

Controlador de Carga para Gerador Síncrono Acoplado à Bicicletas Ergométricas

Rodrigo Buroni Machado

Engenharia de Energia

Universidade Federal do PAMPA

Bagé, Brasil

rodrigoburoni.aluno@unipampa.edu.br

Jocemar Biasi Parizzi

Engenharia de Energia

Universidade Federal do PAMPA

Bagé, Brasil

jocemarparizzi@unipampa.edu.br

Carlos Sonier Cardoso do Nascimento

Engenharia de Energia

Universidade Federal do PAMPA

Bagé, Brasil

carlosnascimento@unipampa.edu.br

Abstract—Em bicicletas ergométricas toda a energia imposta pelo usuário é transformada em calor e ruído, e nada mais. A possibilidade do uso de bicicletas ergométricas para geração de energia elétrica é comprovada na literatura, entretanto os procedimentos adotados alteraram o funcionamento convencional do equipamento. Neste presente trabalho utilizou-se um gerador síncrono trifásico de ímãs permanentes acoplado a uma bicicleta convencional, e conversores estáticos (retificador e *BUCK*) para administrar a energia que é direcionada para uma carga resistiva. Objetiva-se viabilizar a geração de energia através de bicicletas ergométricas sem afetar seu comportamento padrão, além de propor um outro modo de operação que busca o ponto de máxima potência do usuário, através da técnica de perturbar e observar. Mediante ensaios, comprova-se que o sistema replicou com confiabilidade a operação costumeira da bicicleta, e obteve-se dados respectivos ao comportamento da potência de saída do gerador de acordo com a velocidade na entrada e a variação da carga. Ademais, o novo modo mostrou-se promissor mediante os resultados dos ensaios, encontrando recorrentemente o ponto de máxima potência, que demonstra a atuação correta do buscador. Este controlador alicerça os pilares para novos métodos de operação que se adéquem mais às vontades do usuário, sem perder o modo convencional.

Index Terms—Bicicleta ergométrica, Controlador de carga, Conversor CC/CC, Conversor estático, Gerador síncrono

I. INTRODUÇÃO

Desde 2012, através da resolução normativa da ANEEL RN 482/2012, é possível que unidades consumidoras gerem energia a partir de fontes renováveis ou cogeração [1]. Com isso, iniciou-se um processo de descentralização da geração de energia no país.

Este cenário trouxe diversos desafios sobre o controle e manutenção do Sistema Elétrico Nacional (SIN) e traz consigo a possibilidade do aproveitamento de pequenas fontes de energia que normalmente passariam despercebidas quando comparadas às grandes centrais de geração [2].

As bicicletas ergométricas, por exemplo, são equipamentos que simulam o uso de uma bicicleta convencional, porém, ao invés da energia imposta ser transformada em deslocamento, esta é apenas dissipada. Isto é, toda a energia vinda desta fonte é desperdiçada.

Sabe-se que este equipamento traz vantagens quanto à ergonomia e controle da carga no pedal, então por que não adicionar mais um item à lista? *Gerar energia*. Ao acoplar

um gerador em uma bicicleta ergométrica está torna-se uma pequena fonte renovável de energia elétrica.

II. CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO

A literatura nos mostra a viabilidade da geração de energia através de bicicletas ergométricas [3], [4], [5], [6], [7] e [8], contudo as diferentes abordagens encontradas partem de um pressuposto de operação diferente do convencional, entenda-se por convencional o ajuste de carga puramente pelo usuário.

A partir da percepção destes diferentes contextos, este trabalho tem por objetivo descrever o desenvolvimento de um controlador de carga que permita a geração de energia elétrica a partir de bicicletas ergométricas sem afetar o seu funcionamento convencional, além de propor uma otimização automática da seleção de carga, utilizando a técnica de *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* através do método perturbe e observa [9].

A fim de concretizar este objetivo utilizou-se do método *Plan, Do, Check, Act (PDCA)* para o desenvolvimento físico do controlador e posteriormente do algoritmo, cuja união destes resulta no controlador de carga.

Para a realização deste trabalho, utilizou-se um gerador síncrono de ímãs permanentes acoplado a uma bicicleta convencional apoiada em suportes de metal, denominara-se o conjunto como *mecanismo primário* (Fig. 1) e este será a planta para qual o controlador foi projetado.

Iniciou-se com o levantamento dos parâmetros elétricos do gerador, pois este não possui dados de placa ou código gravado em sua carcaça que permita determinar suas características. Com estas informações focou-se na conversando da tensão CA nos terminais do gerador para tensão CC (retificador de 6 pulsos), impondo uma carga mínima para o gerador e em seguida utilizar um conversor rebaixador (*BUCK*) para controlar a tensão imposta na *DumpLoad*, assim manipulando a percepção de carga do gerador.

Espera-se que o controlador de carga no modo convencional ajuste a carga de acordo com o valor imposto pelo usuário na interface homem máquina (IHM), e que não se altere sem que haja mudança nos parâmetro da IHM. E que no modo MPPT, o sistema não estabilize a carga, mantendo pequenas alterações buscando um ponto de melhor potência.



Fig. 1. Visão geral do mecanismo primário.

Em grande parte das academias, se não em todas, as bicicletas ergométricas estão presentes. Com o intuito de promover a geração de energia elétrica por este meio, é necessária a aceitação dos usuários.

Partir de um equipamento com modos de treinos avançados e derivados, é plausível supor uma resistência ao uso. Contudo, se o funcionamento continuar igual, e apenas mudar a aparência do equipamento do ponto de vista do usuário, é presumível assumir que sua aceitação ocorrerá mais rapidamente.

A fim de manter o princípio de operação de bicicletas ergométricas e transformar a energia mecânica em elétrica, necessita-se de um sistema capaz de alterar a carga apenas a partir de comandos providos do usuário, chamar-se-á esta operação de *modo 0*. Ao se lograr implementar modo 0 pode-se propor outros modos de operação, como o que será aqui proposto de *MPPT*.

Na planta obtida para este trabalho utilizou-se um gerador síncrono trifásico de ímãs permanentes cujas características elétricas são desconhecidas, gerando a necessidade de executar ensaios para levantar seus parâmetros.

Nestes ensaios determinou-se a relação entre velocidade de rotação e a tensão nos terminais do gerador. Destes ensaios obteve-se os dados iniciais para o controlador desenvolvido.

A relação obtida, representada na Fig. 2, comporta-se como esperado segundo a literatura, mais especificamente (1). [10]

$$E_a = K_2 \times \omega_m \quad (1)$$

Onde E_a é a tensão nos terminais do gerador, ω_m é a velocidade angular e K_2 é uma constante respectiva a critérios construtivos do gerador e ao fluxo. Assumindo que a potência

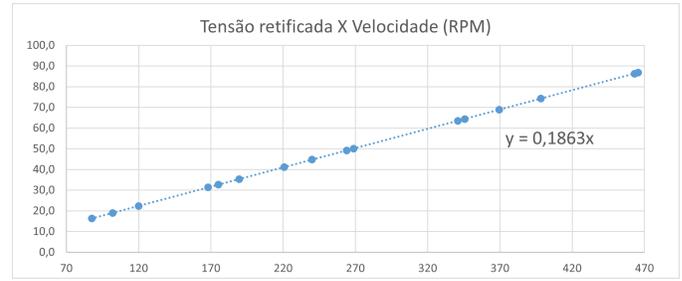


Fig. 2. Gráfico demonstrativo da relação obtida entre velocidade (RPM) e tensão (V) do gerador.

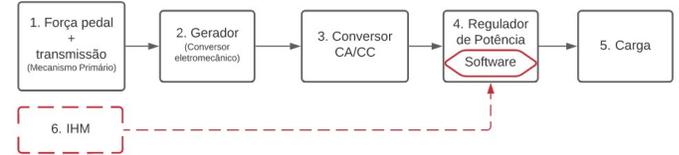


Fig. 3. Diagrama do projeto.

mecânica é igual a elétrica ($P_m = P_e$), pode-se manipular a (1) encontrando (2)

$$\tau = K_2 \times I_a \quad (2)$$

Onde τ é o conjugado mecânico aplicado no gerador, e I_a a corrente na armadura do gerador. Os ensaios no modo um, que serão posteriormente explanados, basearam-se nas relações presentes em (1) e (2).

Após a obtenção destes quesitos referentes ao gerador, foi possível iniciar o desenvolvimento da parte física do controlador, e posteriormente o algoritmo.

III. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR

A fim de controlar a demanda de potência do gerador, primeiramente elaborou-se o diagrama do projeto presente na Fig. 3, onde:

- “Força pedal + transmissão” (Mecanismo Primário): É a potência de entrada no eixo do gerador, engloba a parte física da bicicleta ergométrica, assim como a transmissão da potência do pedal para o eixo do gerador.
- “Gerador”: Responsável por realizar a conversão eletromecânica, ou seja, de energia mecânica para elétrica.
- “Conversor CA/CC” (Retificador - Barramento de tensão CC): Deverá retificar a tensão de saída do gerador em corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC), assim como amenizar as variações nos níveis de tensão.
- “Regulador de Potência”: Este tem como função administrar a demanda de potência do sistema tendo dois modos de operação, o *CONVENCIONAL* (modo 0) e *MPPT* (modo 1).
 - Modo 0: Simula uma bicicleta ergométrica convencional, onde o usuário seleciona a carga que será

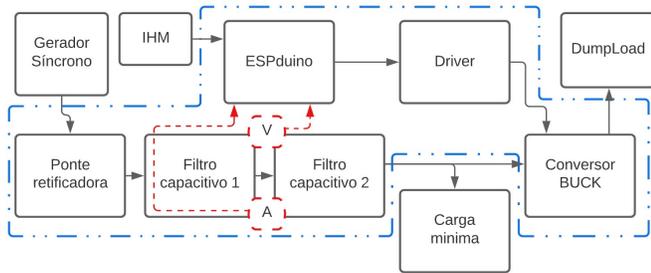


Fig. 4. Diagrama de blocos do controlador.

aplicada ao gerador diretamente. Podendo variar de 0 a 100%.

- Modo 1: Seleciona a carga de forma automática de acordo com o que o usuário está dispondo na entrada, constantemente mudando o nível de carga buscando o ponto onde o usuário dispõe a maior potência.

- “Carga”: Destino da energia provida pelo gerador, consiste em um *dumpload*.
- “IHM” (Interface Homem Máquina): Caracteriza a ponte entre o controle e o usuário, onde pode ser selecionado o modo de operação e o nível de carga para o modo 0.

O controlador de carga propriamente dito engloba os estágios 3 e 4 da Fig. 3, quanto ao conversor CA/CC optou-se pelo retificador de 6 pulsos com filtro capacitivo e como regulador a potência o conversor CC/CC *BUCK*.

Para definir a carga que seria utilizada realizaram-se testes com diversas cargas resistivas diferentes, englobando valores entre $1,5\Omega$ até 128Ω , resultando em uma carga mínima para o sistema de 70Ω e como carga principal (*dumpload*) um arranjo de resistências que resulta em aproximadamente $1,5\Omega$.

Com os valores de carga definidos, foi possível projetar o conversor *BUCK*, encontrando valores de indutância e capacitância mínimos a serem utilizados, sendo eles $212,3\mu H$ e $66\mu F$, respectivamente. Quanto as requisitos do retificador, a tensão máxima reversa dos diodos utilizados é significativamente superior a tensão encontrada nos ensaios, pois não necessariamente a tensão máxima que um usuário pode impor para o gerador foi alcançada.

Ao completar a etapa do dimensionamento dos componentes, realizou-se um esquema de blocos mais detalhado do controlador que pode ser analisado na Fig. 4, dentro do perímetro tracejado com pontos estão contidos as subseções do controlador de carga. Este diagrama abrange a posição dos sensores, blocos tracejados em vermelho, que hei de prover as medidas necessárias para a operação no modo 1. Além de contemplar a seção responsável pelo processamento destes dados (ESPduino, com o microprocessador ESP32) e a interface entre o controle e o chaveamento do conversor (Driver).

A IHM (Interface Homem Máquina) presente na Fig. 4, é onde o usuário interage com o controle, optando pelo modo de operação e carga no caso do modo 0.

Isto conclui momentaneamente o quesito dos aspectos

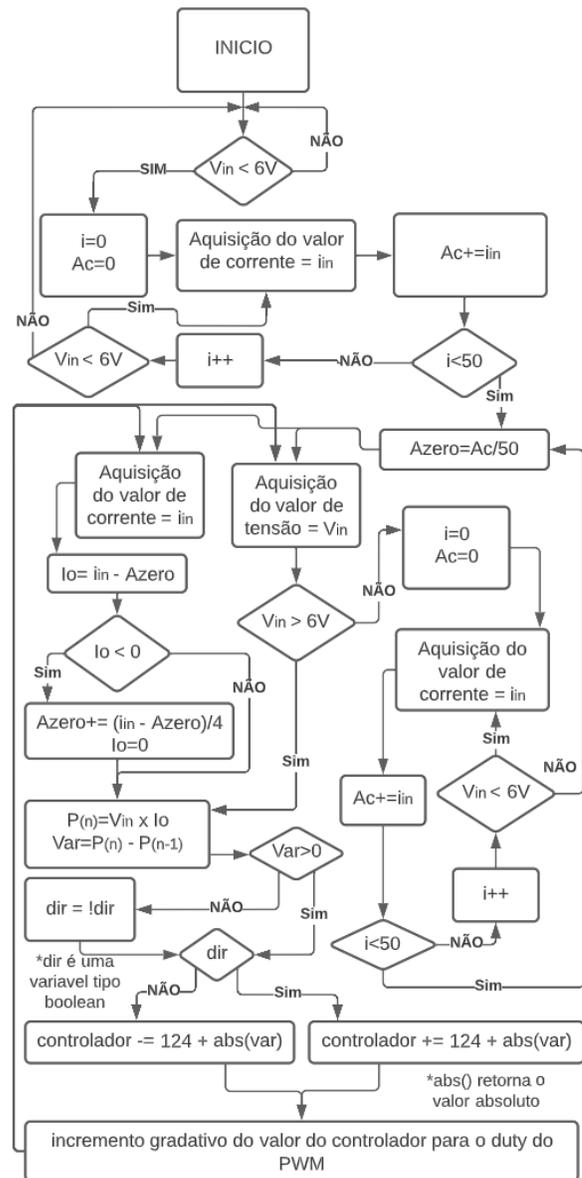


Fig. 5. Lógica MPPT implementada.

físicos, voltando a ele apenas se durante o desenvolvimento do algoritmo detectar-se necessidade. No que se diz respeito ao algoritmo criado, utilizou-se a plataforma Arduino IDE para implementação do código que foi introduzido no ESPduino.

Primeiramente, houve o implemento do modo 0, que consistiu em ajustar a razão de trabalho do conversor *BUCK* conforme determinado pelo usuário na IHM. Posteriormente, elaborou-se o modo 1, onde a lógica implementada pode ser analisada na Fig. 5.

IV. RESULTADOS

Com a intenção de verificar se os modos estavam operando de maneira satisfatória, executaram-se ensaios de operação em ambos os modos. No modo 0, esperava-se que o sistema apenas alterasse a carga quando solicitado pelo usuário, o

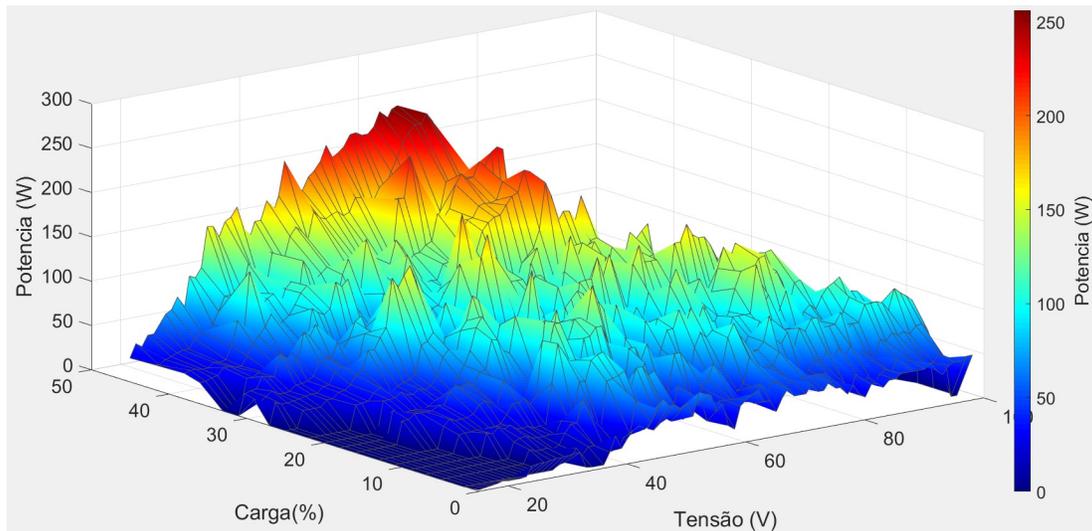


Fig. 6. Superfície de potência (W) x tensão (V) x carga(%).

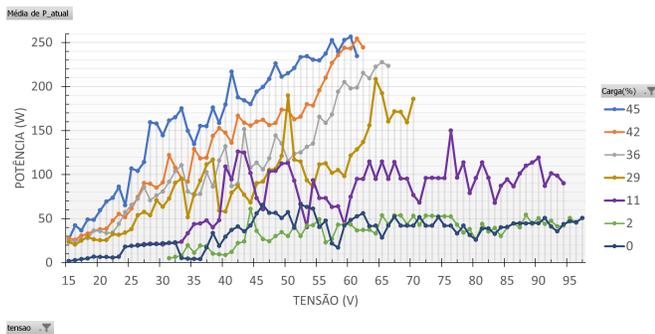


Fig. 7. Gráfico de potência (W) x tensão (V) para diferentes carga(%).

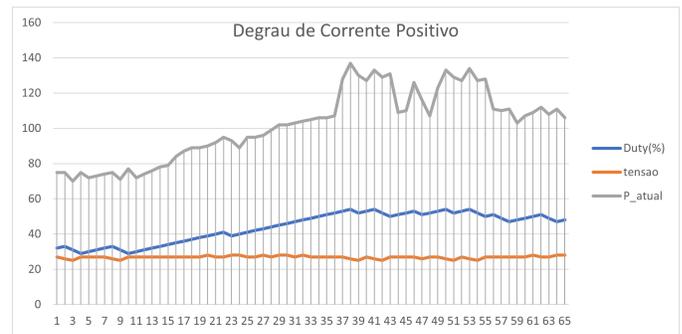


Fig. 8. Comportamento do sistema ao degrau positivo de tensão.

ensaio consistiu em utilizar a bicicleta adaptada e monitorar a variação da carga. Neste quesito o sistema operou como o previsto.

Além disso, dos ensaios no modo convencional também obteve-se a superfície presente na Fig. 6, na qual pode-se observar que a reação do usuário na disponibilidade de potência perante a variação de carga e velocidade de rotação (tensão) assemelha-se a uma montanha. Este comportamento justifica a necessidade da técnica de MPPT. Neste caso ponto de máxima potência encontra-se em 63V e 45% de carga, como pode ser observado na superfície (Fig. 6) e no gráfico presente na Fig. 7.

Tendo em vista o comportamento encontrado, formou-se a lógica de MPPT previamente apresentada (Fig. 5), e para efetuar os ensaios para este modo submeteu-se o sistema a degraus positivos e negativos de tensão e corrente. O que segundo a (1) e (2), é equivalente a aplicar degraus de velocidade e conjugado no gerador.

O comportamento resultante nos ensaios de degrau podem ser analisados na Fig. 8 e Fig. 9, nas quais pode-se perceber que o sistema altera a carga em busca da maior potência

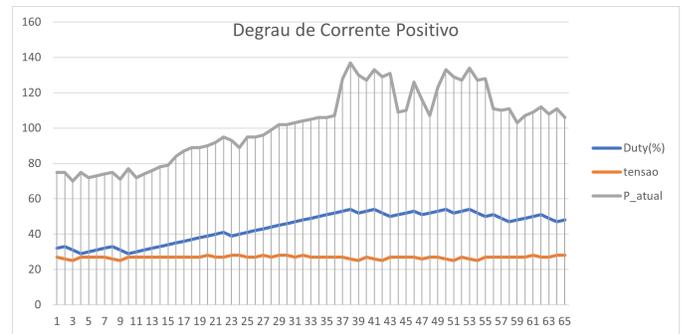


Fig. 9. Comportamento do sistema ao degrau positivo de corrente.

disponível.

Com isso, observa-se que o sistema obteve um bom comportamento quando submetido a variações na entrada. Ainda, percebe-se que o sistema reage melhor a variações de tensão do que a de corrente, visto que necessitou de menos interações (eixo X dos gráficos) para encontrar o novo ponto.

V. CONSIDERAÇÕES

Neste trabalho, desenvolveu-se um controlador de carga para geradores síncronos trifásicos, com o intuito de viabilizar o aproveitamento da energia que seria dissipada convertendo-a em eletricidade a partir do acoplamento do gerador em bicicletas ergométricas sem alterar o funcionamento convencional.

Isto foi possível através do uso de conversores CA/CC e CC/CC controlados por um algoritmo sendo executado no microcontrolador ESP32, resultando em dois modos de operação: convencional (modo 0) e MPPT (modo 1).

No modo 0, o sistema replica com confiabilidade o comportamento de uma bicicleta ergométrica convencional, onde o usuário escolhe a carga diretamente. A carga escolhida varia de 0 a 100% (70Ω até $1,47\Omega$) de acordo com sua vontade, não importando o valor exato de potência que está sendo demandado, apenas sua percepção perante a demanda.

No modo 1, o sistema escolhe a carga de acordo com a lógica do MPPT presente na Fig. 5, buscando a carga que extrai do usuário a maior potência, não necessariamente a máxima que este suporta, mas a que está dispondo.

Ao analisar o sistema operando em modo 0, percebe-se a atuação conforme o esperado. A carga sofre alteração apenas quando o usuário a altera através da IHM. Constatou-se que a disponibilidade de potência perante variação de carga e velocidade de um usuário qualquer é semelhante a uma montanha, permanecendo com este formato indiferente da condição física do usuário.

Perante os resultados obtidos ao expor o sistema operando em modo 1, há variações na disponibilidade de tensão e corrente, equivalentes a variações de velocidade e conjugado no gerador, percebe-se através da Fig. 8 e Fig. 9 que o buscador altera gradativamente a carga até encontrar o novo ponto de máxima potência.

Os resultados obtidos no geral foram considerados satisfatórios. Corroboram para comprovar a viabilidade no aproveitamento da energia mecânica que seria desperdiçada transformando-a em eletricidade, e isso sem alterar a essência do funcionamento do equipamento. A operação convencional foi reproduzida de forma confiável e o modo 1 proposto de operação apresentou consistência perante testes repetitivos e, além disso, sua necessidade é comprovada pelo comportamento da disponibilidade de potência.

Ainda, o modo 1 abre caminho para novos modos de operação que levem em conta não apenas a potência, mas outras variáveis que proporcionem ao usuário maior controle sobre o que ele deseja do equipamento. Cabe ressaltar que sua implementação em bicicletas ergométricas não é possível sem um controlador de carga.

REFERENCES

- [1] ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica, "Geração distribuída," 2022, acessado em: Julho de 2022. [Online]. Available: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>
- [2] S. R. d. Silveira, "Geração descentralizada de energia através de fonte alternativa," 2011.
- [3] R. Strzelecki, M. Jarnut, and G. Benysek, "Exercise bike powered electric generator for fitness club appliances," in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007, pp. 1–8.
- [4] R. W. Micheloni and P. H. A. Barra, "Reaproveitamento energético em bicicletas ergométricas de academias: Um estudo de caso," in *V Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica-EnICT (ISSN: 2526-6772)*, 2020.
- [5] G. M. Barboza, "Desenvolvimento de protótipo de uma bicicleta geradora de energia elétrica," 2017.
- [6] L. R. Dias, G. B. Lima, and D. B. Rodrigues, "Sistema de geração de energia elétrica a partir de uma bicicleta ergométrica," *Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)-Universidade de São Paulo (USP), São Carlos-SP. Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas (ICTE), Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFMT), Uberaba-MG*, 2016.
- [7] R. B. A. Lopes, "Sistema de geração de energia para pequenas cargas," 2014.
- [8] H. A. Barbosa *et al.*, "Sistema de injeção de potência ativa na rede elétrica através de uma bicicleta ergométrica com controle de batimento cardíacos," 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29063>
- [9] M. A. Elgandy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of perturb and observe mppt algorithm implementation techniques for pv pumping applications," *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 3, no. 1, pp. 21–33, 2011.
- [10] S. J. Chapman, *Fundamentos de máquinas elétricas*, 5th ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.