

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Giovani Schiavão Padovani

**Ensaio e Validação da Confiabilidade de Reguladores de Tensão de
Geradores Síncronos**

Ilha Solteira
2026

Giovani Schiavão Padovani

**Ensaio e Validação da Confiabilidade de Reguladores de Tensão de
Geradores Síncronos**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade
de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
Orientador

Ilha Solteira
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P124e Padovani, Giovani Schiavão.
Ensaio e validação da confiabilidade de reguladores de tensão de geradores síncronos / Giovani Schiavão Padovani. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
47 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2026

Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro

Inclui bibliografia

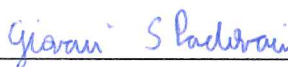
1. Regulador automático e tensão. 2. Máquinas síncronas. 3. Ensaio de AVR's. 4. Excitação. 5. Proteção de geradores.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

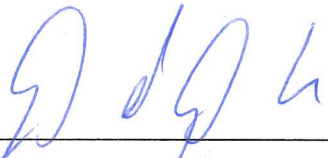
Aos treze dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e seis, o discente **Giovani Schiavão Padovani**, matriculado sob o nº 182054195, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro, o Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo e o Dr. Lucas do Carmo Yamaguti, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Ensaio e Validação da Confiabilidade de Reguladores de Tensão de Geradores Síncronos", obtendo a nota 9,3 (NOVE PONTO TRÊS) e conceito aprovado.



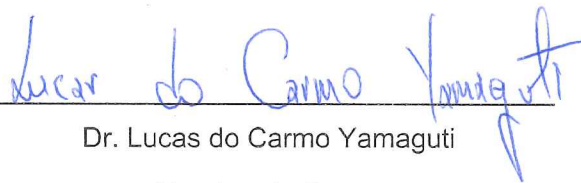
Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- orientador -



Giovani Schiavão Padovani
- discente -



Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo
- Membro da Banca -



Dr. Lucas do Carmo Yamaguti
- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

Agradeço inteiramente aos meus pais e ao meu irmão, pelo imenso apoio ao longo de toda a jornada, sem o qual a realização deste trabalho não seria possível.

A meus colegas de trabalho, pelo compartilhamento de conhecimento e pelo suporte.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo validar a confiabilidade e o desempenho de reguladores automáticos de tensão, de modo a garantir que o equipamento não apresente riscos para a operação do sistema elétrico e para isso foram realizados ensaios dinâmicos em bancada. O arranjo de teste é composto por um motor de indução trifásico, acionado por um inversor de frequência para simular o comportamento de uma turbina, acoplado a um gerador síncrono cuja excitação é realizada pelo regulador a ser testado. O painel de testes conta com instrumentos de medição de tensão, frequência e rotação, contadores de campo e de sincronismo, botão de emergência, trips externos e teste de degrau integrado, permitindo reproduzir de forma fiel as condições reais de operação e as facilidades de teste. A metodologia envolveu a parametrização do AVR seguida da execução dos ensaios de partida da máquina, estabilidade de excitação e sobressinal, resposta ao degrau de tensão, perda de referência, perda de excitação, limitação Volts/Hertz e levantamento da curva de capacidade com sincronismo. Os resultados demonstraram que as funções de controle e de proteção do regulador podem ser ensaiadas em bancada quando utilizado um painel adequado. Este trabalho contribui para a realização de ensaios dinâmicos normalmente restritos à fase de comissionamento em campo, possibilitando a identificação de defeitos ocultos e aumentando a confiabilidade dos sistemas de regulação de tensão.

Palavras-chave: Regulador Automático de Tensão. Máquinas Síncronas. Ensaio de AVR's. Excitação. Proteção de Geradores.

ABSTRACT

The present work aimed to validate the reliability and performance of automatic voltage regulators to ensure that the equipment poses no risks to the operation of the electrical system. To achieve this, dynamic bench tests were performed. The test setup consists of a three-phase induction motor driven by a frequency inverter to simulate the behavior of a turbine, coupled to a synchronous generator whose excitation is provided by the regulator under test. The test panel is equipped with instruments for measuring voltage, frequency, and rotation speed, alongside field and synchronizing contactors, an emergency button, external trips, and an integrated step test. This allows for the faithful reproduction of real operating conditions and testing facilities. The methodology involved the parameterization of the AVR, followed by the execution of tests for machine start-up, excitation stability and overshoot, voltage step response, loss of reference, loss of excitation, Volts/Hertz limitation, and plotting the capability curve with synchronism. The results demonstrated that the regulator's control and protection functions can be bench-tested when a suitable panel is used. This work contributes to the execution of dynamic tests that are typically restricted to the field commissioning phase, enabling the identification of hidden defects and increasing the reliability of voltage regulation systems.

Keywords: Automatic Voltage Regulator. Synchronous Machines. AVR Testing. Excitation. Generator Protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aspectos construtivos de uma máquina síncrona.....	13
Figura 2 – Rotor de polos lisos.....	14
Figura 3 – Rotor de polos salientes	15
Figura 4 – Sistema de excitação com anéis coletores	16
Figura 5 – Sistema de excitação brushless CA.....	17
Figura 6 – Ligação de um AVR máquina síncrona	18
Figura 7 – Curva de capacidade de um gerador	19
Figura 8 – Sinóptico do Painel para teste de AVR's.....	21
Figura 9 – Grupo motor gerador	22
Figura 10 – Dados de placa do motor.....	23
Figura 11 – Dados de placa do gerador	23
Figura 12 – Unitrol 1010 testado.....	24
Figura 13 – Configuração dos dados nominais do gerador	25
Figura 14 – Configuração da rampa de excitação	26
Figura 15 – Configuração da limitação Volts/Hertz.....	26
Figura 16 – Configuração das Dis e Dos	27
Figura 17 – Partida da máquina.....	28
Figura 18 – Rampa de excitação teste de tempo	29
Figura 19 – Parametrização para verificação do overshoot.....	30
Figura 20 – Rampa de excitação com valor inicial de 40%.....	30
Figura 21 – Medições AVR máquina a vazio.....	31
Figura 22 – Resposta ao degrau de tensão	32
Figura 23 – Perda da leitura de tensão em vazio	33
Figura 24 – Proteção da perda de referência atuada.....	34
Figura 25 – Perda de tensão excitação.....	34
Figura 26 – Perda de excitação atuada	35
Figura 27 – Limitador Volts/Hertz atuado	36
Figura 28 – Trip da função Volts/Hertz	37
Figura 29 – Proteção Volts/Hertz atuada	37
Figura 30 – Curva de capacidade da máquina a vazio	38
Figura 31 – Sincronismo sincronoscópio do Unitrol.....	38
Figura 32 – Curva de capacidade sincronizado fornecendo potência ativa	39
Figura 33 – Fornecimento de ativo e reativo	39
Figura 34 – Fornecimento de ativo e consumo de reativo	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FCR	<i>Field Current Regulator</i>
MIT	Motor de Indução Trifásico
MS	Máquina Síncrona
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PWM	Pulse Width Modulation
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

LISTA VARIÁVEIS

P = Número de polos da máquina;

n = Velocidade síncrona do motor em rpm;

f_e = Frequência elétrica.

E_a = Tensão interna gerada;

K = constante que representa os aspectos construtivos;

ϕ = Fluxo magnético;

ω = Velocidade angular.

k = Fator de enrolamento (passo);

N = Número total de espiras em série por fase;

Φ = Fluxo magnético;

P_e = Potência ativa;

Q = Potência reativa;

V_a = Tensão terminal da máquina;

E_a = Tensão interna gerada;

X_s = Reatância síncrona de eixo direto.

PO = Porcentagem de sobressinal;

$c(tp)$ = Pico do sobressinal;

$c(\infty)$ = Valor de estabilização.

SUMÁRIO

1. Introdução	9
1.1. Motivação do trabalho	10
1.2. Objetivo.....	10
1.3. Organização do texto	11
2. Fundamentação Teórica	13
2.1. Máquinas Síncronas.....	13
2.2. Regulador Automático de Tensão	17
3. Metodologia	21
3.1. Composição do painel de testes	21
3.2. Grupo máquinas rotativas	22
3.3. Equipamento e software.....	23
4. Testes e resultados	25
4.1. Parametrização	25
4.2. Partida da máquina	28
4.3. Teste de estabilidade de excitação	29
4.4. Resposta à perturbação	31
4.5. Resposta à perda de referência	32
4.6. Perda de excitação	34
4.7. Limitação Volts/Hertz	35
4.8. Curva de capacidade e sincronismo.....	38
5. Conclusão	41
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	42
Referências.....	43

1. Introdução

As máquinas síncronas ocupam uma posição de grande relevância na matriz energética global. As fontes de geração baseadas em carvão mineral, petróleo, gás natural, energia nuclear, hidráulica e biomassa são majoritariamente convertidas por geradores síncronos e representam, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), cerca de 96,1% da geração de energia em todo o planeta.

Essas máquinas rotativas não desempenham um papel crucial apenas na geração de energia elétrica. No Sistema Elétrico de Potência (SEP), elas também são extensivamente utilizadas como compensadores de reativo e compensadores síncronos. Além disso, com a inserção de novas fontes de energia, como a solar, essas máquinas têm assumido papel relevante na regulação da frequência e na manutenção da inércia do sistema.

Apesar da importância das máquinas síncronas em todo o mundo, ainda é comum que muitas delas operem com sistemas de regulação de tensão antigos, sem interface de comunicação para a supervisão remota e sem verificações periódicas que garantam a plena operabilidade do equipamento e evitem que eventos de grande escala, como o ocorrido no Sistema Interligado Nacional em 2023, se agravem ainda mais.

Em 15 de agosto de 2023, ocorreu um distúrbio no Sistema Interligado Nacional (SIN) e houve a interrupção de aproximadamente 23.368MW de carga, o que, segundo o Relatório de Análise de Perturbação (RAP-ONS-00012/2023), preparado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, representou uma perda de 34,61% da carga total e foi devido a uma queda de desempenho de parques eólicos e fotovoltaicos.

Essas variações abruptas de cargas no SEP afetam a tensão e a frequência de todo o sistema. Os sistemas de excitação dos geradores síncronos, conectados ao SIN, têm um papel relevante na estabilidade do sistema (Bulic, Sumina e Miskovic 2010). Por meio dos reguladores automáticos de tensão comumente conhecidos do inglês como *Automatic Voltage Regulator (AVR)*, as tensões nos terminais do gerador são controladas.

Para a realização de testes em fábrica dos AVRs comumente utiliza-se um

banco de resistências para a realização de testes estáticos, a fim de verificar se a capacidade estipulada pelo fabricante supre realmente as necessidades da máquina. Em contrapartida, testes dinâmicos de controle não costumam ser realizados em bancada, ficando restritos à fase de comissionamento, em que são realizados diversos ensaios para a certificação de funcionamento completo do AVR.

1.1. Motivação do trabalho

Este trabalho tem como principal objetivo a execução de testes mais profundos nos sistemas de regulação de tensão automáticos, de modo a verificar e validar seu desempenho e suas funções de proteção em um ambiente controlado, evitando problemas externos que possam interferir nos testes do AVR.

Para isso, foi utilizado um regulador de tensão configurado com todas as funções de conexão à rede exigidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2025), possibilitando não apenas a validação das proteções e do desempenho dinâmico do regulador, mas também a verificação segura do processo de paralelismo com a rede elétrica. Essa abordagem permite reproduzir, em bancada, as condições e os requisitos técnicos mínimos estabelecidos para a conexão de geradores síncronos ao sistema interligado, aproximando os ensaios realizados das exigências normativas às quais o equipamento estará sujeito quando instalado em campo.

Dessa forma, além de contribuir para a identificação antecipada de defeitos ocultos e de configurações inadequadas, o trabalho busca demonstrar que é possível validar, em ambiente controlado, tanto as funções de proteção quanto à conformidade do regulador com os critérios de sincronismo definidos pelo ONS, reduzindo os riscos associados à etapa de comissionamento em campo e contribuindo para o aumento da confiabilidade dos sistemas de regulação de tensão.

1.2. Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é validar a confiabilidade e o desempenho de reguladores automáticos de tensão (AVR) aplicados a geradores síncronos, por meio da realização de ensaios dinâmicos em bancada, utilizando um painel de testes capaz de reproduzir fielmente as condições reais de operação do equipamento e os requisitos técnicos de conexão à rede elétrica estabelecidos pelo ONS.

Para isso, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

Estruturar um painel de testes, composto por um motor de indução trifásico acionado por inversor de frequência e acoplado a um gerador síncrono, capaz de simular as condições de operação de um conjunto turbina-gerador;

Parametrizar o AVR (Unitrol 1010) com base nos dados nominais do gerador, incluindo a configuração da rampa de excitação e do limitador Volts/Hertz;

Avaliar o comportamento do regulador durante a partida da máquina, verificando a estabilidade de excitação e o sobressinal do sistema de controle;

Analisar a resposta dinâmica do AVR a um degrau de tensão de referência;

Verificar a atuação das funções de proteção do regulador diante de eventos de perda de referência e de perda de excitação;

Avaliar a atuação do limitador Volts/Hertz frente a variações de frequência que caracterizem condição de sobre-excitação;

Levantar a curva de capacidade do gerador e verificar o processo de sincronismo com a rede elétrica, incluindo o fornecimento e o consumo de potência ativa e reativa;

Contribuir para a identificação antecipada de defeitos ocultos e de configurações inadequadas no AVR, reduzindo os riscos associados à etapa de comissionamento em campo.

1.3. Organização do texto

O Capítulo 1 deste trabalho consiste na motivação inicial para a realização de teste dinâmicos e a contextualização sobre a importância das máquinas síncronas para o sistema elétrico.

No Capítulo 2 é revisada a bibliografia de máquinas síncronas juntamente com o funcionamento do regulador de tensão e suas funções.

O Capítulo 3 é dedicado à demonstração dos equipamentos que fazem parte da bateria de testes, incluindo o equipamento a ser testado.

No Capítulo 4 é realizada a parametrização do AVR como também são demonstradas as oscilografias obtidas a partir de cada um dos ensaios realizados

para garantir a confiabilidade do regulador de tensão.

Por fim, no Capítulo 5, é feita a conclusão geral dos testes realizados no capítulo anterior com as sugestões para futuros trabalhos que abordem o tema de reguladores de tensão.

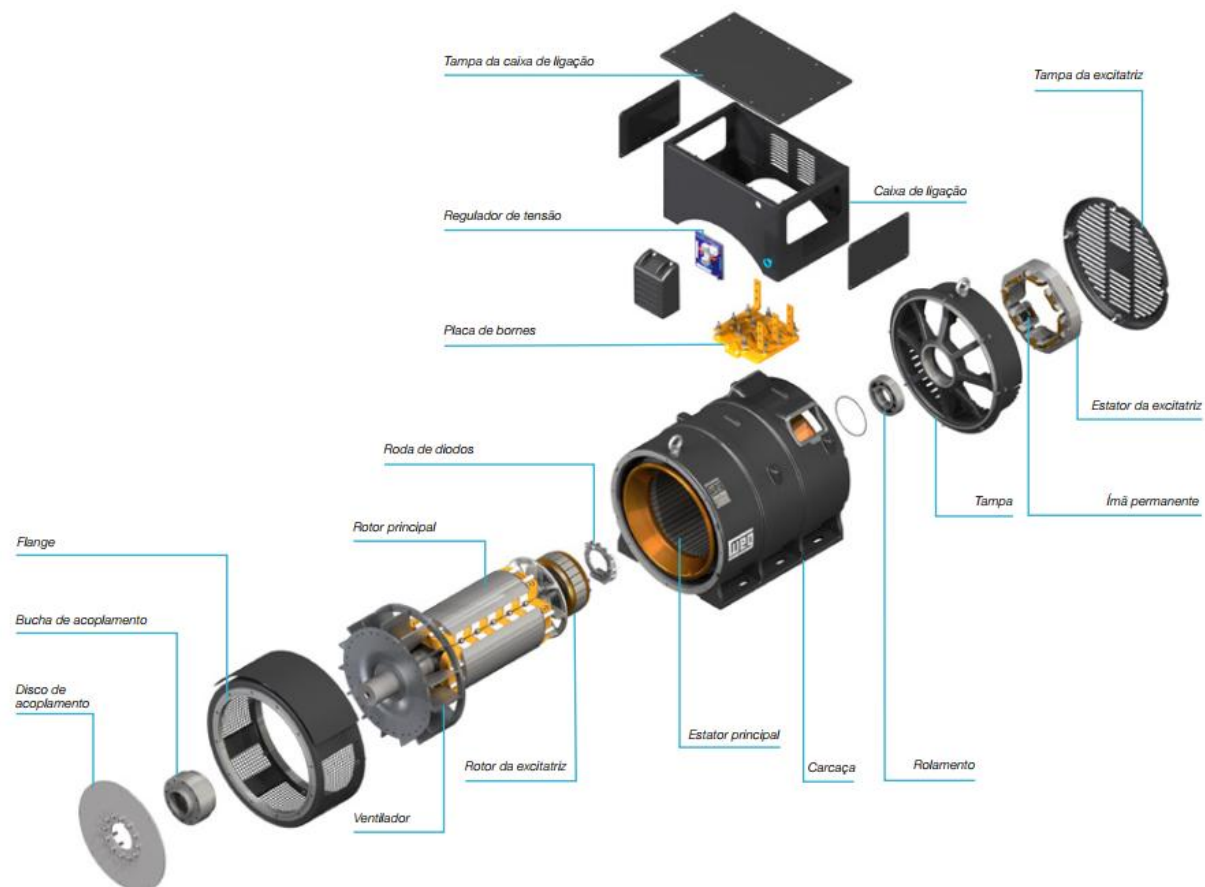
2. Fundamentação Teórica

Para a realização dos testes de um módulo AVR são de suma importância os conceitos de máquinas síncronas e da regulação de tensão para esse tipo de equipamentos, sendo assim será apresentada neste tópico uma revisão desses conceitos.

2.1. Máquinas Síncronas

Na Figura 1 são mostradas as principais partes construtivas mecânicas e elétricas de uma máquina síncrona (MS), nela é possível identificar que o rotor é completamente envolvido pelo estator da máquina, de modo que ele possa girar no seu interior de forma completamente livre e assim realizar a interação eletromagnética entre o enrolamento de campo e o enrolamento da armadura.

Figura 1 - Aspectos construtivos de uma máquina síncrona

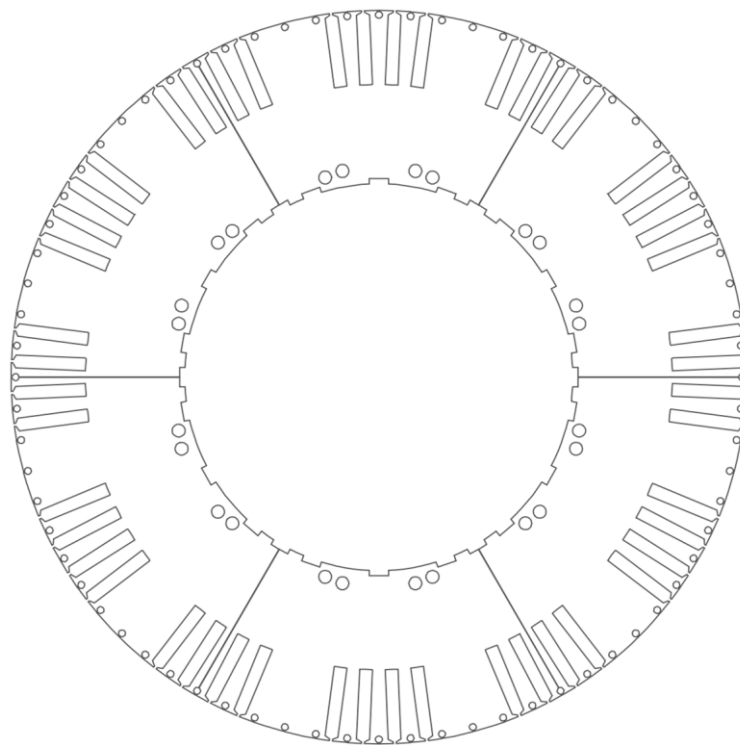


Fonte: (WEG,2022).

Uma das principais características de uma máquina síncrona é a diferença de estrutura entre rotores de polos lisos ou salientes, que definirá qual será a aplicação final possível para aquela máquina.

As MS de polos lisos, ilustradas na Figura 2, foram idealizadas para velocidades relativamente altas, e para isso é necessário estarem mecanicamente adaptadas a essa rotação, além de possuírem de dois a quatro polos para que possa ser feita sua operação nas frequências 50 ou 60Hz que são utilizadas na maior parte dos sistemas de potência do mundo (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

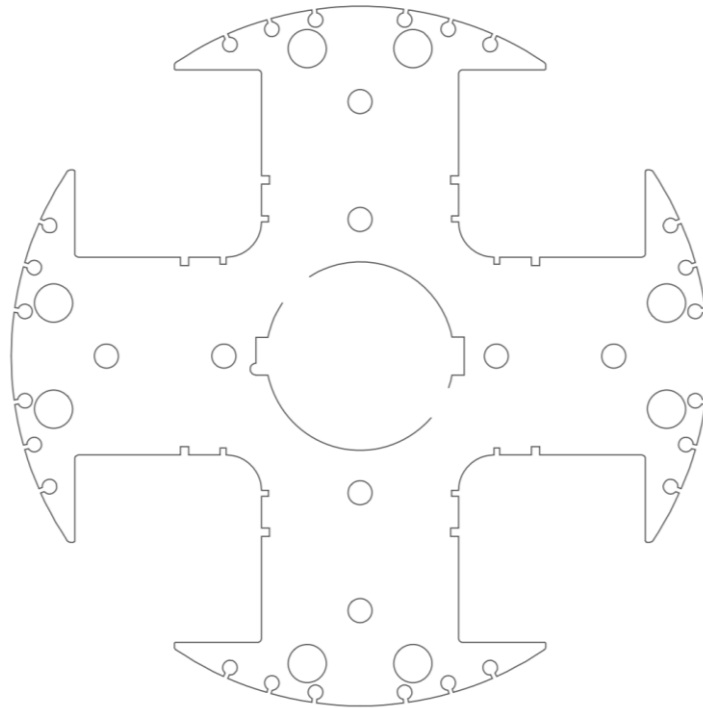
Figura 2 – Rotor de polos lisos



Fonte: (WEG,2020).

Já o rotor de polos salientes foi idealizado para uma baixa velocidade de operação e, por consequência, necessita de um número maior de polos para produzir a frequência requerida, utilizando uma estrutura com polos salientes como é visto na Figura 3 (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Figura 3 – Rotor de polos salientes



Fonte: (WEG,2020).

Independentemente do tipo de rotor, o princípio de funcionamento fundamental continuará se mantendo inalterado, baseando-se na interação entre o campo magnético girante e o campo magnético do rotor. É justamente essa a característica que faz das máquinas síncronas um conversor eletromecânico que, segundo Chapman (2013), realiza a conversão de energia elétrica em energia mecânica quando operado como motor e a conversão de energia mecânica em energia elétrica quando operando como gerador.

A principal característica dessas máquinas é sua definição de sincronismo, que significa que a frequência elétrica está diretamente vinculada à velocidade mecânica de rotação, como pode ser visto na Equação 1 (CHAPMAN, 2013).

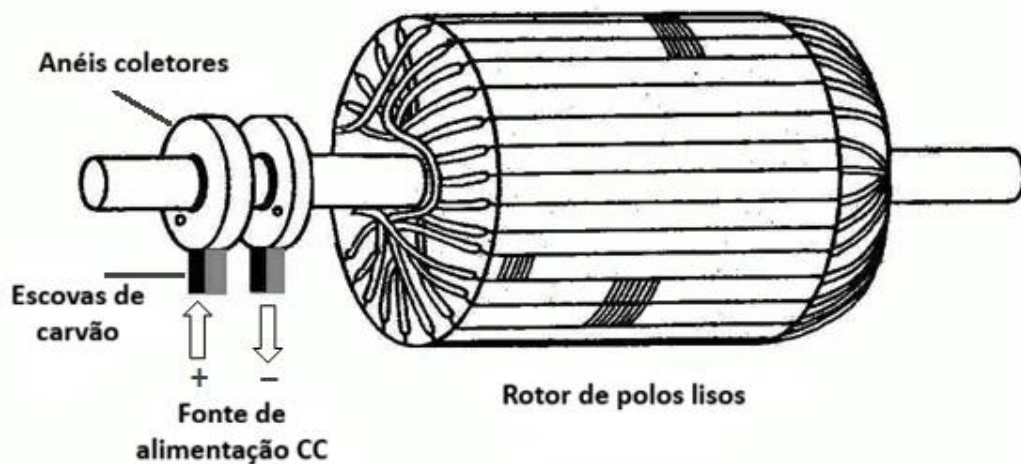
$$f_e = \frac{P \cdot n}{120} \quad [Hz], \quad (1)$$

Esse acoplamento entre velocidade mecânica e campo girante só é possível pois a máquina síncrona necessita de uma fonte CC para o fornecimento da corrente de campo magnético (CHAPMAN, 2013). Entretanto, para que seja possível o fornecimento da potência CC para o enrolamento de campo no rotor, há dois métodos

possíveis.

O primeiro consiste no uso de escovas de carvão diretamente em contato com os anéis coletores conectados ao eixo da máquina ilustrado na Figura 4. Essa configuração é a mais confiável tendo o menor tempo de resposta para a atuação do controle.

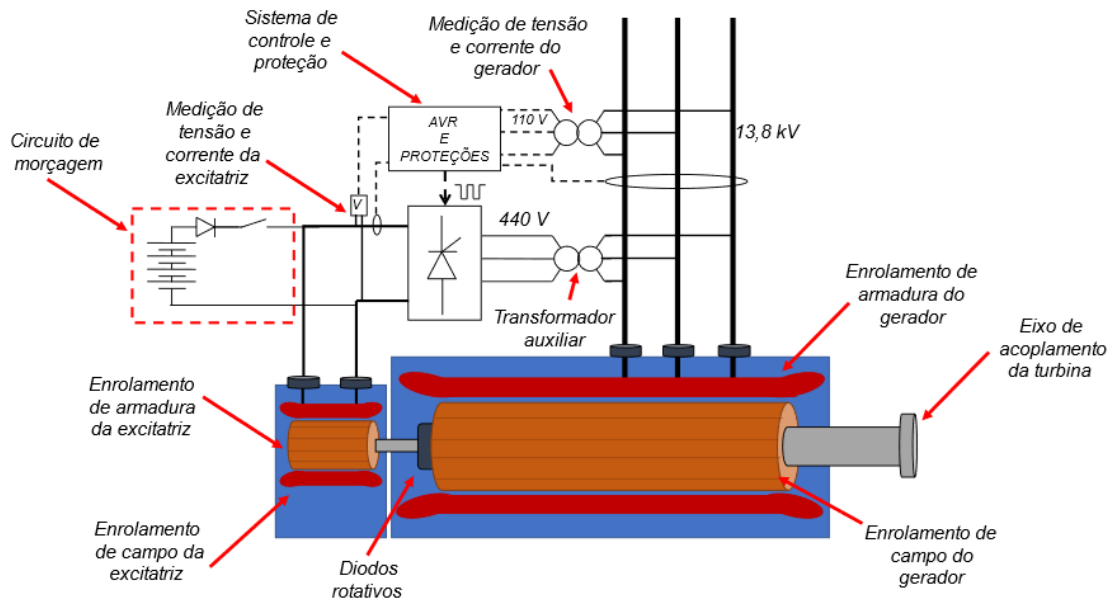
Figura 4 - Sistema de excitação com anéis coletores



Fonte: Adaptado de ELECTRICAL ACADEMIA (2018).

O segundo tipo utiliza excitatrizes sem escovas, ou o termo mais utilizado do inglês, *brushless*. Nesse caso um gerador CA secundário é acoplado ao eixo da máquina visto na Figura 5. Comumente conhecido como excitatriz, este gerador possui seu circuito de campo montado no estator do gerador síncrono, e seu circuito de armadura montado no eixo do rotor conectado a um retificador de diodos trifásicos que faz a retificação da corrente CA da excitatriz para corrente CC requerida no enrolamento de campo da máquina principal.

Figura 5 - Sistema de excitação brushless CA



Fonte: (SOARES, 2023).

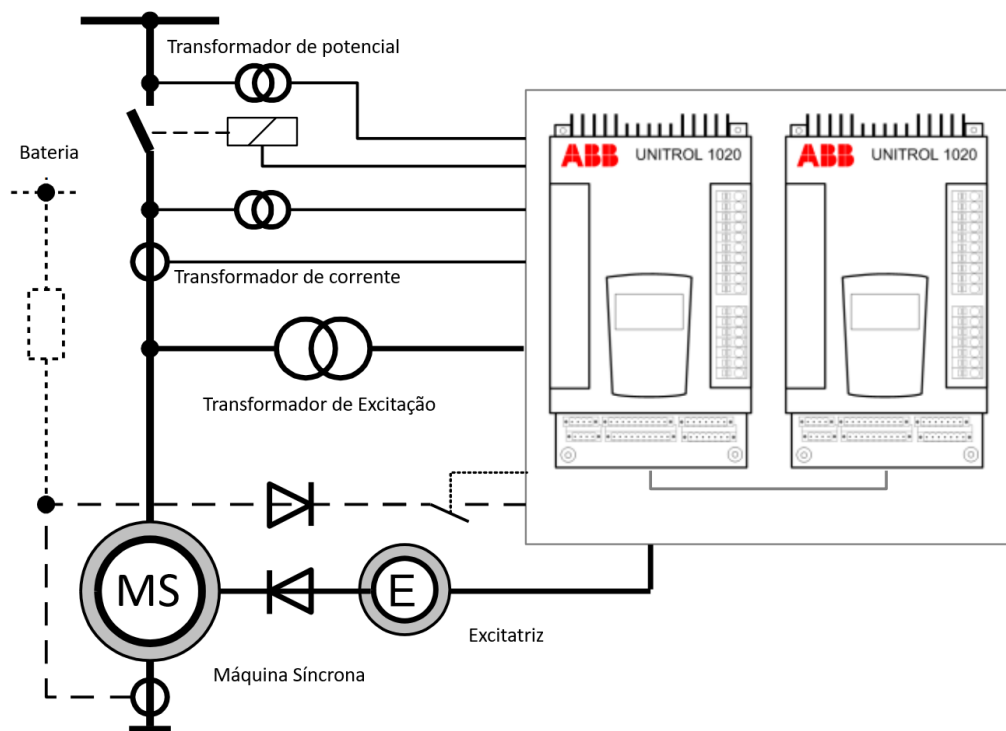
2.2. Regulador Automático de Tensão

Os reguladores automáticos de tensão são dispositivos eletroeletrônicos que são responsáveis pelo controle, excitação, regulação e estabilidade da máquina fazendo com que sua operação seja mantida dentro dos limites operacionais estipulados pelo fabricante. O AVR faz todas essas funções analisando a tensão gerada nos terminais da máquina e controlando por meio da corrente de excitação o fluxo magnético do gerador representado pela Equação 2.

$$E_a = K \cdot \phi \cdot \omega \quad [V], \quad (2)$$

Como um dispositivo de controle, é necessária a aquisição de parâmetros e dados do sistema em tempo real; para isso, são utilizados TPs e TCs de medição de modo a adquirir todos os parâmetros de tensão, corrente, fator de potência, frequência entre outros. Um típico diagrama de conexão do AVR ao sistema pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Ligação de um AVR máquina síncrona



Fonte: (ABB, 2016).

Além do controle e regulação o AVR também pode ser o responsável por fazer algumas proteções da máquina, é possível verificar algumas funções que um regulador pode desempenhar:

- Volts/ Hertz: A proteção contra sobre-excitação função ANSI (24) faz o monitoramento da tensão pela frequência, mostrado na Equação 3, para que em nenhum momento a corrente de excitação seja tão intensa devido à diminuição da frequência que sobreaqueça os enrolamentos e, por consequência, cause um dano à máquina.

$$Ea = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_e \cdot N \cdot k \cdot \Phi \quad [V], \quad (3)$$

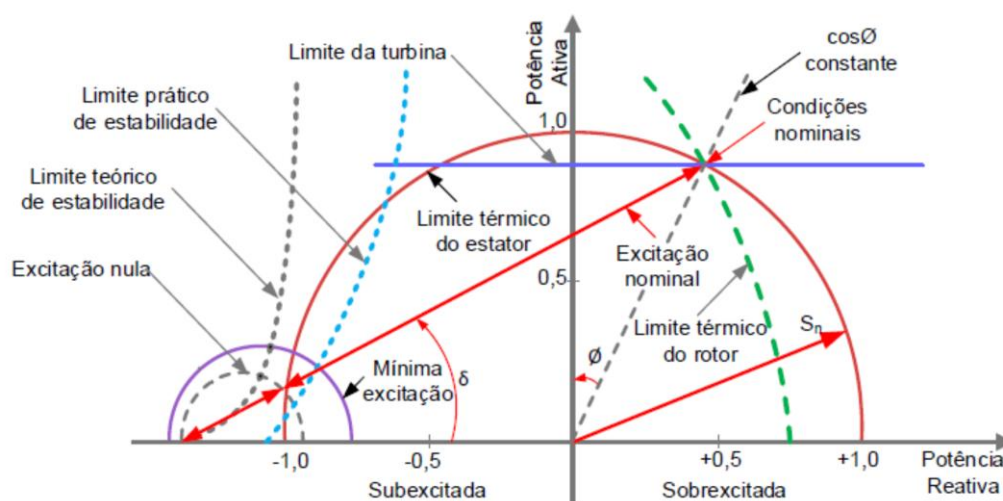
- Sincronismo (Gerador): O check de sincronismo entre a rede e o gerador faz a verificação se a diferença entre a frequência, a tensão e os ângulos de fase estão dentro dos valores aceitáveis para fazer a sincronização do gerador com a rede.
- Proteção potência reversa: A potência reversa é quando um gerador que

estava fornecendo potência para a rede começa a consumir potência da rede, fazendo a monitorização do sistema.

- Monitoramento de diodos rotativos: É o monitoramento da corrente de campo para detectar variações abruptas na corrente de excitação, possibilitando assim a detecção da abertura de um dos diodos rotativos ou até o curto-circuito.

O regulador sempre buscará manter a máquina elétrica dentro da zona segura de operação dela respeitando seus limites operacionais que podem ser convertidos em várias curvas que juntas determinam a curva de capacidade, podendo ser ela para um gerador ou para um motor no caso da Figura 7 ela representa um gerador de polos salientes (VELÁSQUEZ, 2015).

Figura 7 – Curva de capacidade de um gerador



Fonte: (VELÁSQUEZ, 2015).

- Limite Térmico do Estator: A corrente produzida na armadura do gerador provoca o aquecimento dos enrolamentos do estator e danos consideráveis podem ocorrer caso seja mantida por longos períodos.
- Limite Térmico do Rotor: Corresponde à máxima corrente do enrolamento de campo, dado que existe um valor máximo de corrente que pode fluir pelo enrolamento de armadura sem exceder as limitações de perdas no cobre por efeito de dissipação.
- Limite da Turbina: Existe uma limitação da potência primária que o gerador

pode receber da turbina. Dependendo das características da aplicação, esse limite poderá ser mais ou menos restritivo que o limite de aquecimento da armadura.

- Limite de Mínima Excitação: A restrição de um nível mínimo de excitação evita que ocorram condições de operação com fatores de potência altamente capacitivos. Evitando os níveis inferiores do limite teórico de estabilidade, o que pode provocar a perda de controle e sobreaquecimento do estator do gerador (VELÁSQUEZ, 2015).

$$P_e^2 + \left(Q + \frac{V_a^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{V_a \cdot E_a}{X_s} \right)^2 \quad [W \cdot VA], \quad (4)$$

- Limite de Estabilidade: Mais um limite para a potência ativa fornecida pelo gerador síncrono é a estabilidade do sistema. Um sistema que mantém a condição de operação perante as mudanças de carga consegue garantir a estabilidade de estado estacionário.

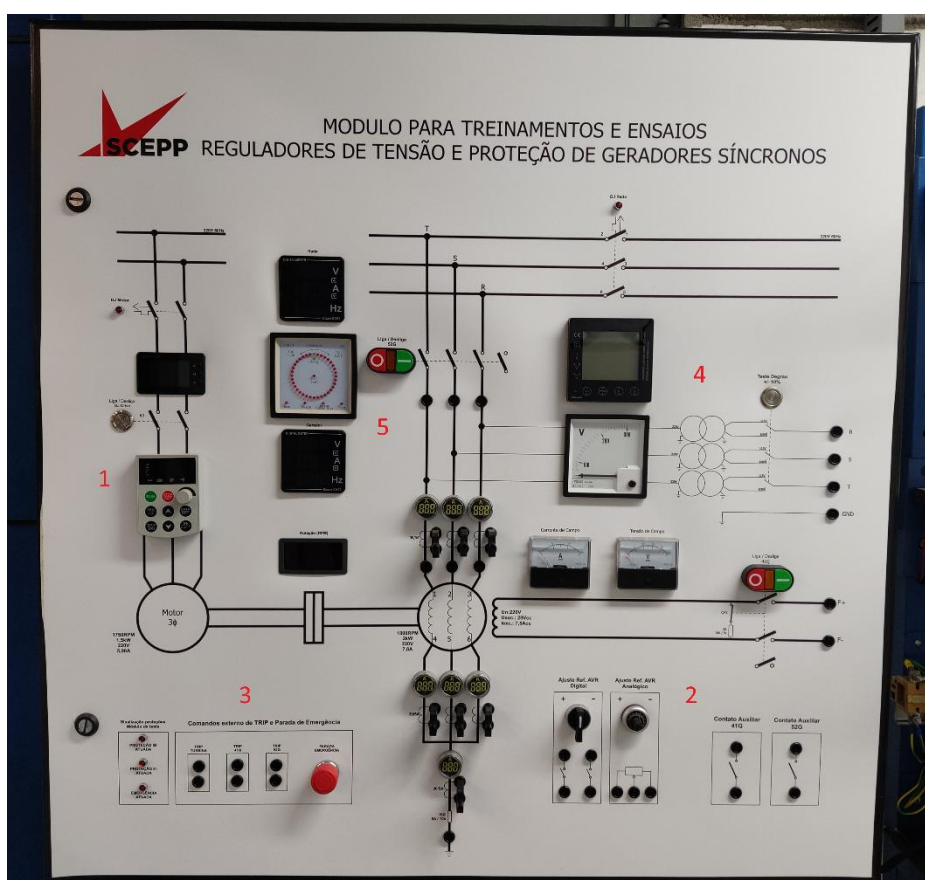
3. Metodologia

Neste item serão apresentados os componentes e arranjos desenvolvidos para que fosse possível realizar testes de AVR's, visando assegurar que o equipamento consiga suprir as necessidades para as quais foi destinado, ou identificar algum defeito oculto ou má configuração.

3.1. Composição do painel de testes

Para a realização dos testes de maneira mais fiel a uma aplicação real com gerador síncrono em conjunto com uma turbina, será utilizado um painel de testes com um sinóptico representando o diagrama trifilar de todo o conjunto juntamente com os terminais disponíveis de maneira intuitiva, como pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Sinóptico do Painel para teste de AVR's



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para descrever os elementos da Figura 8 foram atribuídos números para cada

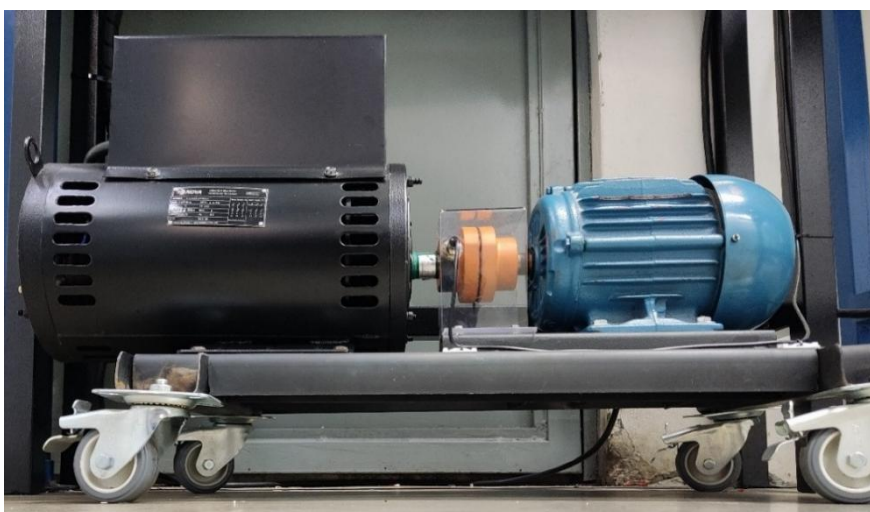
grupo de equipamentos, sendo eles:

1. Acionamento do inversor de frequência responsável pelo controle de velocidade do motor de indução trifásico (MIT);
2. Contatos auxiliares dos disjuntores de campo, sincronismo e sistemas para acrescentar e decrementar a referência de excitação;
3. Botão de emergência e trips externos para a fácil integração ao painel com reguladores de tensão e relés de proteção;
4. Teste de degrau integrado ao painel;
5. Equipamentos de medição e leitura como sincronoscópio, leitores de tensão e frequência do gerador e da rede e até mesmo leitura de rpm do conjunto gerador e motor.

3.2. Grupo máquinas rotativas

Como pode ser analisado na Figura 9, a máquina primária conectada no gerador (esquerda) é um motor MIT (direita) e no local do acoplamento protegido de acrílico é possível visualizar o sensor de rotação.

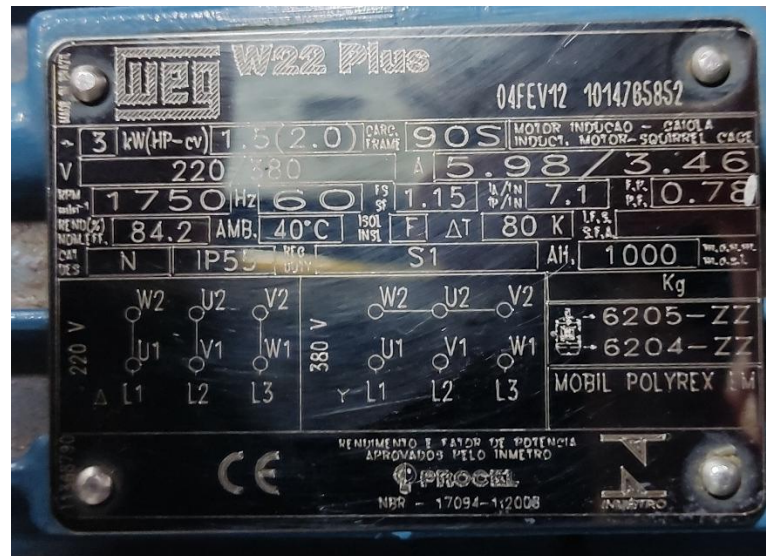
Figura 9 – Grupo motor gerador



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para que seja possível o ajuste de velocidade e de potência da máquina ao gerador, foi utilizado um inversor de frequências, simulando perfeitamente uma turbina. Os dados de placa do motor podem ser analisados na Figura 10.

Figura 10 – Dados de placa do motor



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados do gerador podem ser vistos na placa a seguir da Figura 11.

Figura 11 – Dados de placa do gerador



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3. Equipamento e software

Para a realização dos testes foi usado um Unitrol 1010 ilustrado na Figura 12,

um notebook com o *software* para configuração e monitoramento do AVR (CMT1000).

Figura 12 - Unitrol 1010 testado



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4. Testes e resultados

Este capítulo será dividido em duas partes principais. Na primeira, é apresentada a parametrização do AVR em seu software de programação e supervisão; na segunda, são apresentados os testes realizados e seus respectivos resultados para cada uma das funções de controle e proteção que se encontram disponíveis no AVR e viáveis de serem testadas no painel.

4.1. Parametrização

Para início da configuração dos parâmetros do Unitrol é necessário ter em mente que essa etapa é uma das mais críticas de todo o processo, visto que qualquer equívoco de configuração de parâmetros pode ser confundido com o mau funcionamento do equipamento e, em casos mais graves, até ocasionar um defeito fatal, com a queima do equipamento.

Na Figura 13 mostra-se a tela *System Data* no *Software* do AVR que será testado, são então inseridos todos os dados do gerador como tensão nominal, corrente nominal, corrente de excitação nominal e do módulo de testes tensão nominal da rede, relação dos transformadores de corrente e a frequência nominal da rede:

Figura 13 – Configuração dos dados nominais do gerador

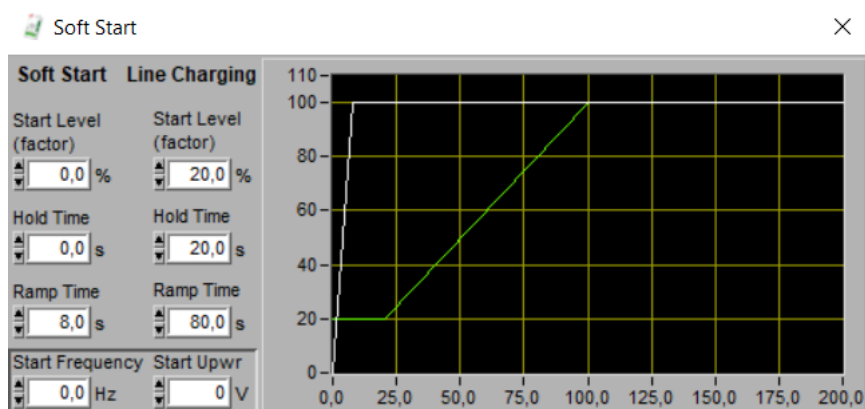
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 14 pode ser vista a tela de configuração da rampa de excitação, sendo feitos os ajustes para a curva *Soft Start*, já para a curva *Line Charging* não foi realizada nenhuma alteração em seus parâmetros visto que não é possível executar testes para carga de uma grande linha com o painel de testes.

Para a curva de partida suave *Soft Start*, foi definida uma rampa de excitação

de 8 segundos, de modo a não sobrecarregar o gerador pela repetição ensaios e possibilitar a validação do tempo de rampa.

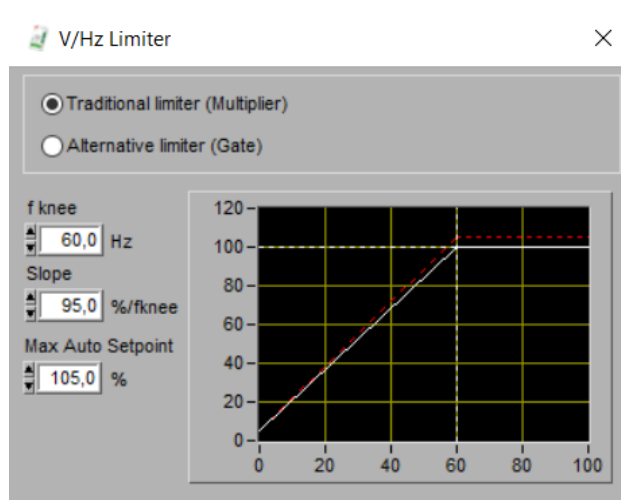
Figura 14 – Configuração da rampa de excitação



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Foi também feita a configuração da limitação por Volts/Hertz para que mais à frente seja possível fazer a verificação da atuação do AVR; nessa tela, é possível definir a frequência de corte, de modo que caso o regulador de velocidade do gerador apresente algum defeito, o regulador de tensão efetuará a proteção. As configurações possíveis na Figura 15 são básicas se comparadas a um equipamento dedicado à proteção, mas que já garante uma proteção de retaguarda caso todas as outras venham a falhar.

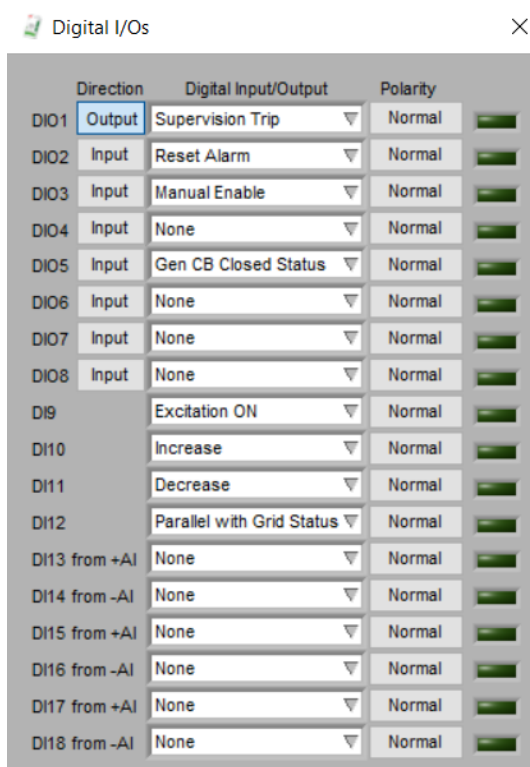
Figura 15 – Configuração da limitação Volts/Hertz



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim é necessário configurar as entradas e saídas digitais por meio da tela demonstrada na Figura 16 no *Software* de modo que o AVR consiga fazer a interface com o painel de teste:

Figura 16 – Configuração das DIs e DOs



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A descrição dos parâmetros colocados nas configurações em ordem são:

1. *Supervision Trip*: Saída de trip do Unitrol para outros sistemas;
2. *Reset Alarm*: Limpa o histórico de erros e trip para novos testes;
3. *Manual Enable*: Ativa o modo de excitação manual;
4. *Gen CB Closed Status*: Disjuntor do gerador fechado;
5. *Excitation ON*: Contator de campo fechado;
6. *Increase*: Entrada para aumentar corrente de excitação;
7. *Decrease*: Entrada para diminuir corrente de excitação;
8. *Parallel with Grid Status*: Gerador sincronizado com a rede.

Nos próximos tópicos serão apresentadas diversas telas com as oscilografias

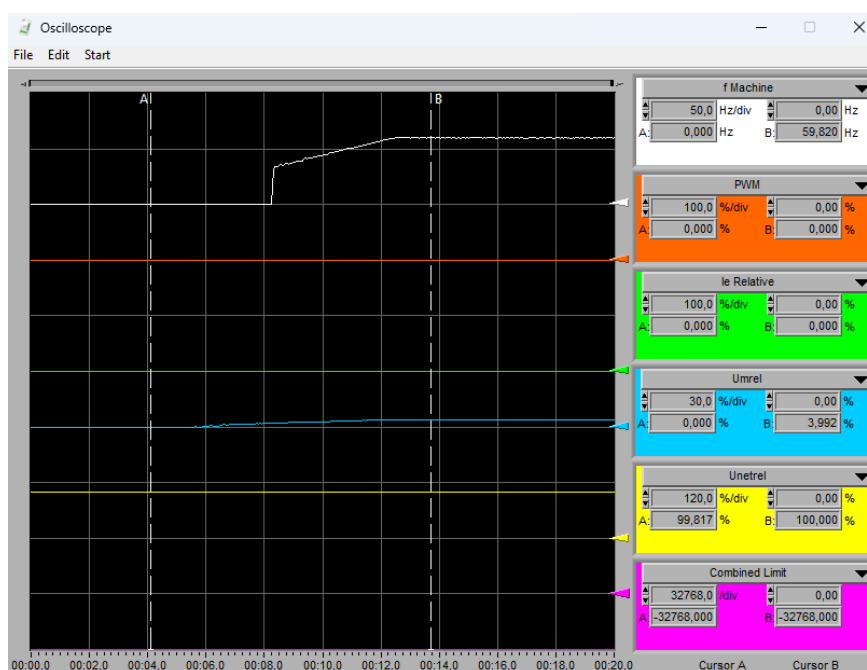
retiradas diretamente do AVR. Para o melhor entendimento dos parâmetros que estão dispostos nas figuras, é necessária a descrição do significado de cada uma delas:

1. *F Machine*: Frequência do gerador;
2. *PWM*: Largura do pulso de controle da excitação;
3. *Ie Relative*: Corrente de excitação;
4. *Umrel*: Tensão no terminal do gerador;
5. *Unetrel*: Tensão da rede elétrica;
6. *Combined Limit*: Comando de fechamento do contator de campo;
7. *AlarmTripStatus*: Comando de trip saído do Unitrol.

4.2. Partida da máquina

Para o início dos ensaios, é necessário realizar o procedimento de energização e partida. Primeiramente, liga-se o inversor e insere-se uma rampa de partida até que se alcancem 60 Hz; assim que o leitor de RPM se estabiliza, a velocidade é ajustada via pulsos até que se obtenha a rotação de 1800 rpm requerida. É possível verificar como ocorreu esse procedimento de partida pela oscilografia da Figura 17.

Figura 17 - Partida da máquina



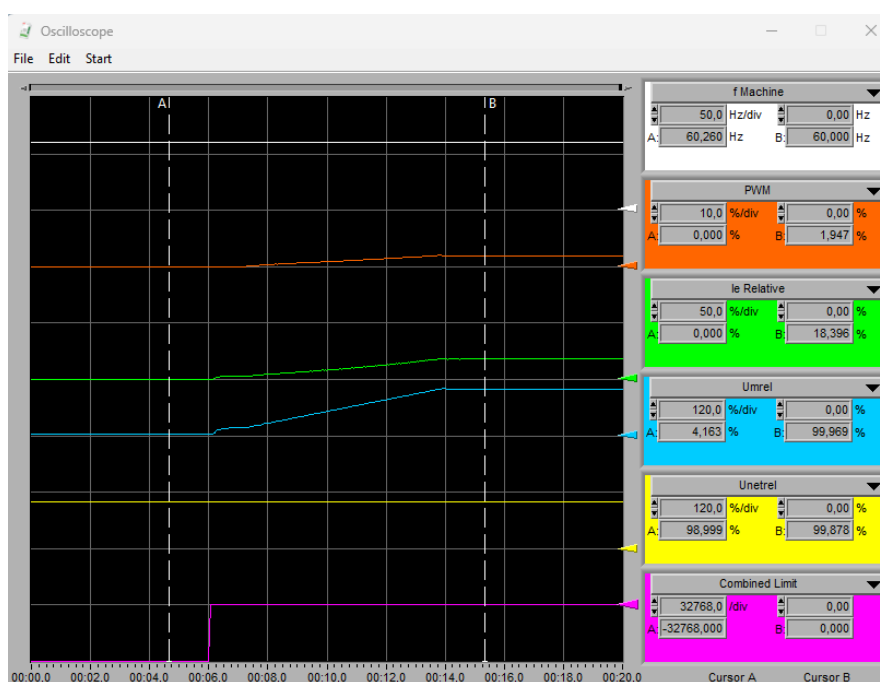
Fonte: Elaborado pelo Autor.

É possível identificar um pequeno aumento na tensão terminal da máquina, decorrente do fluxo magnético remanescente, comprovado pelo aumento de tensão nos terminais da máquina U_{mrel} que chega a 8,78 V e pela estabilização da frequência da máquina na frequência de 59,82 Hz ajustada na rampa do inversor de frequência.

4.3. Teste de estabilidade de excitação

Com a configuração da Figura 14, foi fechado o contator de campo e assim automaticamente o regulador começa a rampa de excitação levando o gerador até a tensão nominal nos 8 segundos configurados. Demonstrando assim na Figura 18 que os parâmetros configurados são rigorosamente seguidos.

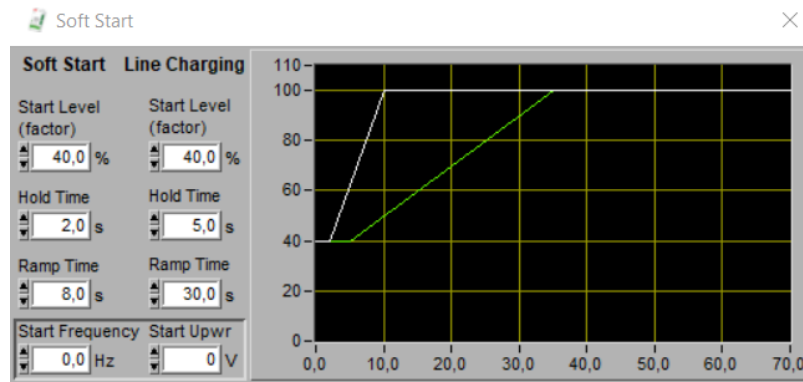
Figura 18 - Rampa de excitação teste de tempo



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com a finalização do teste voltado à verificação do cumprimento dos parâmetros configurados, foi então alterada a curva da *Soft Start* e definindo um degrau na excitação de 40% da corrente nominal por 2 segundos para então entrar na rampa de 8 segundos até chegar na tensão nominal na saída do gerador. Esses novos parâmetros mostrados na Figura 19, foram feitos de modo a verificar e identificar na malha de controle a rapidez da resposta transitória do sistema por meio da amplitude do *overshoot* verificado.

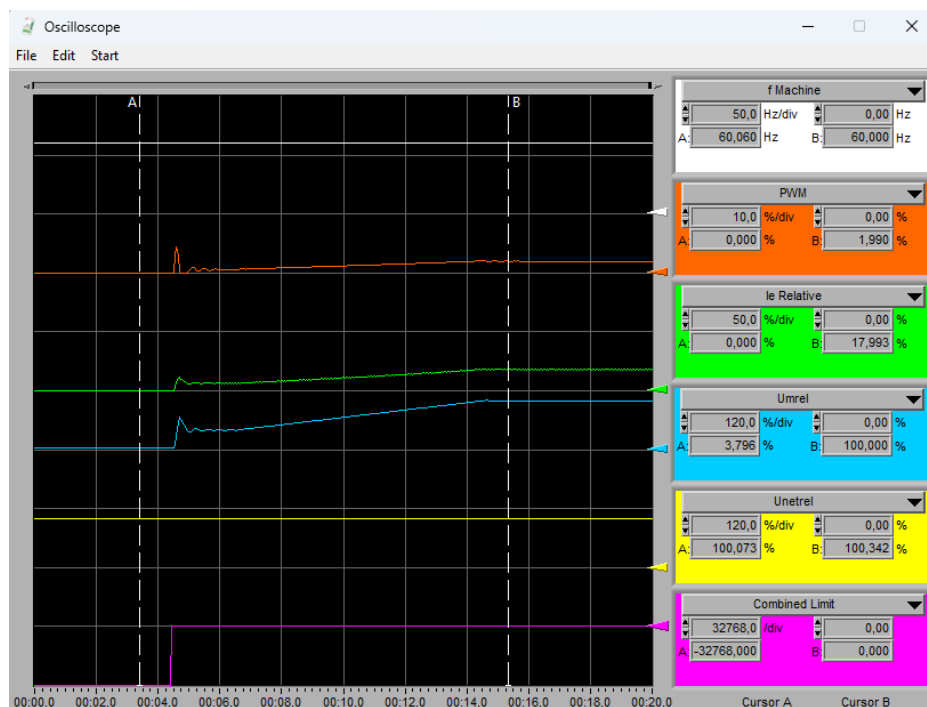
Figura 19 - Parametrização para verificação do overshoot



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Depois de parametrizada a nova curva foi iniciado o teste com o resultado demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Rampa de excitação com valor inicial de 40%



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Overshoot nominal medido foi de 138,11 V e a estabilização na tensão parametrizada foi de 87,82 V; com isso, a porcentagem máxima de sobressinal do sistema segundo OGATA (2011) pode ser calculada pela equação:

$$PO = \frac{c(tp) - c(\infty)}{c(\infty)} = \frac{138,11 - 87,82}{87,82} \cdot 100 = 57,26\% \quad (2)$$

Com um valor de sobressinal de 57,26% pode ser necessário ajustar os tempos do ganho do controlador para que a resposta fique suave visando evitar causar qualquer tipo de instabilidades no sistema. Mas isso depende exclusivamente de se a resposta ao degrau satisfaz os requisitos previstos pela ONS.

É possível acompanhar mais alguns parâmetros do regulador diretamente pela tela *Measurements* demonstrada na Figura 21, a qual disponibiliza as leituras em tempo real e de forma bem clara por meio de mostradores analógicos que mostram os valores com base nos parâmetros configurados para a máquina:

Figura 21 - Medições AVR máquina a vazio



Fonte: Elaborado pelo Autor.

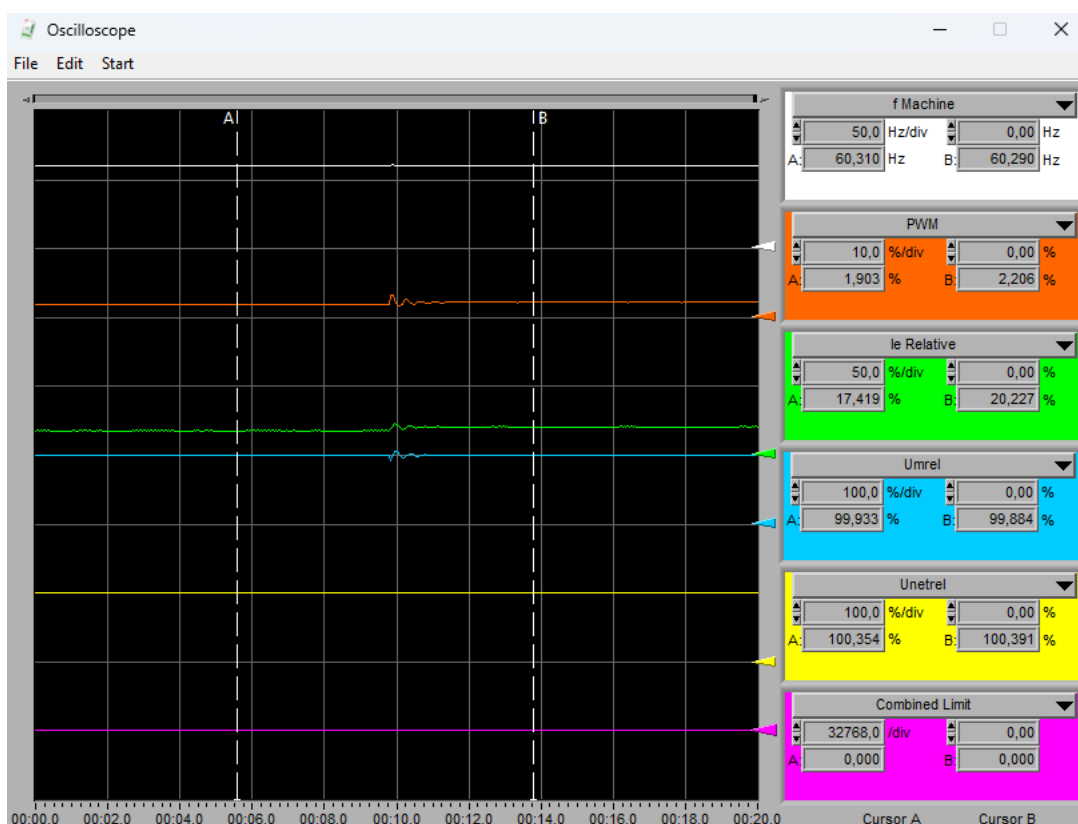
Com esses valores disponibilizados pelo AVR, são então utilizados os equipamentos de medição instalados no painel de testes e um multímetro para confirmação de que não há nenhuma leitura fora dos padrões.

4.4. Resposta à perturbação

O teste de degrau de tensão de 4,5% abaixo da tensão nominal, utilizando um transformador de potencial de dois secundários, um de 115 V e outro de 110 V, simulando uma perturbação instantânea para que assim seja possível efetuar a

verificação da resposta do sistema de controle do AVR.

Figura 22 - Resposta ao degrau de tensão



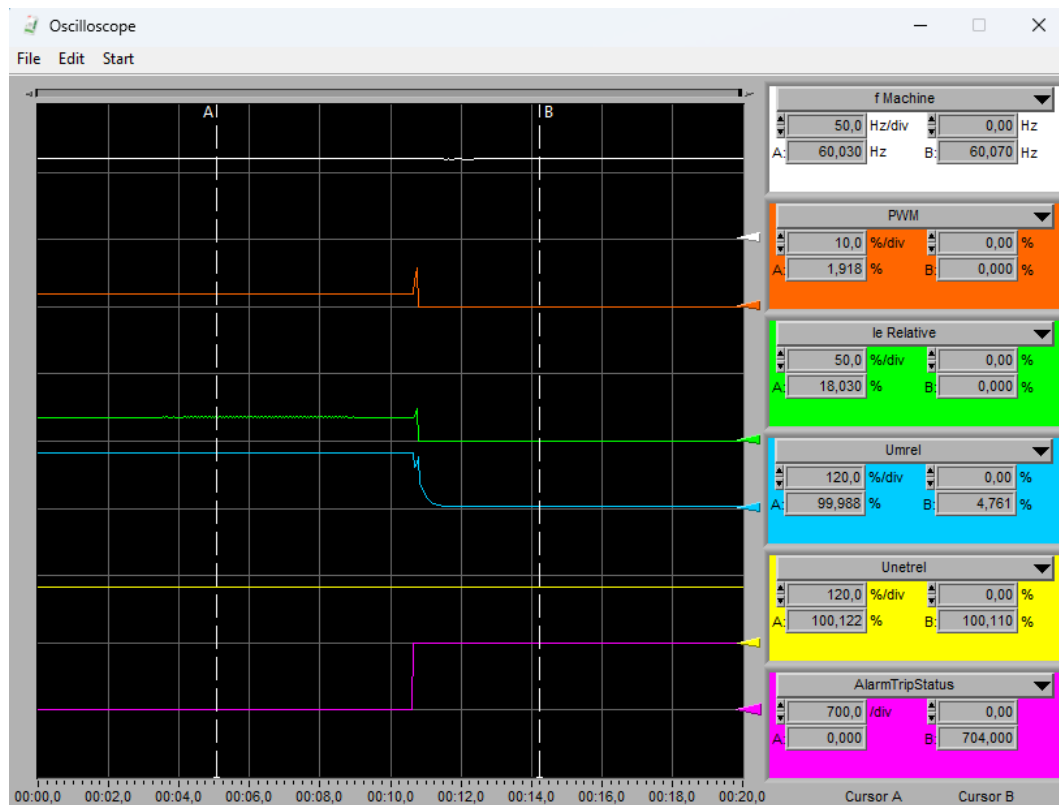
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como é possível analisar nas curvas da oscilografia da Figura 22, o tempo de resposta do regulador para ajustar a tensão no terminal do gerador é menor que 1 segundo, além disso é possível verificar que o sobressinal devido ao degrau de tensão foi de 234,69 V, que representa um overshoot foi de 6,68%, que está abaixo do limite estipulado pelo ONS de até no máximo 10% para um degrau de 2%.

4.5. Resposta à perda de referência

Para esse teste, foi realizado um ensaio de modo a verificar a reação do regulador no modo automático, com o bloqueio do modo Field current regulator (FCR), o qual faria com que o Unitrol mudasse o controle baseado em tensão nos terminais do gerador para controle de corrente de excitação, fazendo com que a proteção não seja atuada.

Figura 23 - Perda da leitura de tensão em vazio

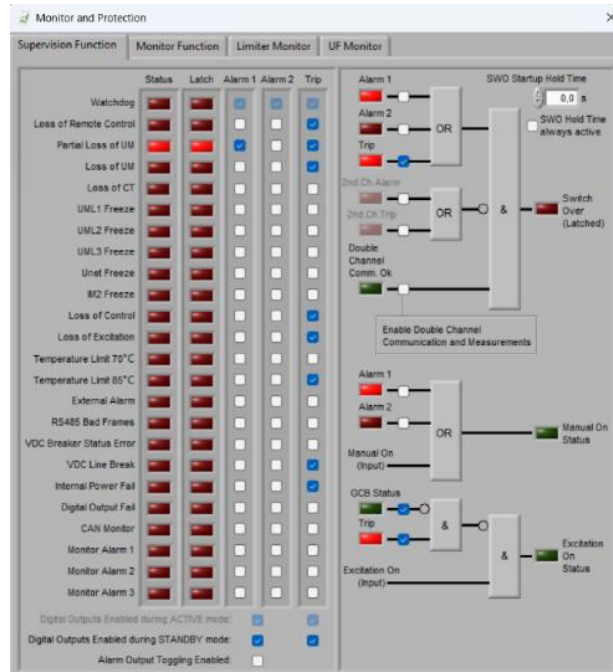


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesse caso, é possível identificar que o controle tenta compensar a queda da tensão de leitura por meio do aumento da largura de pulso do PWM, mas como a tensão do gerador continua afundando sem a resposta esperada pelo aumento da excitação, o AVR envia um trip para o sistema.

Por meio da Figura 24, fica evidente que o trip identificado na Figura 23 foi devido à identificação da perda de referência.

Figura 24 – Proteção da perda de referência atuada

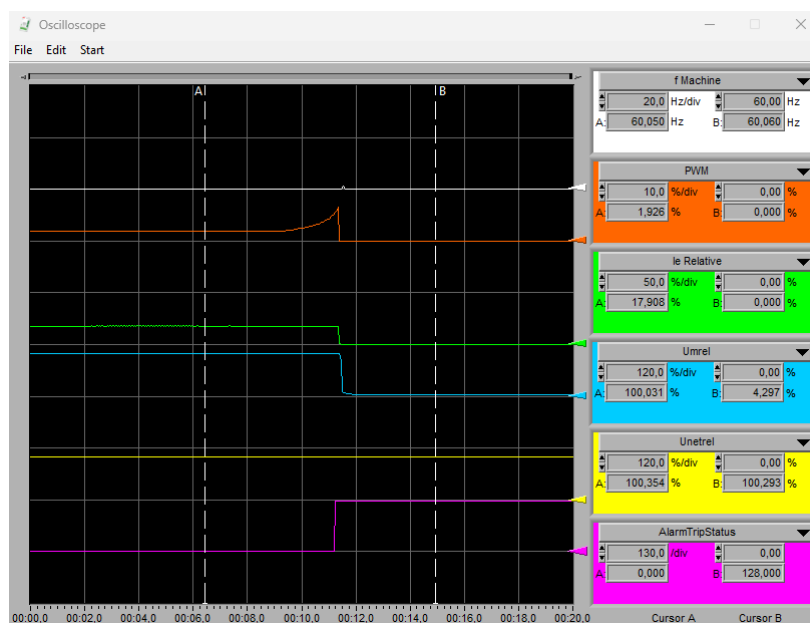


Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.6. Perda de excitação

Este ensaio foi realizado com o objetivo de verificar a resposta do AVR diante de uma eventual perda da fonte de alimentação da potência de excitação.

Figura 25 - Perda de tensão excitação

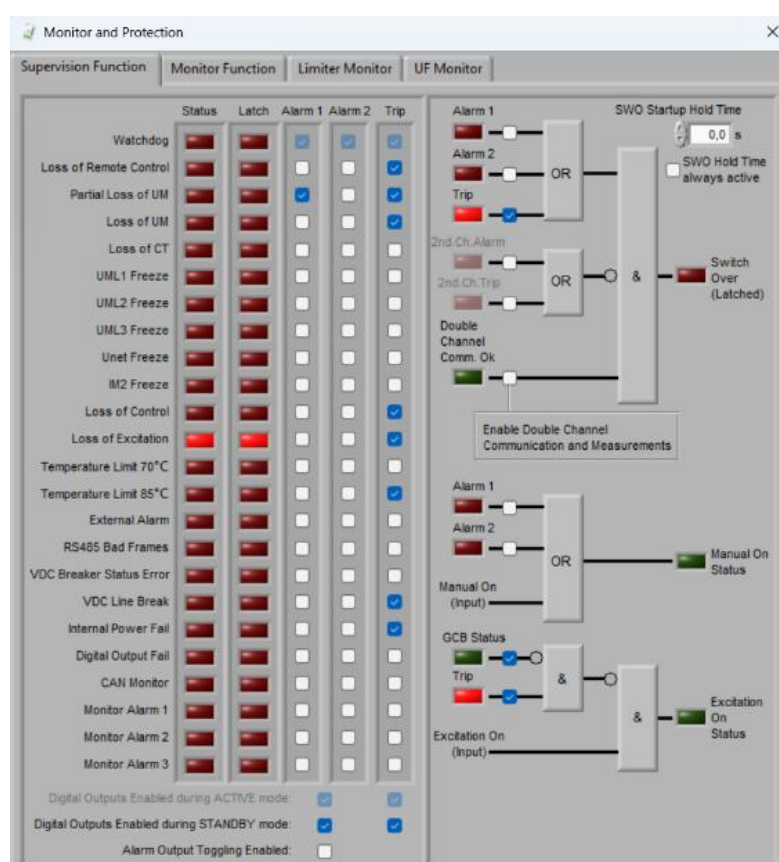


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como está explícito na oscilografia, o AVR entende que perdeu a potência de excitação e tenta compensar fazendo uma rampa agressiva no PWM de controle da excitação, mas, como não há potência nenhuma de excitação, ele atua o trip no sistema.

Em análise conjunta com o trip da Figura 25, é demonstrado na Figura 26, na tela de monitoramento e proteções, que o causador foi diretamente a perda da potência de alimentação da excitação do AVR.

Figura 26 - Perda de excitação atuada

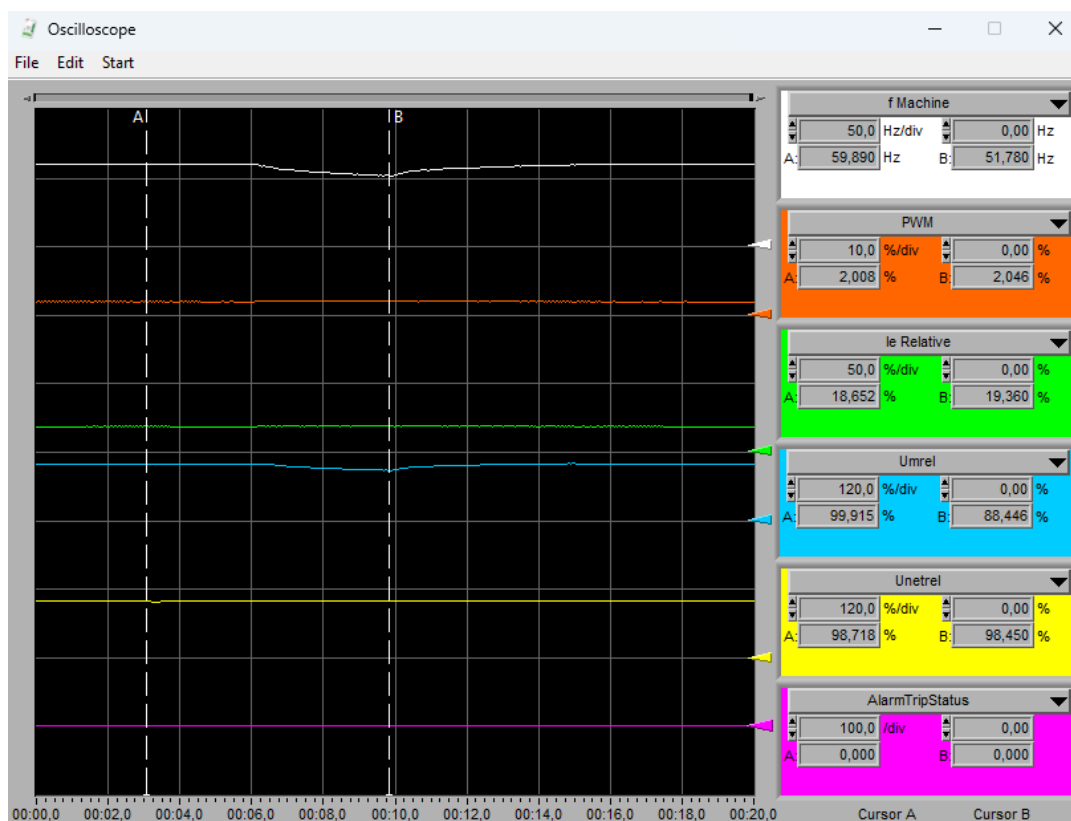


Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7. Limitação Volts/Hertz

Neste ensaio, foi reduzida a velocidade da máquina primária abaixo dos 60 Hz estabelecidos no parâmetro da Figura 15, com o propósito de simular a sobre-excitação ou perda de controle do regulador de velocidade.

Figura 27 - Limitador Volts/Hertz atuado

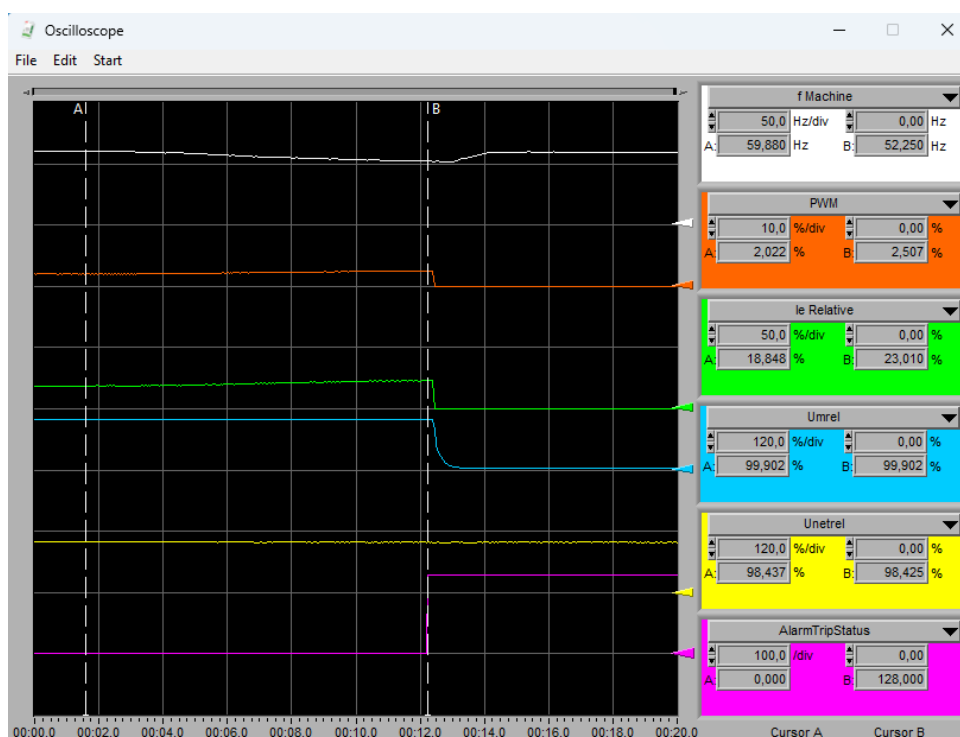


Fonte: Elaborado pelo Autor.

É constatado pela Figura 27, quando a frequência fica abaixo dos 60 Hz, o AVR não aumenta a corrente de excitação, para visando não causar nenhum sobreaquecimento no gerador.

Mudando a os parâmetros do limitador de 60 Hz para 52 Hz e adicionando o trip nesse novo valor de frequência configurado, pode-se averiguar na Figura 28 o comportamento exatamente como o esperado baseado na Equação 3 em que para compensar a queda de frequência o regulador aumenta a corrente de excitação para aumentar o fluxo magnético e assim por consequência manter o nível de tensão no terminal do gerador.

Figura 28 - Trip da função Volts/Hertz

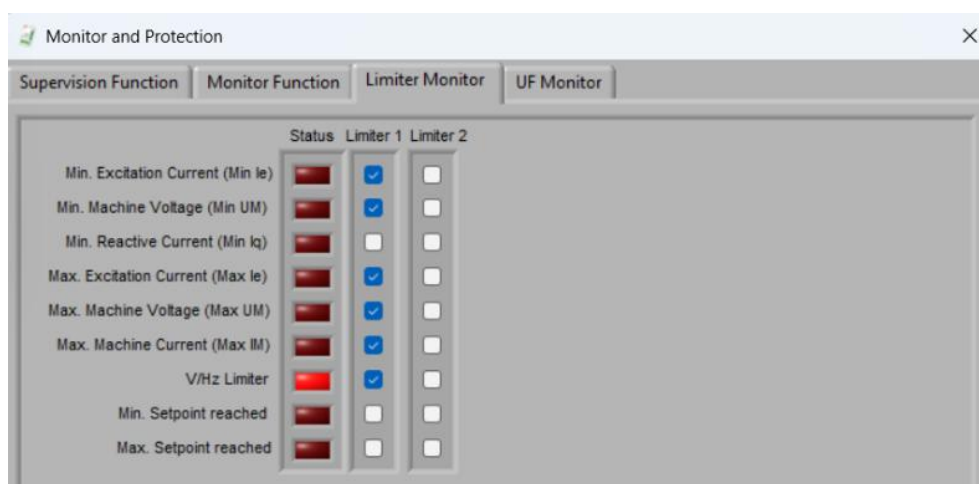


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim que a frequência atinge o valor configurado do limitador em 52 Hz é disparado o sinal de trip do regulador de tensão representado pela linha rosa, e assim todo o sistema de excitação é aberto.

Na tela de proteção da Figura 29, é comprovada a atuação do limitador de sobre-excitação.

Figura 29 – Proteção Volts/Hertz atuada

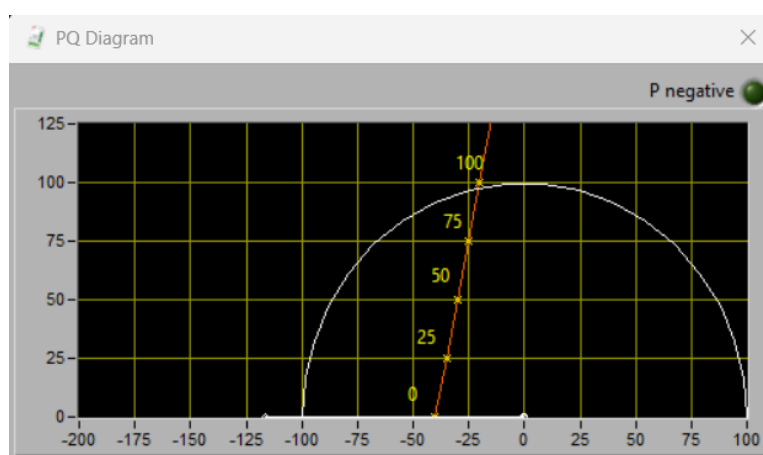


Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.8. Curva de capacidade e sincronismo

Assim como a leitura de vários parâmetros, o AVR possui uma tela dedicada exclusivamente para mostrar a curva de capacidade da máquina. Na Figura 30 é possível verificar o traçado do regulador saindo da mínima excitação até o ponto de vazio em que ele se encontra. Assim como é possível identificar a curva vermelha que representa o limitador de potência reativa.

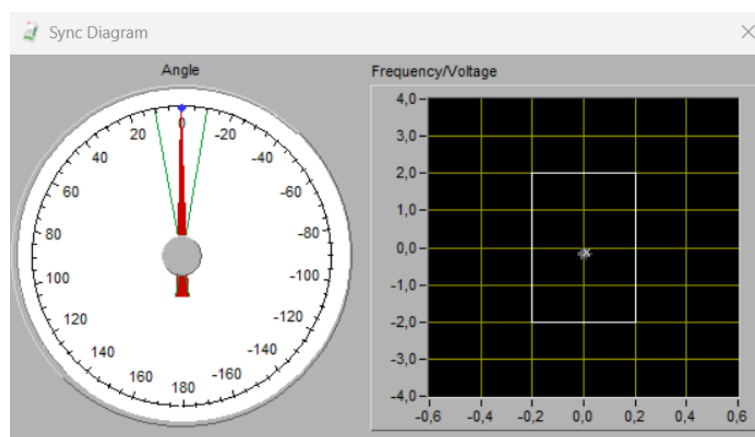
Figura 30 - Curva de capacidade da máquina a vazio



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com o gerador estabilizado na condição de vazio, foi então realizado o procedimento para sincronização na rede, ajustando frequência e tensão do gerador de modo a ficar equivalente as condições da rede para então quando o sincronoscópio indicar ângulo zero entre gerador e rede ilustrado na Figura 31.

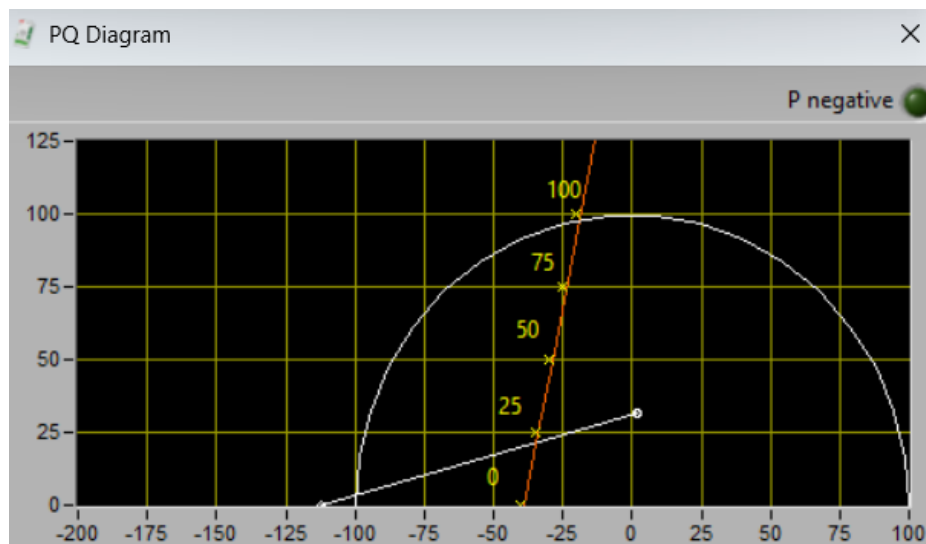
Figura 31 – Sincronismo sincronoscópio do Unitrol



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com o gerador sincronizado foi então realizado as verificações em modo FCR das leituras apresentadas pelo AVR. Como exemplificado no diagrama PxQ da Figura 32, a carga adicionada está consumindo somente a potência ativa do gerador, causando pouco desvio no eixo reativo do gráfico.

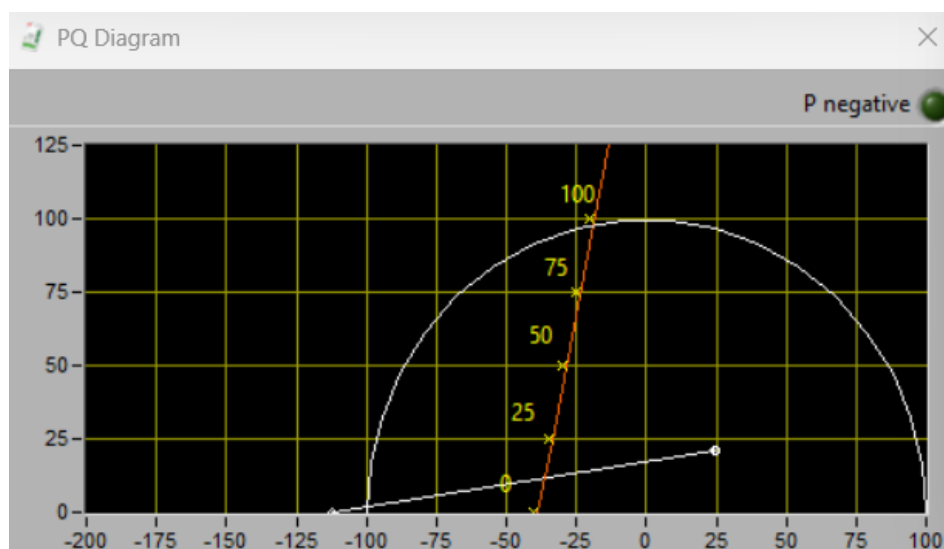
Figura 32 - Curva de capacidade sincronizado fornecendo potência ativa



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Foi então aumentado a excitação até chegar na faixa de fornecimento de 25% de reativo nominal do gerador que está sendo representado pela Figura 33.

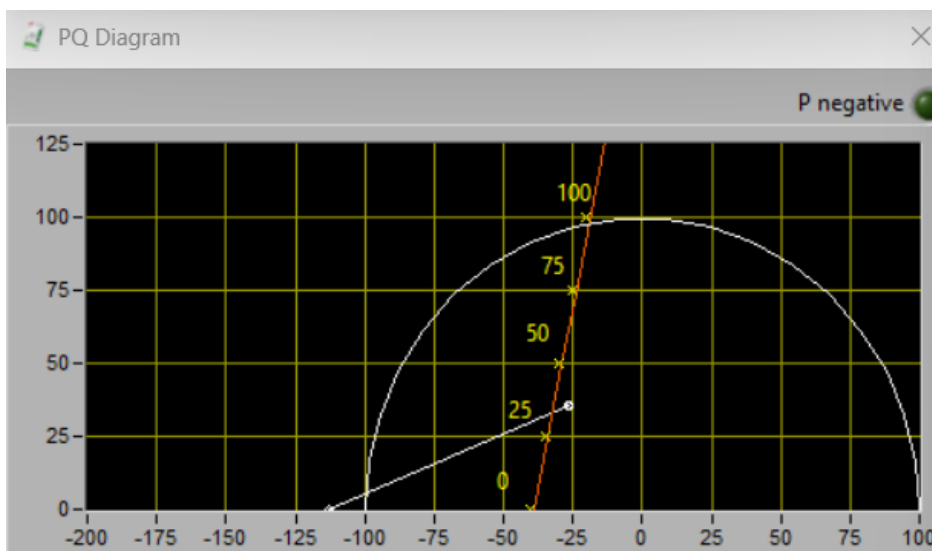
Figura 33 - Fornecimento de ativo e reativo



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para finalizar as verificações do AVR em sincronismo foi então reduzida a corrente de excitação para certificar o gerado consumindo 25% do reativo nominal demonstrado na Figura 34.

Figura 34 - Fornecimento de ativo e consumo de reativo



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5. Conclusão

Os ensaios realizados atingiram o objetivo proposto realizar a verificação e validação do desempenho e das funções de reguladores automáticos de tensão em um ambiente controlado de bancada. Com um gerador síncrono tracionado por um motor de indução acionado e controlado por um inversor de frequência, foi possível avaliar de forma integrada tanto as funções de controle quanto os limitadores e proteções do Unitrol 1010.

Os resultados foram coerentes com as configurações realizadas no AVR, de modo que se validou o cumprimento dos tempos de rampa configurados, com os 8 segundos parametrizados sendo integralmente reproduzidos pela rampa de excitação. Já nos testes de estabilidade de excitação, o sobressinal medido, de 57,26%, não demonstrou a necessidade de realizar ajustes de ganho do controlador, visto que a resposta ao degrau de tensão apresentou um overshoot de apenas 6,68%, valor dentro dos padrões exigidos pelo ONS de até 10% para um degrau de 2%. Já os ensaios de perda de referência, perda de excitação e da limitação por Volts/Hertz — este último com o trip disparando ao atingir o limiar de 52 Hz configurado no limitador — confirmaram que as proteções atuam corretamente diante de cada falha aplicada ao regulador, interrompendo o funcionamento de maneira segura. Foram também realizadas algumas verificações com carga no gerador, fazendo a verificação do fornecimento de potência ativa e reativa para a rede, bem como o consumo de potência reativa com o gerador sub excitado, com variações de até $\pm 25\%$ da potência reativa nominal em torno do ponto de operação sincronizado.

Do ponto de vista da formação de conhecimento, o trabalho destacou-se pela abrangência, ao reunir os conhecimentos das máquinas síncronas, dos sistemas de excitação, controle e algumas proteções básicas de geradores. Essa integração permitiu compreender não apenas o funcionamento do AVR, mas também a sua interação com o gerador e com os demais equipamentos do sistema elétrico de potência.

Por fim, a maior contribuição deste trabalho está na experiência de executar, em uma bancada de testes em ambiente controlado, os ensaios dinâmicos que normalmente ficam limitados à etapa de comissionamento com uma máquina real. Ao permitir a identificação de defeitos ocultos e de configurações que possam estar

inadequadas antes da instalação, esse tipo de ensaio se mostra um recurso de extremo valor para o aumento da confiabilidade dos sistemas de regulação de tensão.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para próximos trabalhos recomenda-se os seguintes testes para o aprofundamento das funções dos reguladores:

- Realizar testes de sincronismo nos modos de controle de fator de potência e regulação de tensão automática;
- Avaliar os efeitos e a funcionalidade da função Droop do equipamento;
- Implementar testes do estabilizador do sistema de potência conhecido do inglês *Power System Stabilizer* (PSS).

Referências

- ABB. UNITROL® 1020 User Manual: Automatic Voltage Regulator – Compact voltage regulator for synchronous machines up to 20 A exciter current. Product Release 6.3xx, Rev. H, Document No. 3BHS335648 E82. Turgi: ABB Switzerland Ltd., Static Excitation Systems, Voltage Regulators and Synchronizing Equipment, mar. 2016.
- BULIĆ, N.; SUMINA, D.; MIŠKOVIĆ, M. A Comparison of Advanced Control Structures for Synchronous Generator Excitation Control. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, v. 5, n. 2, p. 473-480, mar. 2010.
- CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- ELECTRICAL ACADEMIA. Synchronous Generator | Working Principle, Types. Electrical Academia, [S. I.], 2018. Disponível em: <https://electricalacademia.com/synchronous-machines/ac-synchronous-generator-working-principle-types/>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz energética e elétrica. Rio de Janeiro: EPE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. Máquinas elétricas. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2006.
- OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. ISBN 9788576058106.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Submódulo 2.10: requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. Procedimentos de Rede, Módulo 2 – Critérios e Requisitos. Revisão 2025.02. Rio de Janeiro: ONS, 2025.
- SOARES, Luccas. Sistemas de excitação brushless para turbogeradores. TermoBlog, [S. I.], 9 mar. 2023. Disponível em: <https://termoblog.com.br/excitatriz-para-turbogeradores-sistema-de-excitacao/>. Acesso em: 21 abr. 2026.

VELÁSQUEZ, Omar Chayña. Ajuste e ensaio de sistemas de proteção de geradores síncronos. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

WEG. Alternadores síncronos: linhas G i-Plus e AG10. Jaraguá do Sul: WEG Energia, 2022. 23 p. Catálogo técnico. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/he6/h2b/WEG-alternadores-sincronos-linhas-g-i-plus-e-ag10-50048717-catalogo-portugues-br-dc.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2026.

WEG. DT-5: características e especificações de geradores. Jaraguá do Sul: WEG Energia, 2020. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracteristicas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2026.