

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Arthur Martins Ribeiro

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM REGULADOR DE
TENSÃO PARA O GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO CONECTADO NA
FORMA BIFÁSICA**

UBERLÂNDIA

2026

Arthur Martins Ribeiro

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM REGULADOR DE
TENSÃO PARA O GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO CONECTADO NA
FORMA BIFÁSICA**

Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia
- UFU - Câmpus Santa Mônica, como requisito
para a obtenção do título de Graduação em
Engenharia Elétrica de Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bento Silva

UBERLÂNDIA

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, sabedoria e perseverança ao longo de toda a graduação, sustentando-me nos momentos de dificuldade e permitindo que eu chegasse até aqui.

À minha mãe, Kelly, e ao meu pai, Marcos, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos e por nunca medirem esforços para que eu pudesse me dedicar aos estudos. Esta conquista também é de vocês.

Ao professor Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira, ex-coordenador do curso, e à Suzana Rosa Arantes, secretária do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica pela dedicação com que conduziram a coordenação e pelo suporte prestado aos alunos durante suas gestões. Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Bento Silva, pela confiança, pela disponibilidade e pelos ensinamentos que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À minha companheira, Sarah, pelo carinho, pela paciência e por estar ao meu lado, me incentivando, nos momentos mais desafiadores desta caminhada.

À todos os meus colegas e professores do Laboratório de Máquinas Elétricas Especiais, pelo companheirismo e suporte prestado durante toda a minha jornada.

Por fim, agradeço a todos os professores da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), que contribuíram de forma essencial para a minha formação acadêmica e profissional.

*"Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e
vibração.",
(Nikola Tesla)*

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se o projeto e a implementação de um regulador de tensão digital para um gerador de indução trifásico que é autoexcitado e conectado de forma bifásica usando a configuração Fukami. Nessa configuração, a máquina de indução trifásica é excitada por dois capacitores entre duas fases, gerando um ponto central onde outro capacitor é conectado à fase restante e à carga, criando uma configuração bifásica. Dessa forma, permite-se que o gerador de indução seja utilizado de forma isolada e portátil, o que é possível principalmente devido ao fato de a máquina de indução ser mais robusta e de custo mais acessível se comparada com uma máquina síncrona, que é utilizada atualmente para essa finalidade.

No entanto, o funcionamento deste tipo de máquina como gerador não é capaz de manter a tensão terminal estável em uma mudança de carga, pois depende do equilíbrio de potência reativa do sistema. Para superar esse problema, foi proposto um regulador baseado no microcontrolador ESP32 contendo um controlador PI (Proporcional-Integral) desenvolvido de forma digital na linguagem C. A tensão do gerador é monitorada com um sistema de aquisição de tensão na carga, que fornece ao conversor analógico-digital do ESP32 um nível de tensão contínuo proporcionalmente próximo ao valor RMS da tensão gerada. Como elemento atuador, foi utilizada uma configuração com um interruptor bidirecional de potência, controlado por um sinal PWM gerado pelo circuito de controle da ESP32. Assim, de acordo com a variação de carga no gerador, o controlador PI ajusta constantemente o ciclo de trabalho para manter a tensão terminal no valor desejado de 220 V na carga, atuando como um abaixador de tensão.

Palavras-chave: Gerador de indução autoexcitado, Regulador de tensão, Controlador PI, ESP32, Configuração Fukami, Conexão bifásica.

ABSTRACT

This work presents the design and implementation of a digital voltage regulator for a three-phase induction generator that is self-excited and connected in a two-phase arrangement using the Fukami configuration. In this configuration, the three-phase induction machine is excited by two capacitors connected between two phases, creating a central point where another capacitor is connected to the remaining phase and to the load, thus forming a two-phase configuration. This allows the induction generator to be used in isolated and portable applications, which is mainly possible due to the fact that the induction machine is more robust and more affordable than the synchronous machine currently used for this purpose.

However, the operation of this type of machine as a generator is not able to keep the terminal voltage stable under a load change, since it depends on the reactive power balance of the system. To overcome this problem, a regulator based on the ESP32 microcontroller was proposed, containing a PI (Proportional-Integral) controller developed digitally in the C language. The generator voltage is monitored by a voltage acquisition system at the load, which provides the ESP32 analog-to-digital converter with a DC voltage level proportionally close to the RMS value of the generated voltage. As the actuating element, a configuration with a bidirectional power switch was used, controlled by a PWM signal generated by the ESP32 control circuit. Thus, according to the load variation in the generator, the PI controller continuously adjusts the duty cycle in order to keep the terminal voltage at the desired value of 220 V at the load, acting as a voltage step-down stage.

Keywords: Self-excited induction generator, Voltage regulator, PI controller, ESP32, Fukami configuration, Two-phase connection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do gerador na configuração Fukami	14
Figura 2 – Diagrama elétrico do gerador de indução na conexão Fukami	15
Figura 3 – Circuito equivalente do gerador na conexão Fukami: (a) na frequência nominal; (b) incluindo o efeito da variação de frequência	17
Figura 4 – Diagrama de blocos do controle Proporcional-Integral em malha fechada	19
Figura 5 – Microcontrolador ESP32.....	20
Figura 6 – Interruptor bidirecional composto por um IGBT e uma ponte retificadora	21
Figura 7 – Modulação por largura de pulso aplicada sobre a tensão senoidal do gerador	22
Figura 8 – Protótipo do circuito de aquisição de tensão.....	24
Figura 9 – Exemplo de ajuste do leitor de tensão	24
Figura 10 – Montagem do conjunto motor-gerador e dos capacitores	25
Figura 11 – Capacitores C_s e C_p na configuração Fukami	27
Figura 12 – Circuito de potência (IGBT, ponte retificadora, snubber e filtro LC)	28
Figura 13 – Esquema elétrico do circuito completo	28
Figura 14 – PWM na saída do controlador PI	29
Figura 15 – Tensão medida nos terminais do gerador.....	30
Figura 16 – Tensão medida nos terminais da carga.....	30
Figura 17 – Circuito em pleno funcionamento acionando uma lâmpada como carga	31
Figura 18 – Tensão no gerador (roxo) e tensão na carga (azul)	32
Figura 19 – PWM gerado pelo controlador PI durante operação	32
Figura 20 – Forma de onda da tensão na carga já filtrada.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados eletromecânicos do gerador de indução	24
Tabela 2 – Dados do motor de corrente contínua	24
Tabela 3 – Dados dos capacitores utilizados	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère – unidade de corrente elétrica
ADC	Conversor Analógico-Digital (Analog-to-Digital Converter)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
cv	Cavalo-vapor – unidade de potência
ESP32	Microcontrolador (SoC) da Espressif Systems
FEELT	Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia
Hz	Hertz – unidade de frequência
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada (Insulated Gate Bipolar Transistor)
LC	Filtro Indutor-Capacitor
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PWM	Modulação por Largura de Pulso (Pulse-Width Modulation)
RMS	Valor Eficaz (Root Mean Square)
rpm	Rotações por minuto
SAR	Registrador de Aproximações Sucessivas (Successive Approximation Register)
SEIG	Gerador de Indução Autoexcitado (Self-Excited Induction Generator)
SoC	Sistema em Chip (System on Chip)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V	Volt – unidade de tensão elétrica
μF	Microfarad – unidade de capacitância

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa	10
1.2 Objetivo	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Gerador de indução na configuração Fukami	12
2.2 Sistema de controle PI	17
2.3 Microcontrolador ESP32	18
2.4 Chaves bidirecionais com ponte retificadora	18
3 METODOLOGIA	21
3.1 Desenvolvimento do sistema de aquisição de tensão na carga	21
3.2 Circuito de potência e autoexcitação do gerador	22
3.3 Implementação do controlador PI	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	32
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica em corrente alternada é geralmente associada à máquina síncrona, que é utilizada em larga escala e na geração de energia isolada e portátil, mas a máquina de indução tem ganhado interesse crescente como gerador, particularmente em geração de pequena escala e distribuída, uma vez que possui boas características construtivas, como robustez mecânica, simplicidade, ausência de escovas, menor custo de manutenção e custo inferior em comparação com a máquina síncrona (BIM, 2012; BOLDEA, 2005). Esses fatores tornam a máquina de indução uma opção atraente para fornecimento de energia de emergência e distribuída em locais não atendidos pela rede elétrica (SIMÕES; FARRET, 2015).

Em contraste com a máquina síncrona, o gerador de indução não possui excitação própria e, portanto, necessita de potência reativa para produzir campo magnético no seu entreferro. Em operação isolada, o fornecimento de potência reativa é geralmente proporcionado por um banco de capacitores conectado aos terminais da máquina, dando origem ao chamado gerador de indução autoexcitado (SEIG). Nesse cenário, a autoexcitação começa a partir do magnetismo residual do rotor e evolui para um ponto de operação determinado pela interação entre a curva de magnetização da máquina e a reatância capacitiva do banco, de modo que o dimensionamento dos capacitores é fundamental no estabelecimento e na manutenção da tensão gerada (SIMÕES; FARRET, 2015; VANÇO et al., 2018).

A principal desvantagem do gerador de indução autoexcitado está na dificuldade de manter estável a tensão nos terminais do gerador. O processo de autoexcitação baseia-se no equilíbrio entre a potência reativa fornecida pelos capacitores e a demandada pela máquina e pela carga, de modo que variações na carga e na velocidade de acionamento podem levar à perda de autoexcitação (SIMÕES; FARRET, 2015). Para superar essas limitações e utilizar o gerador de indução em aplicações do mundo real, têm sido propostas várias soluções baseadas em eletrônica de potência, nas quais conversores e interruptores são utilizados para controlar a tensão terminal.

Nesse contexto, interruptores bidirecionais são usados no projeto de reguladores de tensão para geradores de indução autoexcitados, capazes de alterar dinamicamente a tensão entregue à carga (SILVA et al., 2018). O desenvolvimento de microcontroladores de baixo custo permite a implementação digital de leis de controle clássicas (por exemplo, controle PI) com flexibilidade e uma boa relação custo-benefício, possibilitando ainda que os parâmetros do regulador sejam ajustados por software. Uma abordagem particularmente interessante para geração isolada é usar uma máquina de indução trifásica como gerador monofásico/bifásico,

conforme proposto por Fukami et al. (1999). Nessa proposta, emprega-se um arranjo particular de capacitores que torna o conjunto autorregulável. Este trabalho propõe desenvolver um regulador de tensão digital baseado em microcontrolador ESP32 para gerador de indução autoexcitado conectado em forma bifásica como na configuração de Fukami, porém é utilizado um interruptor bidirecional, formado pelo arranjo de uma ponte retificadora e um IGBT. Com essa abordagem é possível reduzir custos com chaves de alta potência e reduzir a complexidade do controle PWM.

1.1 Justificativa

Geradores portáteis e sistemas de geração isolados são de grande utilidade em quedas de energia, em áreas sem acesso à rede de corrente alternada e em aplicações de uso geral. Esta função historicamente foi desempenhada apenas pela máquina síncrona, mas, graças à robustez, ao baixo custo e à menor manutenção do gerador de indução, é possível utilizá-lo como gerador, contornando o problema da instabilidade da tensão terminal por meio do sistema desenvolvido neste trabalho (BIM, 2012; SIMÕES; FARRET, 2015). O desenvolvimento de um regulador de tensão digital em um microcontrolador viabiliza essa operação, tornando o gerador de indução uma alternativa prática e acessível.

1.2 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é projetar e implementar um regulador de tensão para um gerador de indução autoexcitado operando em uma conexão bifásica, que permita que a tensão na carga permaneça próxima à referência mesmo na presença de variações de carga. Para isso, planeja-se implementar um algoritmo de controle Proporcional-Integral (PI) em linguagem C embarcado no microcontrolador ESP32, que monitora a tensão produzida e ajusta a ação de controle continuamente.

Além disso, será criada uma versão protótipo da etapa de potência do regulador na bancada, com o interruptor bidirecional que controla a tensão entregue à carga e o circuito de leitura que envia ao conversor analógico-digital do microcontrolador um sinal proporcional ao valor eficaz da tensão do gerador. Por fim, serão obtidos dados experimentais para investigar o desempenho do sistema e validar a proposta deste trabalho como uma solução viável e de baixo custo para regulação de tensão em geradores de indução.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos necessários à compreensão do desenvolvimento realizado. Inicialmente, discute-se o gerador de indução operando na configuração de Fukami, em seguida, apresenta-se o sistema de controle Proporcional-Integral empregado na regulação da tensão, depois, descreve-se o microcontrolador ESP32 utilizado na implementação digital do regulador.

2.1 Gerador de indução na configuração Fukami

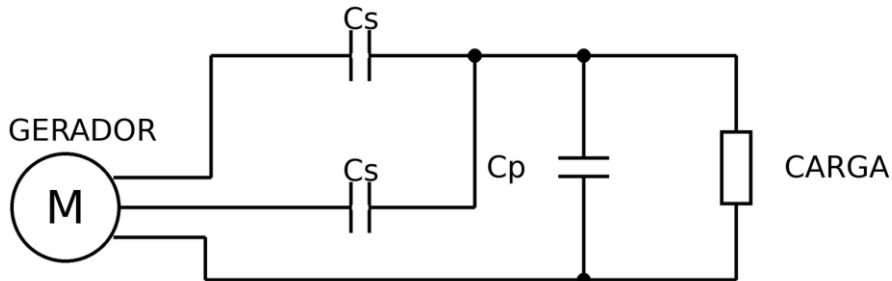
A máquina de indução, amplamente empregada como motor, também pode operar como gerador quando acionada acima da velocidade síncrona. Porém, ao contrário da máquina síncrona, ela não possui sua própria excitação e requer uma fonte de potência reativa para criar o campo magnético no entreferro. Em operação isolada, o fornecimento é feito por um banco de capacitores conectado aos seus terminais, o que leva ao gerador de indução autoexcitado (SEIG). O processo de autoexcitação começa a partir do magnetismo residual do rotor e evolui para um ponto de operação que é estabelecido pela interseção da curva de magnetização da máquina e da reatância capacitiva do banco, sendo o tamanho correto dos capacitores importante para o estabelecimento e manutenção da tensão gerada (SIMÕES; FARRET, 2015; VANÇO et al., 2018).

Uma maneira diferente de gerar a tensão em geração isolada de pequena escala é usar uma máquina de indução trifásica como gerador monofásico, conforme proposto por Fukami. Nesta configuração, uma máquina trifásica com rotor em gaiola de esquilo tem seus terminais conectados a uma série de capacitores em série e paralelo com uma carga monofásica. O capacitor de compensação em série torna o conjunto autorregulado, de modo que pode alterar muito pouco a tensão terminal de uma fase para outra, daí o nome gerador de indução monofásico autoexcitado e autorregulado. Recentemente, vários autores revisitaram e expandiram essa configuração para avaliar seu desempenho e novas aplicações (METELLO et al., 2024). A Figura 1 ilustra o princípio da configuração de Fukami.

Na conexão Fukami, emprega-se uma máquina de indução trifásica de rotor em gaiola de esquilo, ligada em estrela (Y), à qual se associam três capacitores: um capacitor C_p , conectado em paralelo com a carga, e dois capacitores C_s , ligados em série. Além de proporcionar uma regulação de tensão aprimorada, essa disposição apresenta uma vantagem adicional em relação aos geradores de indução monofásicos convencionais: como a potência de

excitação é fornecida de forma trifásica, a pulsação de potência característica desses geradores operando a vazio não se manifesta (FUKAMI et al., 1999; SILVA et al., 2026).

Figura 1 – Representação do gerador na configuração Fukami



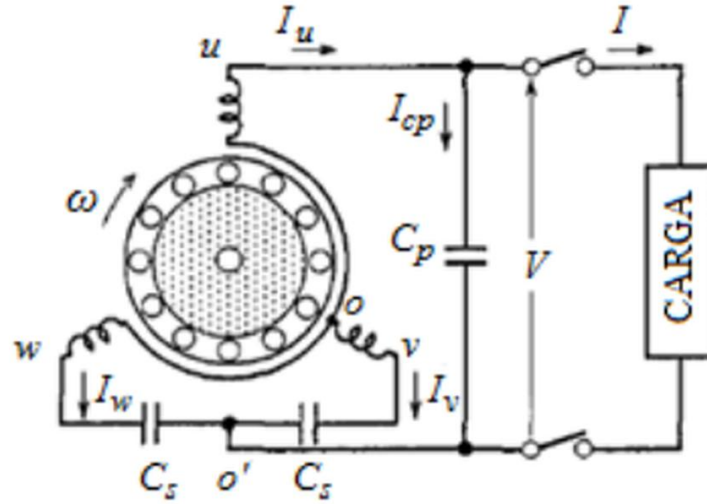
Fonte: Autoria Própria (2026)

O estabelecimento da tensão nessa configuração ocorre pelo fenômeno da autoexcitação: ao se acionar o rotor por meio de uma máquina primária, o magnetismo residual induz uma pequena tensão no estator, denominada tensão remanescente, cuja frequência é proporcional à velocidade de acionamento e cuja amplitude é função do estado de magnetização do núcleo da máquina. As correntes que passam a circular pelos capacitores C_s e C_p reforçam o campo magnético e fazem a tensão de saída crescer até o ponto de operação. A tensão entregue à carga corresponde à soma da tensão de fase da máquina com a tensão sobre os capacitores em série C_s , que atua no sentido de elevar a tensão de saída. Dessa forma, com o dimensionamento adequado dos três capacitores, a queda de tensão nos terminais torna-se pequena diante da variação da carga, o que caracteriza o comportamento autorregulado da conexão (SILVA et al., 2026).

Essa característica de autorregulação decorre diretamente da posição dos capacitores série no circuito. Por estarem em série com o caminho da corrente entregue à carga, a tensão desenvolvida sobre os capacitores C_s é proporcional a essa corrente. Quando a carga aumenta, a tensão da máquina tenderia a cair pela maior demanda de potência reativa; no mesmo instante, porém, a parcela de tensão sobre os C_s cresce junto com a corrente e se soma à saída, e a própria circulação de corrente pelos capacitores injeta potência reativa adicional no conjunto. Obtém-se, assim, uma compensação automática de natureza puramente passiva, análoga à compensação série empregada em linhas de transmissão. Para a operação do gerador com uma carga específica, cujos capacitores são dimensionados em função dessa carga, a tensão não sofre variação e não é necessário nenhum regulador de tensão. Entretanto, para um aumento ou uma diminuição da carga, a tensão passa a sofrer variação, o que motiva o emprego de um regulador

ativo como o desenvolvido neste trabalho. A Figura 2 apresenta o diagrama elétrico dessa conexão, no qual se identificam os terminais do estator u , v e w , as correntes de fase I_u , I_v e I_w , os capacitores série C_s e o capacitor paralelo C_p , além da tensão V entregue à carga.

Figura 2 – Diagrama elétrico do gerador de indução na conexão Fukami



Fonte: Silva et al. (2026), adaptado de Fukami et al. (1999).

O comportamento em regime permanente do gerador nessa conexão pode ser analisado pelo método das componentes simétricas, conforme a dedução apresentada em Fukami et al. (1999) e retomada por Silva et al. (2026), resumida aqui de forma simplificada. Como o estator é ligado em estrela, não há circulação das componentes de sequência zero nas correntes de fase, de modo que as correntes do estator I_u , I_v e I_w podem ser escritas apenas em função das componentes de sequência positiva (I_+) e negativa (I_-), por meio do operador complexo $a = e^{j2\pi/3}$, que representa uma rotação de fase de 120° :

$$\begin{aligned} I_u &= I_+ + I_- \\ I_v &= a^2 I_+ + a I_- \\ I_w &= a I_+ + a^2 I_- \end{aligned} \quad (1)$$

Aplicando a mesma transformação às tensões terminais do estator, obtêm-se as componentes de sequência positiva (V_+) e negativa (V_-) das tensões:

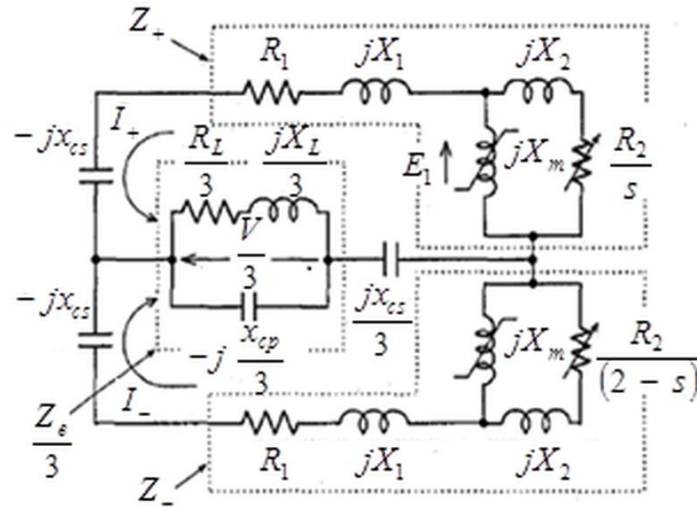
$$\begin{aligned} V_+ &= \frac{1}{3}(V_{uv} + aV_{vw} + a^2V_{wu}) \\ V_- &= \frac{1}{3}(V_{uv} + a^2V_{vw} + aV_{wu}) \end{aligned} \quad (2)$$

Essas mesmas componentes também podem ser expressas em função das impedâncias de sequência positiva (Z_+) e negativa (Z_-) do gerador:

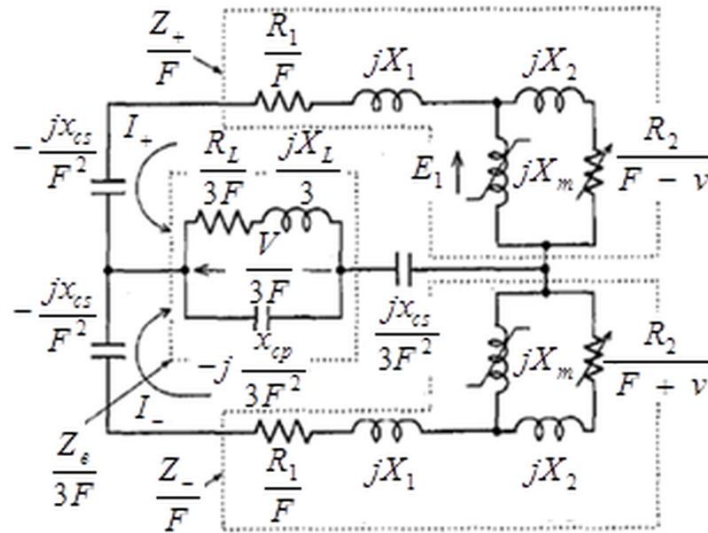
$$\begin{aligned} V_+ &= -(1 - a^2)Z_+I_+ \\ V_- &= -(1 - a)Z_-I_- \end{aligned} \quad (3)$$

As tensões terminais, por sua vez, dependem da impedância equivalente Z_e , formada pela associação da carga em paralelo com o capacitor C_p , e da reatância capacitiva x_{cs} dos capacitores em série C_s . Combinando as Equações (1) a (3) com essas relações, chega-se a uma matriz de impedâncias que vincula as componentes de sequência das correntes do estator e da qual se deriva o circuito equivalente do gerador, apresentado na Figura 3. A Figura 3(a) mostra o circuito equivalente na frequência nominal, no qual se identificam as resistências do estator e do rotor (R_1 e R_2), as reatâncias de dispersão (X_1 e X_2), a reatância de magnetização (X_m) e o ramo de sequência negativa, caracterizado pelo escorregamento ($2 - s$). A Figura 3(b) apresenta o mesmo circuito modificado para incluir o efeito da variação de frequência, com a frequência da tensão gerada (F) e a velocidade do rotor (v) expressas em valores por unidade. A partir desse circuito é possível determinar o comportamento do gerador em regime permanente, como a tensão gerada e sua regulação (FUKAMI et al., 1999; SILVA et al., 2026).

Figura 3 – Circuito equivalente do gerador na conexão Fukami: (a) na frequência nominal; (b) incluindo o efeito da variação de frequência



(a)



(b)

Fonte: Silva et al. (2026), adaptado de Fukami et al. (1999).

Cabe uma observação quanto à nomenclatura. Fukami et al. (1999) denominam o arranjo de gerador de indução monofásico, em referência à carga alimentada, que é única e conectada entre dois terminais de saída. Trabalhos mais recentes, como o de Silva et al. (2026), descrevem a mesma conexão como operação bifásica da máquina trifásica, por destacarem que a tensão de saída é formada com a participação de duas fases do estator por meio dos capacitores série. As duas designações referem-se, portanto, à mesma configuração, mudando apenas o ponto de vista adotado: o da carga, no primeiro caso, e o da máquina, no segundo. Neste trabalho adota-se o termo forma bifásica, em coerência com a nomenclatura de Silva et al. (2026),

explorando-se as vantagens do gerador de indução trifásico em conjunto com um regulador de tensão que atua eletronicamente sobre a tensão entregue à carga. Destaca-se também neste trabalho que a ligação bifásica utiliza o gerador conectado em sua tensão de 380 V, com os capacitores C_p e C_s no circuito, fazendo com que a tensão na carga, nas condições desejáveis de operação, fique com valores maiores do que 220 V.

2.2 Sistema de controle PI

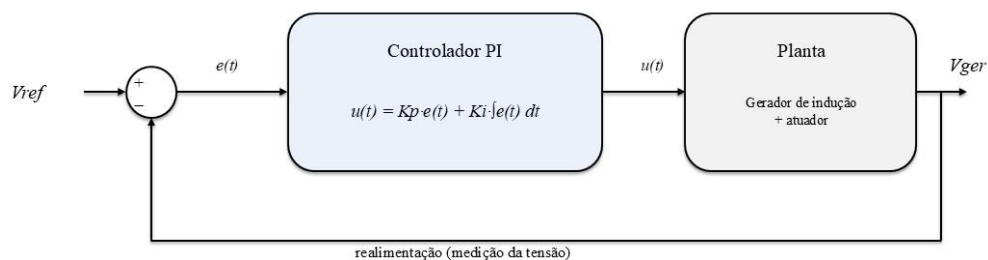
Sistemas de controle em malha fechada comparam continuamente a variável controlada com um valor de referência para gerar um sinal de erro que é processado por um controlador para produzir uma ação corretiva. O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o mais popular e combina três ações: a resposta proporcional ao erro instantâneo, o integral que calcula o erro ao longo do tempo e remove o erro em regime permanente, e a resposta derivativa à tendência do erro para melhorar a resposta transitória. Neste trabalho, toma-se o PID como referência, mas apenas o controlador PI é utilizado (ou seja, sem a ação derivativa). Isso ocorre porque a ação derivativa é sensível ao ruído de medição e acredita-se que a combinação das ações proporcional e integral pode eliminar o erro em regime permanente e manter a tensão final no valor desejado.

A ação de controle do controlador PI é dada pela Equação (4).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (4)$$

em que $e(t)$ é o erro entre a tensão de referência e a tensão medida, e K_p e K_i são os ganhos proporcional e integral, respectivamente. Na implementação digital, emprega-se ainda o anti-windup para evitar o acúmulo excessivo do termo integral quando a ação de controle satura. A Figura 4 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada.

Figura 4 – Diagrama de blocos do controle Proporcional-Integral em malha fechada



2.3 Microcontrolador ESP32

A implementação digital do regulador é realizada no microcontrolador ESP32, um sistema em chip (SoC) de baixo custo desenvolvido pela Espressif Systems. O sistema possui um processador Xtensa LX6 em uma versão dual-core com até 240 MHz e integração sem fio com Wi-Fi e Bluetooth. Para a aplicação de controle, são utilizados dois dispositivos periféricos. Conversores analógico-digitais (ADC) do tipo SAR com resolução de 12 bits são usados para ler a tensão do gerador e o módulo de modulação por largura de pulso (PWM) para controlar o estágio de potência (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

O ESP32 opera com um algoritmo em linguagem C que percorre a leitura da tensão gerada através do canal ADC e a ação de controle PI e o ciclo de trabalho do sinal PWM, que é atualizado e usado para acionar o driver do interruptor de potência. A flexibilidade de programação e o baixo custo do microcontrolador permitem que os ganhos do controlador e outros parâmetros sejam configurados sem alterações no circuito. A Figura 5 ilustra o ESP32 utilizado no trabalho.

Figura 5 – Microcontrolador ESP32



Fonte: Autoria Própria (2026)

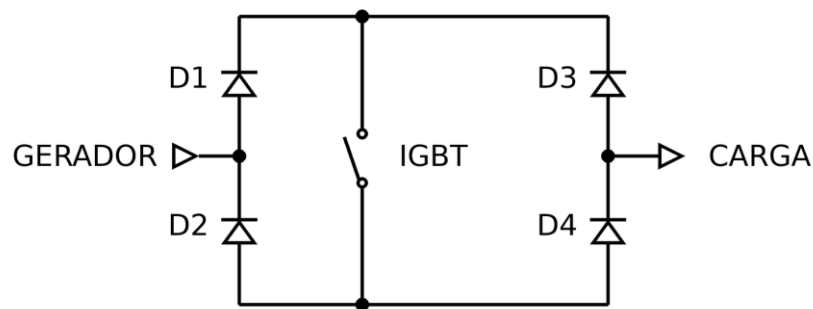
2.4 Interruptor bidirecional

Em conversores destinados ao controle de tensão em corrente alternada, é necessário um interruptor capaz de conduzir e bloquear corrente nos dois sentidos, denominado interruptor bidirecional. Os semicondutores de potência controlados, como o IGBT, conduzem corrente em um único sentido. Por essa razão, a operação bidirecional é obtida pela associação de

dispositivos, sendo comuns três configurações: dois transistores em antissérie, tiristores em antiparalelo ou um único transistor inserido em uma ponte retificadora (SILVA et al., 2018).

Na configuração com ponte retificadora, o interruptor bidirecional é composto por quatro diodos e um único IGBT conectado entre os terminais de corrente contínua da ponte. Em qualquer semiciclo da tensão alternada, os diodos encaminham a corrente de modo que ela atravesse o IGBT sempre no mesmo sentido: no semiciclo positivo, a corrente circula pelos diodos D1 e D4 e, no semiciclo negativo, por D3 e D2. Dessa forma, o transistor permanece polarizado corretamente nos dois semiciclos e um único sinal de comando é suficiente para estabelecer ou interromper a passagem de corrente alternada entre o gerador e a carga. A Figura 6 apresenta o circuito desse interruptor.

Figura 6 – Interruptor bidirecional composto por um IGBT e uma ponte retificadora



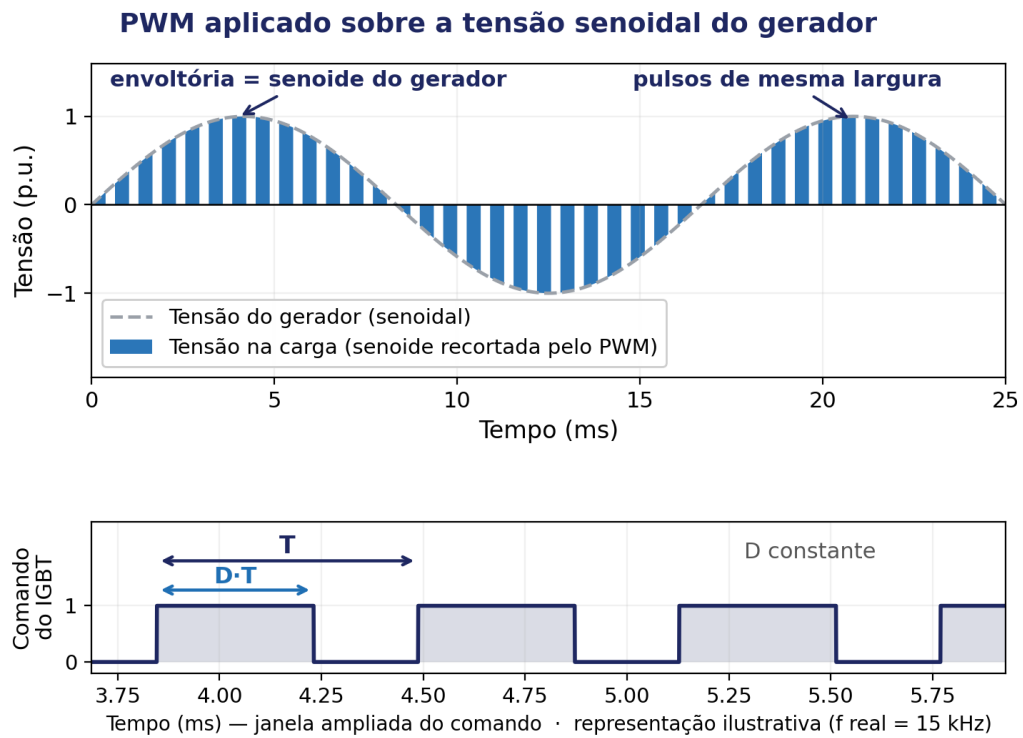
Fonte: Autoria Própria (2026)

A principal vantagem dessa topologia é o emprego de um único dispositivo controlado e, portanto, de um único circuito de acionamento (driver), o que reduz o custo e simplifica a geração do sinal de comando por modulação por largura de pulso. Na regulação de tensão de geradores de indução autoexcitados, essa configuração de interruptor bidirecional opera em corrente alternada, comandada por PWM, permitindo ajustar dinamicamente a tensão entregue à carga (SILVA et al., 2018; SILVA et al., 2026).

Cabe destacar a natureza da modulação empregada. O sinal PWM não é gerado a partir da comparação de uma referência senoidal com uma portadora triangular, como ocorre na modulação por largura de pulso senoidal (SPWM), utilizada em inversores para sintetizar uma tensão alternada a partir de uma fonte contínua. Neste trabalho, a tensão alternada já existe: ela é produzida pelo próprio gerador. O que o interruptor bidirecional faz é recortar essa tensão senoidal por meio de pulsos de razão cíclica constante ao longo do ciclo da rede, de modo que

a envoltória dos pulsos permanece sendo a própria senoide do gerador e apenas o valor eficaz entregue à carga é alterado. Por esse motivo, a frequência e a fase da tensão na carga são preservadas, e o controlador PI atua exclusivamente sobre a amplitude, ajustando a razão cíclica. A Figura 7 ilustra esse comportamento.

Figura 7 – Modulação por largura de pulso aplicada sobre a tensão senoidal do gerador



Fonte: Autoria Própria (2026)

3 METODOLOGIA

A montagem do protótipo foi realizada em uma bancada composta por uma máquina de corrente contínua conectada a um gerador de indução (acionado pela transmissão mecânica) e um banco de capacitores de excitação na configuração Fukami. O sistema de regulação está organizado em três partes: o circuito de medição, que converte a tensão do gerador em um sinal contínuo compatível com o microcontrolador, a etapa de potência, formada por um IGBT e uma ponte retificadora que atua sobre a tensão presente na carga, e o controle digital, que é realizado no ESP32 para medir a tensão e realizar a ação de controle.

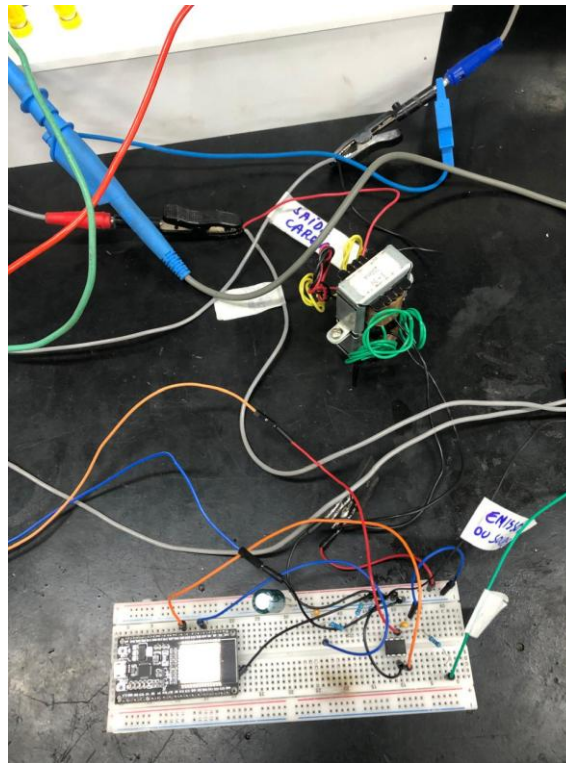
3.1 Desenvolvimento do sistema de aquisição de tensão na carga

A malha de controle requer, como feedback, um valor proporcional à tensão do gerador que pode ser lido pelo conversor analógico para digital (ADC) do ESP32. Como o microcontrolador aceita apenas tensões contínuas de baixa amplitude (faixa de 0 a 3,3 Vcc) em suas entradas, ele não pode se conectar diretamente aos terminais do gerador. Para resolver esse problema, utilizou-se um circuito que reduz e retifica a tensão gerada e envia ao ADC um nível de tensão contínua proporcional ao valor RMS da tensão do gerador. O circuito consiste em um transformador redutor de 220/6 V que reduz e isola galvanicamente a tensão do gerador, seguido de uma etapa de retificação e um divisor resistivo com um capacitor de filtro junto a um diodo Zener de 3,3 V para proteger a entrada contra sobretensões. A Figura 8 ilustra o protótipo do circuito de aquisição da tensão na carga montado na protoboard.

O divisor resistivo é usado para ajustar a amplitude do sinal dentro da faixa do ADC. O capacitor é usado para reduzir o ripple, de modo que a tensão contínua gerada pelo circuito de aquisição seja proporcional ao valor RMS da tensão gerada. O sinal é então aplicado a uma das entradas analógicas do ESP32 com resolução de 12 bits e a atenuação apropriada para cobrir toda a faixa de medição. Em termos de leitura, a rotina implementada no microcontrolador é projetada para fornecer um resultado estável mesmo com o ruído e a ondulação do sinal. O microcontrolador realiza todas as leituras em um ciclo completo da frequência do gerador (60 Hz) e as combina para eliminar os picos de tensão causados pela comutação da etapa de potência e, em seguida, calcula a média. Para obter a tensão real do gerador, o valor é então convertido em uma distribuição linear, de forma que o valor da tensão gerada seja proporcional ao seu valor eficaz de tensão. Esse ajuste é obtido por um procedimento de calibração, no qual o gerador é ajustado para duas tensões conhecidas (no voltímetro de referência, 127 V e 220 V)

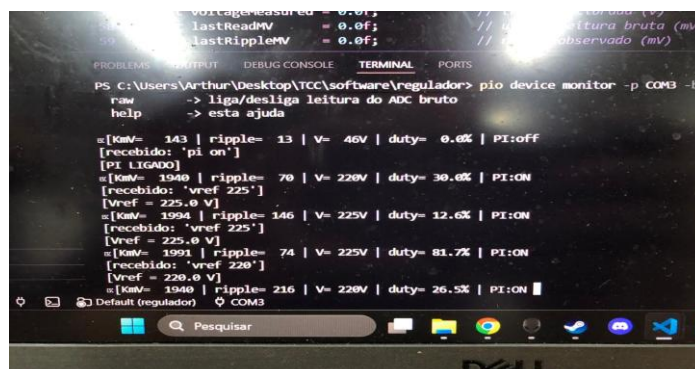
e a leitura do microcontrolador é registrada em cada uma delas, obtendo-se a reta que relaciona o valor lido à tensão efetiva do gerador. Uma vez que o sistema de aquisição está configurado corretamente, o valor da tensão terminal é fornecido, o que é o valor de feedback que entra na malha do controlador PI. A Figura 9 ilustra a realização do ajuste dos valores de tensão lidos pelo microcontrolador.

Figura 8 – Protótipo do circuito de aquisição de tensão



Fonte: Autoria Própria (2026)

Figura 9 – Exemplo de ajuste do leitor de tensão

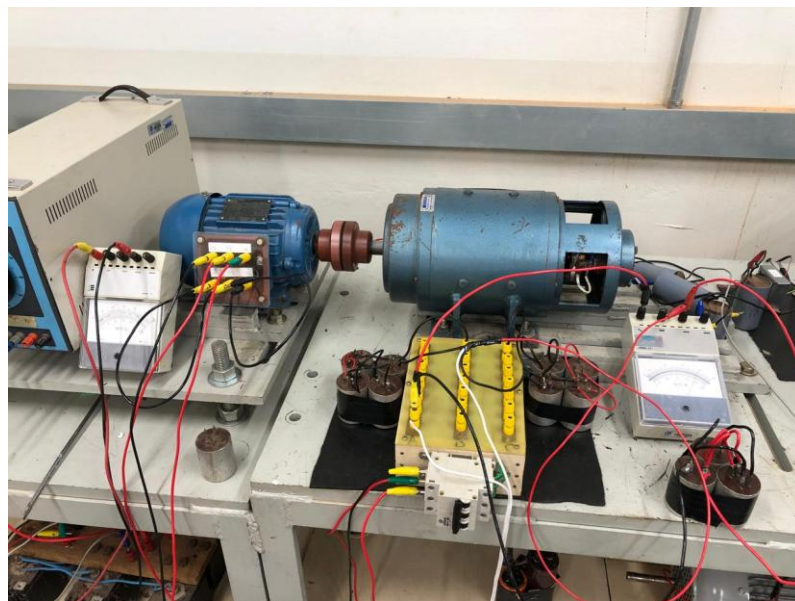


Fonte: Autoria Própria (2026)

3.2 Circuito de potência e autoexcitação do gerador

Para gerar a excitação da máquina de indução, foi montado um banco de capacitores conectado aos terminais da máquina. O processo de autoexcitação começa com o magnetismo residual do rotor: ao acionar o rotor próximo da velocidade síncrona, a pequena tensão que o fluxo residual cria faz com que uma corrente flua através dos capacitores, o que, por sua vez, fortalece o campo magnético e aumenta a tensão. Esse crescimento pode então ser interrompido em um ponto de operação entre a curva de magnetização da máquina e a linha de carga, que é formada pelo campo magnético e pela reatância capacitiva do banco. Em resumo, o banco de capacitores fornece a potência reativa que define a tensão terminal na carga acima de 220 V sem a atuação do regulador; com o regulador, esse valor é ajustado conforme a variação de carga para 220 V. Dessa forma, desde que a tensão terminal que chega ao circuito do regulador de tensão seja superior a 220 V, a tensão na carga ficará sempre regulada dentro do valor desejado (220 V). A Figura 10 apresenta a bancada experimental, destacando o conjunto motor-gerador, os capacitores C_s e C_p , além dos voltímetros de medição.

Figura 10 – Montagem do conjunto motor-gerador e dos capacitores



Fonte: Autoria Própria (2026)

A bancada é composta por um motor de corrente contínua de 1 cv, alimentado com 220 V de armadura, que atua como máquina primária acionando um gerador de indução trifásico de 1 cv, 380/220 V, 4 polos e rotação nominal de 1730 rpm. As Tabelas 1 a 3 apresentam, respectivamente, os dados eletromecânicos do gerador de indução, os dados do motor de corrente contínua e os dados dos capacitores empregados na autoexcitação do gerador.

Tabela 1 – Dados eletromecânicos do gerador de indução

Parâmetros	Valores
Potência	1 cv
Tensões de ligação	380/220 V
Corrente nominal	1,75/3,02 A
I_p/I_n	6,6
Polos	4 polos
Rotação	1730 rpm
Fator de potência	0,81
Frequência	60 Hz
Rendimento	80,5%
Categoria	F

Fonte: Autoria Própria (2026)

Tabela 2 – Dados do motor de corrente contínua

Parâmetros	Valores
Potência	1 cv
Tensão de armadura	220 V
Corrente de armadura	4,2 A
Tensão de campo	50 V
Corrente de campo	1,2 A
Rotação nominal	1800 rpm

Fonte: Autoria Própria (2026)

Tabela 3 – Dados dos capacitores utilizados

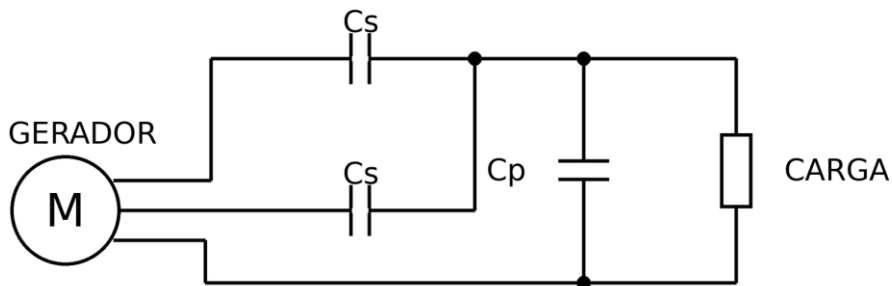
Parâmetros	Capacitor Cs	Capacitor Cp
Tensão nominal	400 V	400 V
Capacitância	20 μ F	15 μ F

Fonte: Autoria Própria (2026)

Os valores de capacitância indicados na Tabela 3 foram obtidos por meio de associações de capacitores comerciais de 5 μ F: cada capacitor série Cs corresponde à associação de quatro unidades (20 μ F), enquanto o capacitor paralelo Cp é formado por três unidades (15 μ F). Como a configuração emprega dois capacitores Cs e um Cp, foram utilizados, ao todo, onze capacitores. Esses valores foram determinados experimentalmente, testando-se diferentes associações até se obter uma tensão de aproximadamente 250 V nos terminais do gerador. A

teoria utilizada para esse dimensionamento pode ser obtida em Fukami et al. (1999). Essa tensão garante margem adequada de atuação para o regulador. A Figura 11 repete o diagrama da configuração Fukami, evidenciando a posição dos capacitores série C_s e paralelo C_p no circuito.

Figura 11 – Capacitores C_s e C_p na configuração Fukami

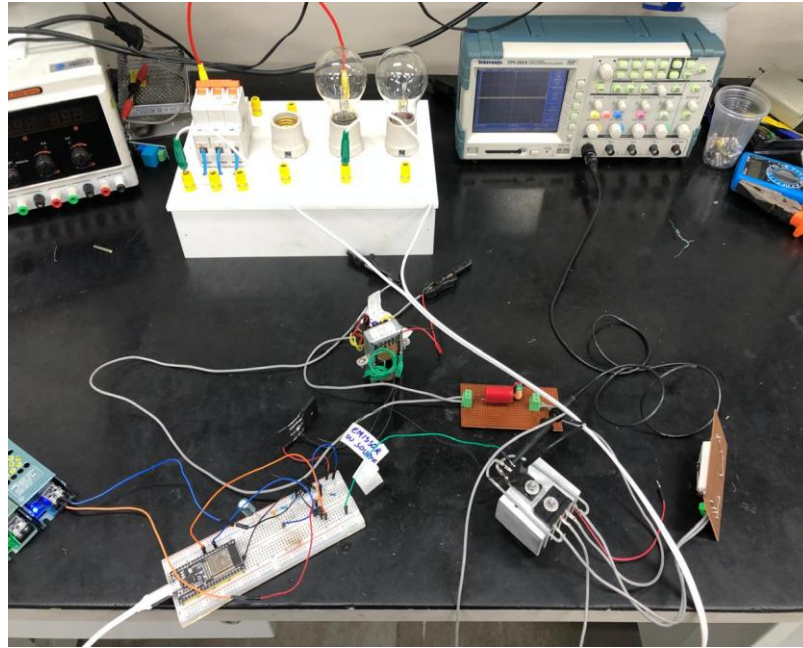


Fonte: Autoria Própria (2026)

O estágio de potência é responsável por reduzir a magnitude da tensão entregue à carga. Esse estágio é constituído por um interruptor bidirecional de potência, formado por um IGBT conectado a uma ponte retificadora. Como o IGBT só conduz em uma direção, a ponte retificadora permite que ele funcione na tensão alternada do gerador polarizando corretamente o IGBT nos dois semiciclos da onda, que é retificada, e o conjunto se comporta como um interruptor bidirecional em corrente alternada. Assim, a saída segue o mesmo padrão alternado do gerador, mas com menor ou igual magnitude dependendo do duty cycle (%), sendo o IGBT acionado por um sinal de modulação por largura de pulso (PWM) do ESP32. Como o microcontrolador não fornece corrente ou nível de tensão suficientes para acionar diretamente o IGBT, o sinal é alimentado a um circuito integrado de driver TC4427, que adapta e amplifica o comando para o nível correto para acionar o IGBT, através de um resistor de porta.

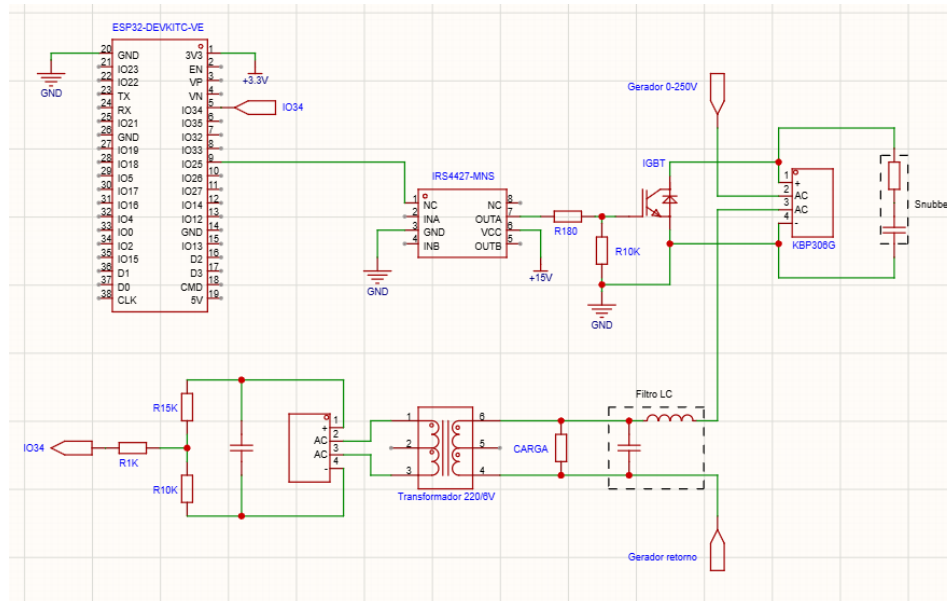
Dependendo do ciclo de trabalho do PWM, o tempo que o interruptor ainda está em operação é alterado e, portanto, a tensão entregue à carga também é alterada. Utiliza-se um circuito snubber em paralelo com o interruptor bidirecional para proteger o IGBT de sobretensões geradas pelo chaveamento em circuitos com cargas indutivas. Finalmente, na saída, o filtro LC é usado para filtrar componentes de alta frequência introduzidos pela comutação e fornecer uma tensão que se aproxima de uma onda senoidal. A Figura 12 ilustra o circuito de potência e a Figura 13 ilustra o esquema elétrico do sistema.

Figura 12 – Circuito de potência (IGBT, ponte retificadora, snubber e filtro LC)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Figura 13 – Esquema elétrico do circuito completo



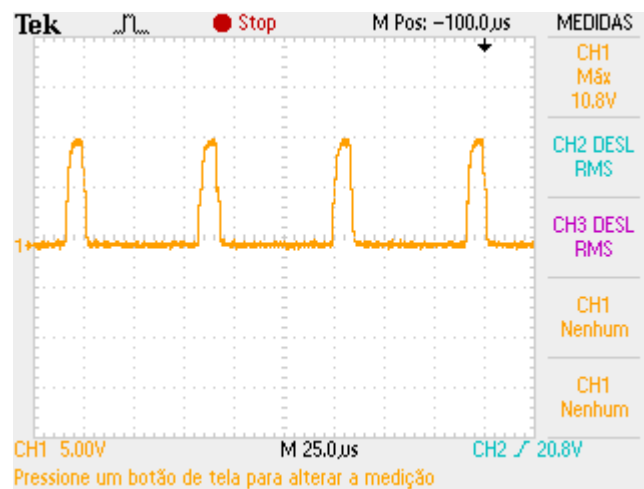
Fonte: Autoria Própria (2026)

3.3 Implementação do controlador PI

A tensão terminal é controlada completamente de forma digital, através de um algoritmo PI que é executado ciclicamente pelo ESP32. A cada ciclo, o microcontrolador lê a tensão do gerador e a compara com a tensão de referência desejada de 220 V. O sinal de erro é a grandeza sobre a qual o controlador atua: enquanto houver erro, a ação de controle é recalculada de modo

a levá-lo a zero. Com base no erro, o controlador combina duas ações. A parte proporcional reage imediatamente ao erro, produzindo uma correção proporcional à diferença entre a tensão medida e a tensão de referência. A parte integral acumula o erro ao longo do tempo e é responsável por eliminar o erro em regime permanente, de modo que a tensão terminal esteja exatamente onde se deseja, e não apenas nas proximidades. O peso de cada uma dessas ações é determinado, respectivamente, pelos ganhos proporcional e integral, que são ajustados experimentalmente em bancada para obter uma resposta rápida e estável. A Figura 14 ilustra o sinal PWM obtido na saída do controlador.

Figura 14 – PWM na saída do controlador PI



Fonte: Autoria Própria (2026)

O resultado do cálculo do controlador PI é a razão cíclica do sinal PWM que comanda o estágio de potência. Esse valor é limitado ao intervalo fisicamente disponível, entre 0 e 100%, pois o atuador não pode assumir valores fora desses limites. Alterar a razão cíclica altera o intervalo de condução do interruptor bidirecional e, como resultado, o valor eficaz da tensão entregue à carga. A Figura 15 ilustra a tensão no gerador e a Figura 16 ilustra a tensão na carga.

Figura 15 – Tensão medida nos terminais do gerador



Fonte: Autoria Própria (2026)

Figura 16 – Tensão medida nos terminais da carga



Fonte: Autoria Própria (2026)

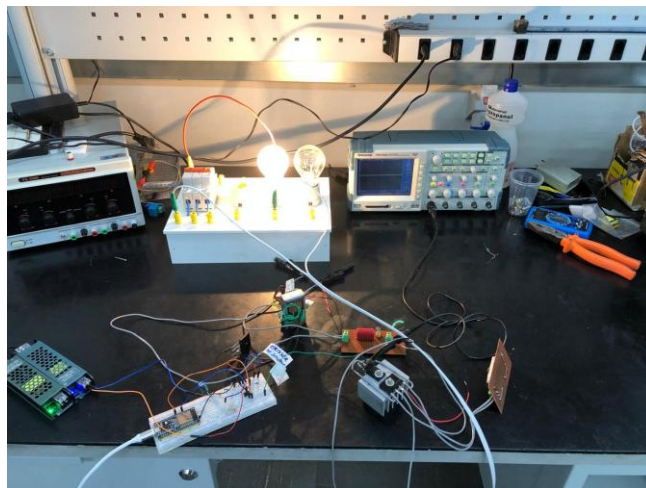
Se a tensão do gerador for muito alta e ultrapassar a tensão de referência, a ação de controle reduz a tensão na carga. Mas o ciclo de trabalho tem apenas um intervalo finito: quando a saída atinge um de seus limites e permanece nele (saturação do atuador), a parte integral acumularia o erro indefinidamente, o que causaria atrasos e grandes sobressinais quando o sistema voltasse a operar na faixa linear. Esse fato é conhecido como windup do integrador, podendo ser evitado com a integração condicional: a acumulação do termo integral é interrompida se a saída já estiver saturada e o erro apontar no mesmo sentido da saturação. Assim, consegue-se usar um ganho integral alto, o que torna a resposta rápida, sem comprometer a estabilidade ou introduzir sobressinais indesejados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O diagrama do circuito regulador de tensão e do circuito de potência é apresentado na Figura 13. Nessa figura, destaca-se o circuito do regulador de tensão, composto pela malha de controle, pelo gate driver e pelo interruptor bidirecional. Também é apresentado o circuito do gerador de indução na conexão bifásica, contendo os capacitores C_s e C_p utilizados na autoexcitação, juntamente com a configuração de acionamento do motor de corrente contínua. Além disso, o circuito apresenta o filtro LC e a carga resistiva utilizada.

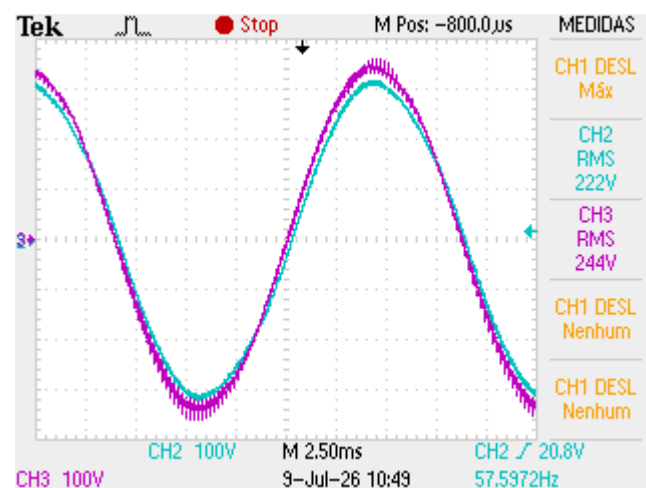
A montagem completa em operação (com a máquina de corrente contínua acionando o gerador de indução, o banco de capacitores de excitação, o estágio de potência e o ESP32) é mostrada na Figura 17, onde o sistema funciona fornecendo a carga resistiva sob regulação. As formas de onda de tensão e o comportamento do sistema sob diferentes condições de operação foram registrados. Neste caso, as formas de onda de tensão no gerador e a tensão entregue à carga são mostradas na Figura 18. Nota-se pela imagem que a forma de onda da tensão na carga está em fase e com a mesma frequência da tensão gerada, diferenciando-se apenas pela magnitude. Isso é prova do princípio do estágio de potência: o interruptor bidirecional (o IGBT com a ponte retificadora) não distorce o comportamento alternado da tensão, mas apenas reduz o valor eficaz dependendo do comando aplicado.

Figura 17 – Circuito em pleno funcionamento acionando uma lâmpada como carga



Fonte: Autoria Própria (2026)

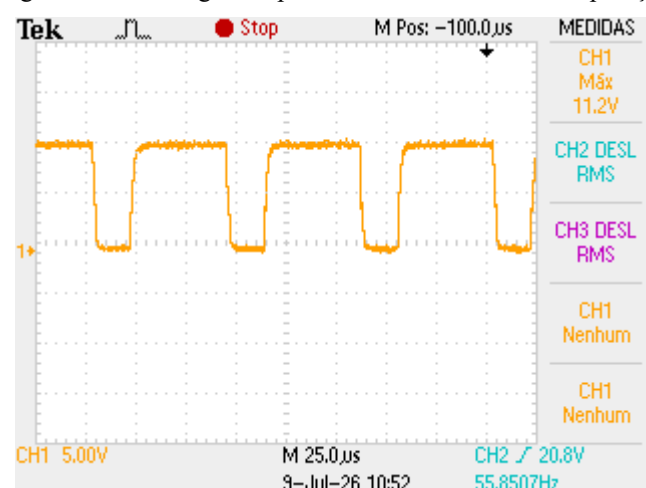
Figura 18 – Tensão no gerador (roxo) e tensão na carga (azul)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Assim, o regulador desempenha um papel crucial no controle do valor da tensão na carga, sem alterar a frequência e a fase da tensão, atuando apenas sobre o valor RMS para mantê-lo próximo de 220 V. A magnitude dessa alteração depende da razão cíclica do sinal PWM aplicado ao IGBT, apresentado na Figura 19. O sinal de comutação mostra o tempo de condução e de bloqueio do interruptor, e sua proporção determina quanto da tensão do gerador é enviada para a carga. Quando o controlador PI altera a razão cíclica, o valor eficaz na carga é alterado, de modo que a tensão terminal é mantida em seu valor desejado mesmo na presença de mudanças nas condições de operação.

Figura 19 – PWM gerado pelo controlador PI durante operação

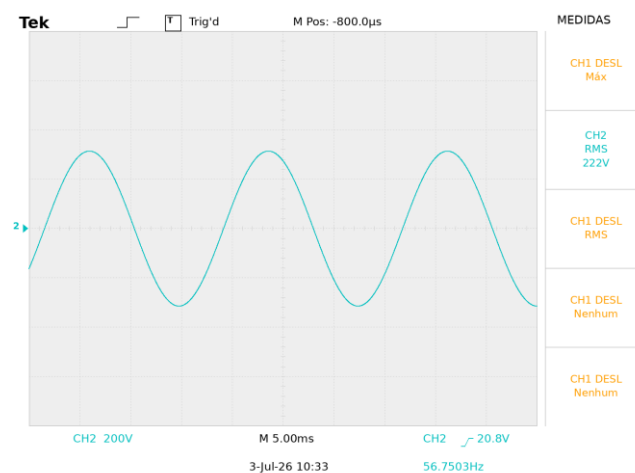


Fonte: Autoria Própria (2026)

No entanto, a comutação introduz componentes de alta frequência na tensão, sendo necessário processar o sinal antes de enviá-lo à carga. Como o IGBT é comandado a uma frequência de chaveamento de 15 kHz, o recorte da senoide faz surgir componentes espectrais

concentradas nessa frequência e em seus múltiplos, muito acima da componente fundamental de 60 Hz. Essa separação entre a fundamental e as componentes de chaveamento é o que viabiliza a filtragem: o filtro LC é dimensionado com frequência de corte intermediária entre 60 Hz e 15 kHz, de modo a deixar passar a fundamental e atenuar fortemente o conteúdo introduzido pela comutação. A Figura 20 mostra a forma de onda na carga após a ação do filtro LC. Observa-se que o filtro atenua significativamente os componentes de alta frequência decorrentes da comutação, de modo que a tensão resulta mais suave e mais próxima de uma senoide. Sem esse estágio de filtragem (filtro LC), a forma de onda da tensão na carga teria alto conteúdo harmônico, o que seria prejudicial para a carga do ponto de vista da qualidade de energia.

Figura 20 – Forma de onda da tensão na carga já filtrada



Fonte: Autoria Própria (2026)

O circuito snubber para o estágio de potência também foi considerado relevante. Ao comutar uma carga indutiva, o bloqueio abrupto da corrente leva a sobretensões e oscilações de alta frequência (ringing) no IGBT. O snubber amortece essas oscilações e limita os picos de tensão, o que protege o transistor e reduz a perturbação das formas de onda registradas.

Analisando experimentalmente os limites de operação do regulador de tensão, verificou-se que o sistema mantém a tensão na carga regulada para tensões do gerador de até cerca de 255 V. Dentro desse intervalo, o controlador PI tem margem suficiente para compensar as variações de tensão e manter a tensão de referência de 220 V na carga. À medida que o limite estabelecido é ultrapassado (acima de 255 V), o atuador chega ao limite de atuação do controle e, portanto, a capacidade de controle do atuador não é suficiente. Esse comportamento evidencia a região de operação segura e eficaz do protótipo e o ambiente de operação típico do gerador de indução na configuração atual.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O objetivo deste trabalho foi projetar e implementar digitalmente um regulador de tensão para um gerador de indução autoexcitado operando na configuração Fukami em uma conexão bifásica. Os três subsistemas que formam a solução foram integrados durante o desenvolvimento: circuito de medição (baseado no circuito de aquisição que fornece ao ESP32 um sinal proporcional ao valor eficaz da tensão gerada), estágio de potência (interruptor bidirecional e ponte retificadora), que altera a tensão entregue à carga através de um algoritmo Proporcional-Integral no microcontrolador e controle digital (no microcontrolador).

Constata-se que o regulador funciona bem para controlar a tensão na carga e a mantém estável no valor de referência de 220 V na faixa de operação avaliada. O estágio de potência reduz a tensão e mantém a forma de onda da tensão, enquanto o filtro LC e o circuito snubber a tornam eficiente para o sistema como um todo. Assim, prova-se que é possível regular a tensão de um gerador de indução isolado usando uma solução digital de baixo custo, sendo esse fato relevante, pois foi contornada a principal limitação que restringia o uso da máquina de indução como gerador: a dificuldade de manter a tensão terminal estável com a variação da carga. Com isso, abre-se a janela para o uso de geradores de indução isolados em várias aplicações, como fornecimento de emergência, atendimento a locais sem acesso à rede elétrica e aplicações portáteis em geral, explorando a robustez, baixo custo e manutenção reduzida da máquina de indução.

Como principal diferencial, o microcontrolador é usado como o núcleo do sistema de regulação para que se possam alcançar melhorias e novas funcionalidades à medida que se tornem disponíveis no futuro. Uma primeira ideia para continuidade é melhorar a aquisição da tensão nos terminais da carga do gerador usando módulos de medição true-RMS dedicados e obter leituras melhores, independentemente da forma de onda. Além disso, sugere-se desenvolver um sistema de partida suave que possa operar tanto o gerador quanto a carga para minimizar os transitórios e as altas correntes de partida. O microcontrolador pode ainda ser programado para executar uma ampla gama de funções de proteção, como o monitoramento de subtensões e sobretensões, além de uma série de ações automáticas sob condições operacionais anormais, de modo a aumentar a confiabilidade e a segurança.

Por fim, no futuro espera-se desenvolver ainda mais os recursos que o próprio microcontrolador possibilita, como monitoramento de dados e registro, comunicação sem fio para monitoramento remoto e controle em tempo real dos parâmetros de controle para explorar totalmente as capacidades de conectividade e processamento do ESP32. Essas propostas

mostram que o uso de um sistema embarcado, além da regulação de tensão, fornece uma plataforma flexível e expansível na qual várias funções de controle, proteção e supervisão podem ser adicionadas em versões futuras do regulador.

REFERÊNCIAS

- BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- BOLDEA, I. **Variable speed generators**. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 series datasheet**. Xangai: Espressif Systems, 2023.
Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 20 jul. 2026.
- FUKAMI, T.; KABURAKI, Y.; KAWAHARA, S.; MIYAMOTO, T. Performance analysis of a self-regulated self-excited single-phase induction generator using a three-phase machine. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 14, n. 3, p. 622-627, 1999.
- METELLO, E.; SILVA, F. B.; MONTEIRO, R. V. A.; RONDINA, J. M.; GUIMARÃES, G. C. Study of a self-excited three-phase induction generator operating as a single-phase induction generator for use in rotating excitation systems for synchronous generators. **Energies**, v. 17, n. 16, p. 3900, 2024.
- SILVA, F. B.; VANÇO, W. E.; GONÇALVES, F. A. da S.; BISSOCHI JUNIOR, C. A.; CARVALHO, D. P. de; NETO, L. M. Experimental analysis of harmonic distortion in isolated induction generators. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 3, p. 1245-1251, 2016.
- SILVA, F. B. et al. Application of bidirectional switches in the development of a voltage regulator for self-excited induction generators. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 98, p. 419-429, 2018.
- SILVA, L. M. F. da; SILVA, M. M. B. da; SOUSA, J. M. de; RIBEIRO, A. M.; OLIVEIRA, D. R. de; SILVA, F. B. Teste experimental da operação isolada e em paralelo com a rede do gerador de indução trifásico operando de forma bifásica. **ES Engineering and Science**, v. 15, n. 2, Edição Especial, p. 1-14, 2026. DOI: 10.18607/ES20251521806.
- SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Modeling and analysis with induction generators**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; GONÇALVES, F. A.; SILVA, E. O.; BISSOCHI, C. A.; NETO, L. M. Experimental analysis of a self-excited induction generators operating in parallel with synchronous generators applied to isolated load generation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, p. 1730-1736, 2016.
- VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; GONÇALVES, F. A.; BISSOCHI, C. A. Evaluation of the capacitor bank design for self-excitation in induction generators. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, p. 482-488, 2018.
- VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; MONTEIRO, J. R.; OLIVEIRA, C. M. R. de; GOMES, L. C.; CARVALHO, D. P. de. Feasibility analysis of the use of the generation of induction in the distributed generation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, p. 1921-1927, 2018.
- VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; OLIVEIRA, J. M. M. de; ALMEIDA MONTEIRO, J. R. B. Effects of harmonic pollution on salient pole synchronous generators and on induction

generators operating in parallel in isolated systems. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 30, p. e12359, 2020.