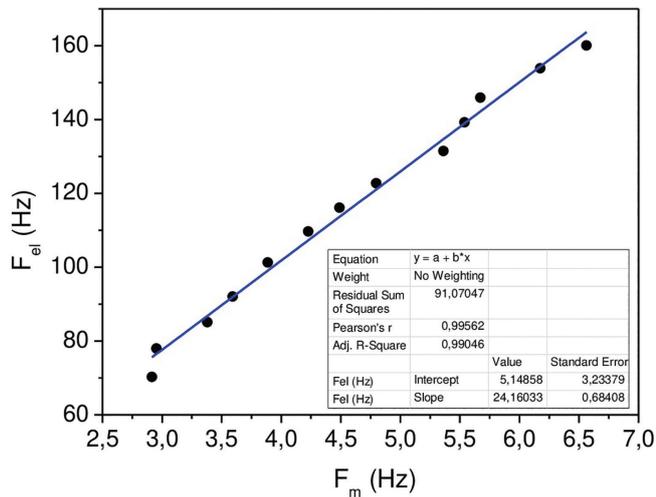


Figura 15: Comportamento da F_{el} com a F_m .

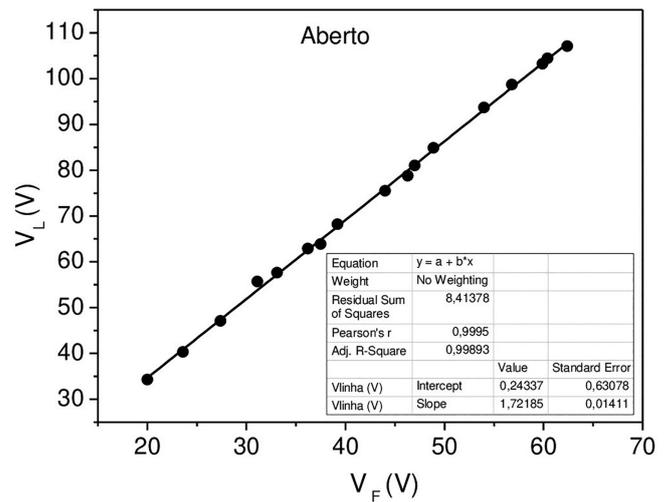


Figura 17: Relação entre V_L e V_F com o gerador em (a) aberto e (b) em carga.

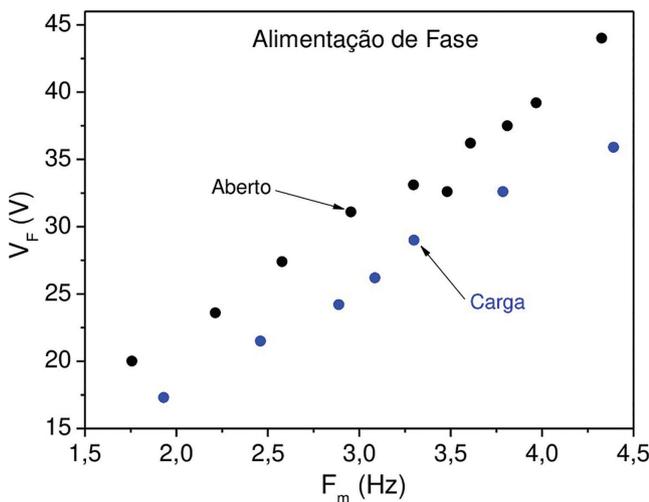


Figura 16: Comparações de medições de tensão. Os pontos em preto representam as medições realizadas com o gerador aberto enquanto os pontos em azul o gerador foi conectado em carga.

deste gráfico a análise realizada utilizando um ímã de neodímio, para a contabilização do número de polos/pares de polos no rotor, de acordo com o descrito na seção 4.1.

4.3. Análise das tensões geradas

A montagem experimental apresentada na Figura 16 da seção anterior permite também a obtenção de valores eficazes de tensão. Optou-se pela medição com multímetros tipo *true RMS*, pela facilidade da obtenção de dados. Foram realizadas medições com o gerador em aberto (Fases *R*, *S* e *T* desconectadas da carga) e o gerador em carga: alimentando um liquidificador e uma lâmpada incandescente. As medições foram feitas na ligação de fase, ou seja, entre uma fase e um neutro. Observou-se que o gerador em carga gerava energia suficiente para manter

o liquidificador em excelente funcionamento, enquanto a luminescência da lâmpada era parcial. Constatou-se que os valores de tensão em aberto são superiores, quando comparados com os valores de tensão em carga. Isto ocorre pois no gerador em carga existem quedas de tensão devido à resistência ôhmica e reatância indutiva interna. A reatância indutiva existe por se tratar de um sistema de tensão alternada com indutores internos nas bobinas do estator [7, 8].

De acordo com a Equação (5) da seção 2.3 a relação entre V_L e V_F é dada por $V_L = \sqrt{3} V_F$. Para se averiguar esta relação, plotou-se gráficos de V_L em função de V_F , para o gerador em aberto (Figura 17). Observa-se que para um ajuste linear, o valor da inclinação da reta foi de $1,72 \pm 0,01$, que aproximadamente igual a $\sqrt{3}$, o que corrobora com a teoria.

5. Um Breve Estudo Sobre a Potência do Gerador

Para o estudo da Potência (P) do gerador, deve-se levar em consideração que as tensão e a correntes fornecida a uma carga é do tipo alternada. Neste caso, há três tipos de potências a serem tratadas: (i) Potência Aparente (P_{Apa}), (ii) Potência Média ou Ativa (P_{Ati}) e (iii) Potência Reativa (P_{Rea}) [13]. A potência aparente, está relacionada com a energia média total por unidade de tempo, fornecida pelo gerador a uma determinada carga elétrica. Para cargas que contenham resistores, capacitores e indutores, parte dessa potência é transformada em potência útil, trabalho, no qual se associa à P_{Ati} . A parte restante é transformada em uma potência não útil, que oscila entre a carga e o gerador, e no qual se associa à P_{Rea} [13].

As potências supracitadas podem ser representadas em um triângulo retângulo, denominado de triângulo das potências [13]. Sendo θ o ângulo entre P_{Ati} e P_{Apa} ,

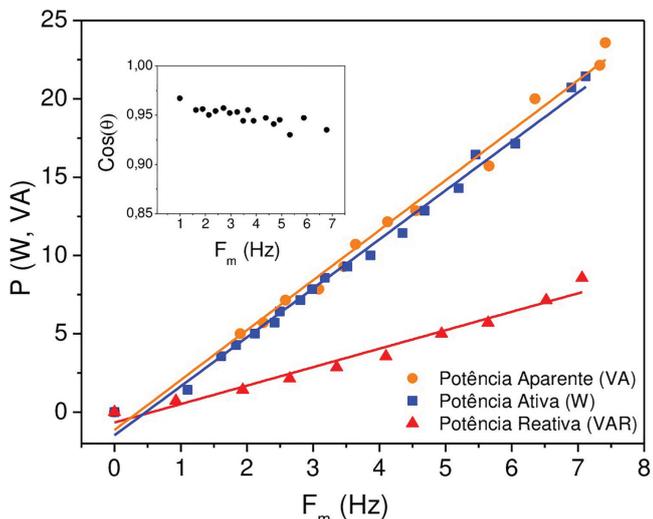


Figura 18: Relações entre P_{Apa} , P_{Ati} e P_{Rea} e a F_m . O gráfico menor à esquerda representa a relação entre $\cos\theta$ e a F_m .

o fator de potência ($\cos\theta$), neste triângulo, representa a razão P_{Ati}/P_{Apa} . As seguintes equações podem ser obtidas por meio deste triângulo:

$$P_{Ati} = P_{Apa}\cos\theta, \tag{13}$$

$$P_{Rea} = P_{Apa}\sin\theta, \tag{14}$$

$$P_{Apa}^2 = P_{Ati}^2 + P_{Rea}^2. \tag{15}$$

As empresas que trabalham com a distribuição da energia elétrica, requerem que o conjunto de equipamentos elétricos, em uma instalação, trabalhe com $\cos\theta$ o mais próximo possível de 1. Isto é necessário para que se possa aproveitar o máximo possível da energia entregue pela rede elétrica.

Neste trabalho, as potências foram medidas com o uso de um wattímetro, com precisão baixa para o experimento e igual a 10 W. Por isso, neste momento, trabalha-se com valores aproximados. Na Figura 18 estão representadas as relações entre as potências medidas com a frequência de rotação mecânica do gerador, F_m , quando o mesmo alimenta apenas um liquidificador. Este, por sua construção, possui cargas resistivas, indutivas e capacitivas. Para se gerar valores de tensão maiores, o liquidificador foi conectado em duas fases. As curvas se diferem por cores e símbolos e as unidades de medição são distintas, para se diferenciar um tipo de potência da outra. Define-se que P_{Apa} é medida em unidades de VA; P_{Ati} é medida em unidades W (Watts); e P_{Rea} , é medida em unidades de VAR (Volt Ampère Reativo) [13].

Observa-se que nas regiões de F_m 's medidas (0–7,5 Hz), as potências do tipo P_{Apa} e P_{Ati} são muito próximas e ambas possuem inclinações semelhantes, da ordem de 3,2 (VA, W)/Hz. Por outro lado, P_{Rea} está mais abaixo no gráfico e com uma variação com a F_m da ordem de 1,2 VAR/Hz. Os valores máximos de P_{Ati} e

P_{Rea} , são da ordem de 22 W e 8 W, respectivamente, para $F_m \approx 7$ Hz. Isto corresponde a uma frequência elétrica, $F_{el} \approx 168$ Hz e uma tensão de linha, $V_L \approx 48$ V. A F_{el} de trabalho está bem acima de 60 Hz, comumente empregados nos equipamentos elétricos. No caso de máquinas indutivas como o liquidificador, isso pode diminuir seu desempenho, devido ao aumento da reatância indutiva com a frequência. Um indicativo que pode corroborar com essa afirmação é a relação entre $\cos\theta$ e a F_m , apresentado no canto à esquerda da Figura 18. O mesmo tem um ligeiro decréscimo para a faixa de F_m 's medidas, indicando um menor consumo de potência útil pelo liquidificador. Entretanto, faz-se necessário um estudo mais detalhado sobre essa afirmação, o que foge do escopo desse trabalho.

6. Proposta de Atividade Experimental para o Ensino Médio

A proposta didática experimental realizada neste trabalho teve como finalidade trazer o contato do aluno com um experimento que tem aplicação no mundo real, tornando a Física mais próxima de seu cotidiano. Com esta proposta, foi possível desenvolver, com o aluno, habilidades de manuseio de equipamentos de medição, como o osciloscópio, o multímetro e diversas ferramentas utilizadas na fabricação do gerador, tornando possível analisar conceitos da teoria na prática. A proposta de aula experimental foi do tipo expositiva e interativa, feita com um grupo de alunos do IFES – Campus São Mateus, ES, conduzida por três bolsistas da UFES e supervisionada pelo professor orientador. Os alunos do IFES fazem parte de um projeto de Iniciação Científica Júnior IC-Jr, como mencionado na introdução deste trabalho.

Como mostrado na Figura 19(a) os alunos tiveram um primeiro momento de interação com a “bicicleta que gera energia elétrica”, podendo pedalar e observar uma lâmpada incandescente e um liquidificador em funcionamento. Posteriormente, como mostrado na ampliação da Figura 19(b) (canto superior direito) eles observaram e realizaram medições provenientes das três ondas tipo senoidais formadas no osciloscópio.

É importante dizer que os estudantes ficaram surpresos com o funcionamento da lâmpada e do liquidificar



Figura 19: Interação dos alunos com “a bicicleta que gera energia elétrica trifásica”.

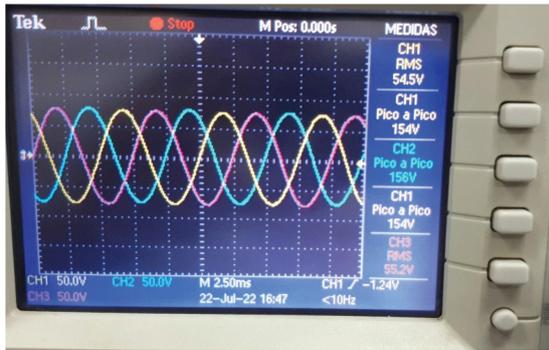


Figura 20: As três formas de onda de ondas do gerador com o fundo de escala determinado. O gerador está com a função stop ativada.

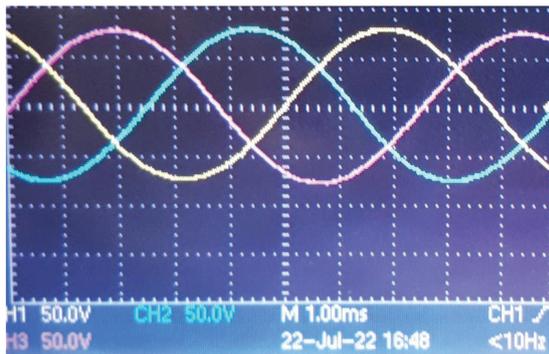


Figura 21: Ampliação da Figura 21 utilizando os botões de escala horizontal do osciloscópio.

e que de certa forma, ficaram entusiasmados. Isso é importante, sendo o que também se busca em um experimento didático para demonstrações. Nas análises das ondas tipo senoidais foi utilizada a função *stop* no osciloscópio, para que as ondas fossem analisadas de forma estável, como mostrado na Figura 20. Dentre as atividades práticas realizadas, para uma dada rotação do gerador, estão: (i) obtenção da frequência, (ii) obtenção da tensão eficaz a partir das amplitudes das tensões de onda (V_m) (Equação (6)), (iii) relação entre as tensões eficazes de linha (V_L^{RMS}) e fase (V_F^{RMS}) (Equação (7)) e (iv) obtenção da defasagem entre as fases do gerador (Equações (2), (3) ou (4)). Todas essas atividades foram realizadas em um total de duas aulas, com aproximadamente 40 minutos de duração.

Para uma melhor obtenção de dados foi realizada uma ampliação desta imagem diretamente na tela do osciloscópio (Figura 21). As amplitudes de tensão (V_m) foram obtidas diretamente das escalas verticais (canto inferior esquerdo) marcando CH 50.0 V. Da escala horizontal (na parte inferior da Figura), marcando 1,00 ms, foi possível obter o período e a frequência.

Ao se examinar a Figura 20 os estudantes obtiveram de início a frequência das ondas que é dado por:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (16)$$

no qual T foi obtido contando-se a escala menor na horizontal. Foi possível obter $T \approx 7,5$ ms e $f \approx 133,3$ Hz. Os estudantes também observaram que a amplitude de tensão medida é a mesma para todas as fases e valem $V_m \approx 79$ V. Utilizando a Equação (6) eles obtiveram $V_{RMS} = 79/\sqrt{2} \approx 55,9$ V. O valor difere de aproximadamente 1 V (veja o canto superior direito da Figura 20 em CH1 RMS) e está dentro da precisão do instrumento.

A relação entre V_L^{RMS} e V_F^{RMS} foram obtidas com o uso de dois multímetros do mesmo modelo. Obteve-se $V_L^{RMS} \approx 95,2$ V e $V_F^{RMS} \approx 55,3$ V. A razão entre essas grandezas deve, de acordo com a Equação (7), deve ser de $\sqrt{3}$. O valor de obtido de 1,72 se aproximou muito do esperado, sendo um resultado bastante satisfatório. Enfim a defasagem (Φ) entre as ondas foi obtida diretamente da Figura 20, analisando-se a proporcionalidade entre a diferença de fase e o período [2]. Os estudantes mediram na tela do osciloscópio, uma diferença de fase de 2,5 ms (veja as curvas em amarela e magenta). Por outro lado, foi medido o período de $T = 7,5$ ms (parágrafo anterior), que corresponde a um ângulo de fase de 360° . Utilizando-se uma regra de três simples, tem-se:

$$\begin{array}{ll} 7,5 \text{ ms} & 360^\circ \\ 2,5 \text{ ms} & \Phi. \end{array}$$

Resolvendo, obtém-se $\Phi = 120^\circ$, que confirmam experimentalmente as teorias colocadas na seção 2.3 sobre a defasagem das tensões em cada fase do sistema.

7. Considerações Finais

O estudante ao analisar a geração de energia elétrica, por meio do experimento aqui proposto, adquire a consciência de que o ensino do eletromagnetismo é um processo importante e interessante para a sociedade. De fato, constata-se que o ensino por meio de práticas experimentais passa a dar um significado mais realista daquilo que se presencia no dia a dia e contribui com uma formação crítica de tudo que o ensino possibilita aos estudantes. Por meio do aparato experimental aqui apresentado, os estudantes podem aprender sobre diversos assuntos: lei de Faraday, sistema de geradores trifásicos (forma intuitiva), corrente alternada, eletromagnetismo e cotidiano. Além disto desenvolvem habilidades na construção de experimentos, o que estimula suas criatividade.

Utilizou-se para o experimento proposto, peças de um motor de máquina de lavar para construir um “potente” gerador, capaz de ligar diversos equipamentos. Isto desperta muito a curiosidade de quem observa o experimento em funcionamento. Para se aumentar a capacidade de girar o rotor do gerador, utilizou-se também partes de uma bicicleta, em um sistema prático que foi denominado de “gerador acoplado à bicicleta”. Por esse fato, o experimento também tem o caráter de sustentável por utilizar-se de diversas peças

“sucateadas”. Por outro lado, embora não se tenha construído as etapas de bobinagem do estator e inclusão de ímãs no sistema, foi realizada toda uma investigação experimental e comparando com um sistema teórico foi possível entender a sistemática das ligações entre bobinas e os ímãs alocados no rotor. Realizou-se diversas medições nos quais provaram-se as teorias levantadas neste trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem FAPES e a Prograd/Pró-Ensino – UFES, pela concessão de bolsas de estudos e promoção da ciência, tecnologia e inovação no Estado do Espírito Santo.

Referências

- [1] B. Neto, M. Rangel e P.C. M. Carvalho, *Geração de Energia Elétrica: fundamentos* (Érica, São Paulo, 2012), 1 ed, v. 1.
- [2] A.L. Alves, Y.B.M. Motta e A.C.B. Zancanella, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **37**, 879 (2020).
- [3] R.A. Mion e J.A.P. Angotti, em: *IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física* (Jaboticatubas, 2004).
- [4] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. PCN+ Ensino Médio – Orientações Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias. Ministério da Educação. Brasília, 2002. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/arquivos/PCN_FIS.pdf
- [5] A.L. Alves, D.M. Santana, C.P. Machado, K.A. Littike, M.S. Pessoa e P.S. Moscon, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20210379 (2022).
- [6] T.A.C. Maia, *Projeto e construção de um gerador a ímãs permanentes de fluxo axial para turbina eólica de pequena potência*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, (2001).
- [7] G. Carvalho, *Máquinas Elétricas: Teoria e Ensaio* (Érica, São Paulo, 2011), 1 ed, v. 1.
- [8] S. D. Umans, *Máquinas elétricas* (AMG, Porto Alegre, 2007), 7 ed, v. 1.
- [9] H. Sette, *Technical Report Vantagens do Sistema Trifásico*, disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288833882_Vantagens_do_Sistema_Trifasico, acessado em 21/12/2022.
- [10] G.T. Azevedo, C.J.T. Peixoto, F.F. Bargas e C.R. Menegatti, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e3503 (2017).
- [11] <https://www.electricalibrary.com/2020/09/18/por-qu-e-o-sistema-e-trifasico/>, acessado em 16/10/2022.
- [12] M. Nardini, R.A. Pereira, L. A, *Revista Brasil Engenharia* **635**, 88 (2017).
- [13] O. Markus, *Circuitos Elétricos* (Érica, São Paulo, 2001), 1 ed, v. 1.