

UMA ANÁLISE DO SISTEMA DE CONTROLE E PROTEÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS EM CENÁRIOS DE INSTABILIDADE TRANSITÓRIA

AN ANALYSIS OF THE CONTROL AND PROTECTION SYSTEM OF SYNCHRONOUS GENERATORS IN TRANSIENT INSTABILITY SCENARIOS

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE GENERADORES SÍNCRONOS EN ESCENARIOS DE INESTABILIDAD TRANSITORIA

Bianca da Silva Cardoso¹, Kátia Lopes Silva², Mauro Hemerly Gazzani³, Olavo Antônio de Oliveira Reis⁴

DOI: 10.54899/dcs.v23i93.6464

Recibido: 01/07/2026 | Aceptado: 28/07/2026 | Publicación en línea: 04/08/2026.

RESUMO

Este trabalho avalia a eficácia dos sistemas de controle e proteção de geradores síncronos diante de situações de instabilidade transitória, por meio de um estudo de caso realizado em uma usina sucroalcooleira. Os geradores síncronos desempenham papel central na geração de energia elétrica, porém estão suscetíveis a perturbações como curtos-circuitos e rejeições súbitas de carga, que podem comprometer sua estabilidade operacional. A pesquisa fundamenta-se nos conceitos de estabilidade estática e dinâmica, nos princípios construtivos e operacionais dos geradores síncronos, nos sistemas de excitação (estático, brushless e com ímã permanente), e nos dispositivos de proteção e controle, como relés, reguladores de velocidade e sincronizadores de carga. O estudo de caso aborda ensaios de rejeição de carga conduzidos na usina, nos quais os testes iniciais evidenciaram falhas de configuração nos controladores MLSC e DLSC, além da inadequação do controlador Woodward 505XT para operação sem extração de vapor, resultando em oscilações e blecaute. Após a correção da lógica de programação dos equipamentos, os ensaios subsequentes foram bem-sucedidos, comprovando que dispositivos devidamente ajustados asseguram a continuidade operacional e a proteção das máquinas mesmo diante de distúrbios transitórios.

Palavras-chave: Gerador Síncrono. Instabilidade Transitória. Rejeição de Carga. Sistema de Excitação Brushless. Proteção de Geradores. Relé SEL-300G.

¹ Graduada em Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Minas Gerais, Ituiutaba (UEMG), Minas Gerais, Brasil. E-mail: bianca.1594028@discente.uemg.br

² Doutor em Ciências Aplicadas - Engenharia Térmica, Université de Liège, Liège (Ulg), Wallonie, Bélgica. E-mail: katia.lopes@uemg.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-8930-1349>

³ Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. E-mail: mauro.gazzani@uemg.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-0562-528X>

⁴ Mestre em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. E-mail: olavo.reis@uemg.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-7896-5275>

ABSTRACT

This study evaluates the effectiveness of synchronous generator control and protection systems during transient instability events, using a case study conducted at a sugar and ethanol plant. Synchronous generators play a pivotal role in electricity generation but are susceptible to disturbances—such as short circuits and sudden load rejections—that can compromise their operational stability. The research is grounded in concepts of static and dynamic stability, the design and operational principles of synchronous generators, excitation systems (static, brushless, and permanent magnet), and protection and control devices such as relays, speed governors, and load synchronizers. The case study examines load rejection tests performed at the plant; initial tests revealed configuration errors in the MLSC and DLSC controllers, as well as the unsuitability of the Woodward 505XT controller for operation without steam extraction, resulting in oscillations and a blackout. Following corrections to the equipment's programming logic, subsequent tests were successful, demonstrating that properly adjusted devices ensure operational continuity and machine protection even in the face of transient disturbances.

Keywords: Synchronous Generator. Transient Instability. Load Rejection. Brushless Excitation System. Generator Protection. SEL-300G Relay.

RESUMEN

Este trabajo evalúa la eficacia de los sistemas de control y protección para generadores síncronos ante situaciones de inestabilidad transitoria, mediante un estudio de caso realizado en una planta de azúcar y etanol. Los generadores síncronos desempeñan un papel fundamental en la generación de energía eléctrica, pero son susceptibles a perturbaciones como cortocircuitos y rechazos repentinos de carga, que pueden comprometer su estabilidad operativa. La investigación se basa en los conceptos de estabilidad estática y dinámica, los principios constructivos y operativos de los generadores síncronos, los sistemas de excitación (estáticos, sin escobillas y de imán permanente), y los dispositivos de protección y control, tales como relés, reguladores de velocidad y sincronizadores de carga. El estudio de caso aborda las pruebas de rechazo de carga realizadas en la planta, en las que las pruebas iniciales revelaron fallos de configuración en los controladores MLSC y DLSC, así como la insuficiencia del controlador Woodward 505XT para operar sin extracción de vapor, lo que provocó oscilaciones y apagones. Tras corregir la lógica de programación del equipo, las pruebas posteriores fueron exitosas, demostrando que los dispositivos correctamente ajustados garantizan la continuidad operativa y la protección de la máquina incluso ante perturbaciones transitorias.

Palabras clave: Generador Síncrono. Inestabilidad Transitoria. Rechazo de Carga. Sistema de Excitación Sin Escobillas. Protección del Generador (SEL-300G).



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A operação confiável e segura de usinas geradoras de energia elétrica depende diretamente da preservação da estabilidade do sistema elétrico de potência, em especial os geradores síncronos. A instabilidade transitória é um fenômeno de curta duração, que ocorre após perturbações significativas como curtos-circuitos, perda súbita de carga ou geração, e mudanças abruptas no esquema de conexão da rede. Nessas condições, os dispositivos de proteção e controle dos geradores síncronos devem atuar rapidamente para mitigar possíveis danos aos equipamentos e garantir a integridade e preservação do sistema por completo.

A instabilidade transitória se manifesta quando o sistema elétrico não sustenta a sincronia entre os geradores, levando a oscilações de frequência e ângulo de rotor. Segundo Kundur (1994), “a estabilidade transitória envolve a investigação do comportamento operacional do sistema elétrico diante de grandes perturbações, determinando se ele retorna a um estado operacional estável”. Nesse contexto, a proteção deve identificar rapidamente essas situações e isolar os componentes afetados, sem comprometer a operação do restante do SEP (Sistema Elétrico de Potência).

O principal desafio em proteger geradores síncronos durante eventos transitórios está em diferenciar uma condição temporária e possível de ser gerenciada pelo controle automático de um evento com falha de alta criticidade, exigindo o desligamento imediato da máquina. Aplicar relés de distância, por exemplo, pode não ser suficiente nesses casos, pois sua atuação depende da impedância aparente, que é suscetível a ser afetada por oscilações transitórias (Horowitz, Phadke, 2008).

Segundo Mamede Filho e Mamede (2013), a responsabilidade das proteções é garantir que, diante de falhas ou perturbações significativas, haja a interrupção total ou parcial do sistema elétrico, além de disponibilizar informações úteis aos operadores para a detecção das falhas e para contribuir para a restauração do sistema. Uma proteção e controle que falha pode causar desde a interrupção indevida da disponibilização de energia até danos irreversíveis na própria máquina e nos equipamentos alimentados por ela, para tanto, os dispositivos como os relés de proteção devem ser dimensionados e configurados corretamente para sua devida função.

A escolha deste tema surge da relevância da análise do sistema de proteção e controle de geradores síncronos para proporcionar segurança e continuidade dos processos do sistema elétrico de potência. Eventos como curtos-circuitos, perda de carga ou faltas na transmissão, são

cenários onde a estabilidade do gerador corre risco de ser perdida, exigindo uma resposta rápida e eficaz da proteção e controle. A atuação inadequada ou tardia da proteção e do controle pode ocasionar em danos ao gerador, perda de sincronismo e desligamentos em cadeia na rede. Por isso, é necessário utilizar relés com lógica adaptativa, sistemas de medição fasorial (PMUs) e modelos dinâmicos que representem com alta fidelidade a performance do sistema.

Deste modo, este trabalho é relevante tanto do ponto de vista acadêmico quanto prático, contribuindo para um maior conhecimento das proteções e dos controladores de geradores síncronos em cenários de instabilidade. Neste contexto, o objetivo é trazer um estudo do ensaio de rejeição de carga e como ele proporciona realizar uma análise do sistema de controle e proteção de geradores síncronos em situações de instabilidade. Um estudo de caso numa usina de álcool e açúcar do pontal do triângulo.

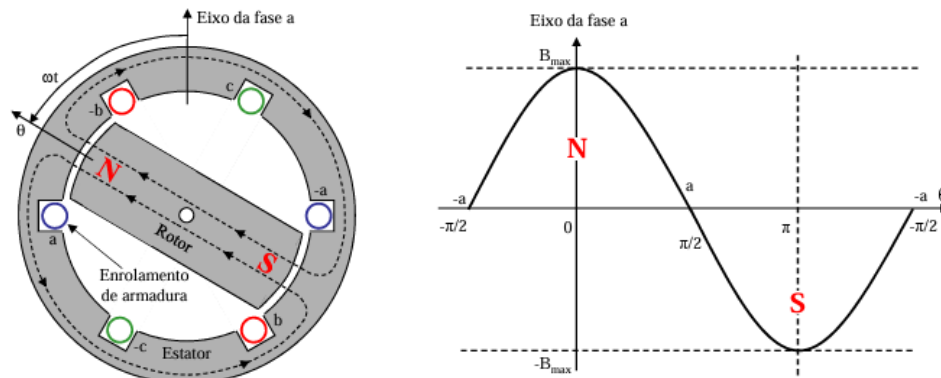
REFERENCIAL TEÓRICO

Conceitos Básicos e Princípios Geradores Síncronos

A geração de energia elétrica é majoritariamente realizada por geradores síncronos, portanto, estudar seu comportamento e possíveis falhas pode evitar instabilidades, consequentemente promovendo segurança, confiabilidade, continuidade, conformidade e flexibilidade, características fundamentais para o sistema elétrico de potência fornecer energia elétrica aos consumidores com qualidade, no instante em que for solicitada. Na geração, os geradores convertem energia mecânica em elétrica empregando algum combustível, seja fóssil, biomassa, hidráulicos ou nucleares.

Geradores síncronos são máquinas síncronas com propósito de converter energia mecânica em energia elétrica. Unidades geradoras que trabalham de forma síncrona tem a frequência elétrica produzida sincronizada ou vinculada a velocidade mecânica de rotação do gerador (Chapman, 2013). Essa máquina pode ser separada em dois componentes, ambos constituídos de material ferromagnético: rotor (parte móvel) e estator (parte fixa), visível na figura 1.

Figura 1. Rotor e estator no gerador síncrono



Fonte: Chapman, 2013

O estator possui três enrolamentos defasados em 120°. O rotor, também conhecido como enrolamento de campo, é composto por um enrolamento energizado utilizando de corrente contínua (fonte cc externa), produzindo um campo magnético constante no entreferro (B_r), colocado em movimento por uma máquina primária (turbinas a gás, a vapor ou hidráulicas) de forma que B_r tenham um movimento relativo aos enrolamentos do estator.

Entretanto, a construção do rotor dispõe também do enrolamento amortecedor, o qual apresenta-se curto circuitado, tendo como finalidade principal de amortecer oscilações de origem eletromecânica do rotor no curso de atividade da máquina. O enrolamento amortecedor pode produzir tensão ou conjugado para alinhar a velocidade síncrona com a velocidade do rotor, possibilitando o amortecimento de carga e efeitos transitórios na máquina, aumentando a estabilidade (Chapman, 2013).

Ao rotacionar o rotor, irá aparecer uma tensão induzida no estator – também conhecido como enrolamento de armadura – região que contém os enrolamentos capazes de gerar a energia elétrica trifásica. O fluxo gerado pelo rotor chega ao estator do gerador ao atravessar o entreferro, uma vez que, a cada giro mecânico do rotor, haverá um giro do campo girante – essa é a definição do sincronismo em geradores.

A velocidade em rotações por minuto (rpm) produzida pela máquina primária está diretamente relacionada com a frequência elétrica do gerador, e é inversamente proporcional ao número de polos magnéticos da máquina, segundo a equação:

$$\eta = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (1)$$

onde:

η = velocidade síncrona (rpm);

f = frequência da tensão gerada no estator (Hz);

P = número de polos.

Sistema de Excitação

O sistema de excitação do gerador síncrono é responsável por disponibilizar a corrente contínua necessária ao enrolamento de campo do rotor, garantindo assim a geração do campo magnético indispensável para o funcionamento da máquina. Esse sistema exerce papel fundamental não só ao controlar a tensão terminal, mas também ao promover estabilidade, sendo essencial tanto em condições operacionais convencionais quanto em situações de distúrbios transitórios.

Existem múltiplos modelos de sistemas de excitação, tais como os de excitação estática, excitação com excitatriz de corrente contínua e excitatriz com alternador auxiliar, sendo este último frequentemente empregado em grandes geradores devido à sua confiabilidade e capacidade de resposta rápida às oscilações na carga (Jordão, 2013; Del Toro, 1999).

Além disso, o sistema de excitação está diretamente relacionado à estabilidade do sistema elétrico, pois influencia a resposta dinâmica do gerador síncrono frente a distúrbios. Implementar reguladores automáticos de tensão (AVR – *Automatic Voltage Regulator*) proporciona a regulação da excitação com rapidez e precisão, promovendo estabilidade de tensão e suporte ao controle de reativos na rede. Sendo assim, o desempenho do sistema de excitação contribui significativamente para garantir segurança operacional e à qualidade da energia fornecida, sendo um elemento relevante a ser considerado no projeto e operação de centrais geradoras (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2006; Jordão, 2013).

Gerador a Ímã Permanente

Os geradores síncronos de ímã permanente (GSIP) são máquinas elétricas cuja excitação do campo magnético é proveniente de ímãs permanentes fixados no rotor, eliminando sistemas auxiliares como bobinas de campo alimentadas por corrente contínua, anéis coletores e escovas. Essa configuração dá origem a um equipamento mais compacto, eficiente e com menor necessidade de manutenção. Como os ímãs produzem um campo magnético constante, a indução eletromagnética gerada na armadura é fixa, tornando esses geradores ideais para cenários de uso

onde simplicidade e confiabilidade são prioritárias, como em turbinas eólicas, sistemas hidrocinéticos e geração distribuída (Vásquez, 2014; Electricity – Magnetism, 2023).

Juntamente com sua construção simplificada, os GSIPs apresentam vantagens operacionais relevantes. A ausência de perdas por excitação contribui para uma maior eficiência energética, enquanto a resposta dinâmica rápida e a eficiência operacional em baixas rotações favorecem seu uso em fontes renováveis de energia.

Contudo, como não há condições de controle direto do fluxo magnético do rotor (por ser fixo), o ajuste de tensão de saída depende do controle da carga ou de conversores eletrônicos associados. Apesar dessa limitação, a robustez e o desempenho confiável dos GSIPs têm impulsionado sua adoção em projetos modernos, especialmente em contextos em que a manutenção contínua é impraticável ou indesejável (Vásquez, 2014; Electricity – Magnetism, 2023).

Sistema de Excitação Estático

Se trata de um sistema onde o enrolamento de campo é alimentado diretamente por retificadores estáticos controlados auxiliados por tiristores, necessitando de anéis coletores acoplados ao rotor. Os anéis coletores deslizantes estão conectados a escovas que recebem tensão regulada contínua em seus terminais que, a partir do contato elétrico entre esses componentes provocado pelo giro mecânico do gerador, irá induzir o campo magnético girante da máquina.

Sistema de Excitação CA – *Brushless*

Segundo Silva (2019), o sistema *brushless* elimina a utilização dos anéis coletores e escovas ao empregar uma excitatriz acoplada ao gerador síncrono. A excitatriz é uma máquina síncrona com uma disposição de enrolamentos invertida em relação às máquinas síncronas convencionais – o enrolamento da armadura fica no rotor, enquanto o enrolamento de campo está posicionado no estator.

Conforme Silva (2016), esse sistema opera aplicando uma tensão alternada (CA) nos enrolamentos de campo do estator da excitatriz. O enrolamento da armadura, em contrapartida, está acoplado ao eixo do gerador, em movimento rotacional junto a máquina primária. A corrente trifásica gerada pela excitatriz é retificada em corrente contínua (CC) a partir de diodos montados

no próprio eixo.

Proteção e Controle de Geradores Síncronos

Proteger e controlar geradores síncronos torna possível detectar situações atípicas de operação e isolar o equipamento do restante da rede elétrica quando necessário. Em cenários de instabilidade transitória, os relés de proteção enfrentam o desafio de distinguir entre distúrbios momentâneos — podendo ser resolvidos sem desligamento — e falhas permanentes. As principais proteções aplicadas incluem: proteção contra sobrecorrente, sobretensão e subtensão, perda de excitação, sobre/subfrequência, oscilação de potência, desequilíbrio de tensão, falhas à terra no rotor e no estator, e sobre temperatura.

Entre as proteções mais relevantes em cenários de instabilidade pode-se citar a proteção contra perda de excitação, onde o campo magnético do rotor desaparece parcial ou totalmente, situação que provoca absorção de potência reativa da rede pelo gerador síncrono. Essa condição pode agravar a instabilidade e causar sérios danos ao equipamento.

Segundo o estudo de Silva (2019), relés dedicados como o PEX (Perda de Excitação) monitoram a impedância aparente do gerador para reconhecer essa falha e atuar rapidamente. Outro mecanismo importante é a proteção contra oscilações de potência, que monitora variações rápidas na potência ativa e reativa, sinalizando possíveis perdas de sincronia entre os geradores.

Estabilidade

Quanto à estabilidade do sistema elétrico de potência, esta engloba não apenas a preservação do sincronismo dos geradores síncronos e sua conexão à rede, (Pequeña, 2009), mas também a conservação das tensões dentro da faixa permitida em todos os barramentos, respeitando o limite aceitável, ainda que tenha ocorrido uma perturbação no sistema. (Heringer, 2024).

O estudo de estabilidade tem como foco principal esta resposta do sistema frente a distúrbios transitórios. É essencial que o sistema mantenha seu funcionamento correto durante essas oscilações e consiga resistir a perturbações significativas. (Kundur, 1994). Existem duas categorias dentro do estudo de estabilidade: a estabilidade estática e a estabilidade dinâmica.

Estabilidade Estática

A estabilidade estática está associada à habilidade da máquina de permanecer sincronizada com a rede frente a variações graduais na potência mecânica transmitida pela turbina ou na potência elétrica ativa fornecida ao barramento (Carvalho, 2011). É a etapa definida como regime permanente, onde não há mais oscilações de fluxo. A potência de estabilidade estática pode ser calculada utilizando equação 2, enquanto o conjugado máximo é visto na equação 3.

$$P = \frac{3.V_{\phi}.E_a.\text{sen}(\delta)}{X_G} \quad (2)$$

onde:

P = potência limite;

V_{ϕ} = tensão do barramento;

E_a = tensão interna;

X_G = reatância indutiva do gerador;

δ = ângulo de carga (relação entre potência aplicada e gerada);

$$\tau_{max} = \frac{3.V_{\phi}.E_a}{X_G.\omega_m} \quad (3)$$

onde:

ω_m = velocidade angular (rad/s).

A equação (2) demonstra que o máximo de potência na estabilidade estática surge quando o ângulo de carga se aproxima de 90°, sendo assim, o gerador deve fornecer potência até atingir esse valor (Chapman, 2013). Um δ que ultrapasse 90° indica que a potência ativa começou a decair, entrando na zona de instabilidade, provocando perda de sincronismo da máquina.

Caso durante a resposta transitória o conjugado instantâneo exceda o torque máximo, o gerador síncrono se tornará instável. A amplitude das oscilações será definida pela rapidez na qual o conjugado é imposto (Chapman, 2013). Além disso, uma reatância alta indica que o gerador deverá apresentar um ângulo de carga elevado para suprir a potência.

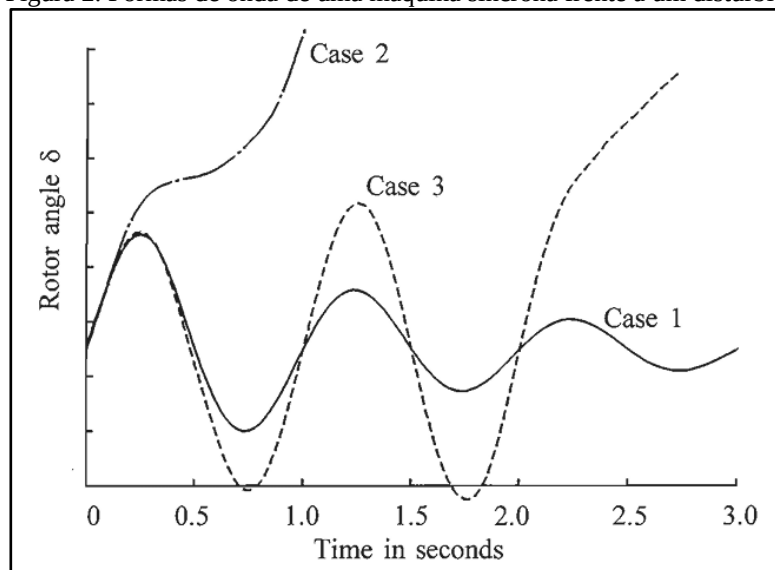
Um aspecto importante da reatância de sequência positiva das máquinas síncronas é que existem três variantes dela na máquina, sendo: reatância subtransitória - utilizada para estudos de curto-circuito; Reatância transitória: aplicada a estudos de estabilidade; Reatância síncrona-utilizada em estudos de fluxo de potência.

Estabilidade Dinâmica

O regime transitório em geradores síncronos é o período temporário em que o gerador responde a oscilações repentinas nas condições de operação, tais como variações na carga ou falhas na rede. Os primeiros ciclos desse período é o chamado subtransitório, onde são visualizadas correntes de armadura muito elevadas, que se amortecem rapidamente, sendo seguido pelo período transitório, onde a corrente amortecida vai a zero e a corrente de campo ainda é alta, porém menor que no intervalo subtransitório.

A estabilidade dinâmica é a habilidade de manter o sincronismo mesmo sendo afetado por um distúrbio transitório (Kundur, 1994). Um degrau abrupto de carga no decorrer da etapa de estabilidade dinâmica, que chegue a alcançar o valor de potência máxima definido pela estabilidade estática causaria perda do sincronismo da máquina. O trabalho de Kundur (1993) traz três casos de comportamento de uma máquina síncrona ao responder a uma perturbação, mostrados na figura 2.

Figura 2. Formas de onda de uma máquina síncrona frente a um distúrbio.



Fonte: Kundur (1994)

No caso 1, o ângulo de carga chega seu valor máximo em tempo aproximado de 0,25 segundos, reduzindo logo após, oscilando até chegar ao regime permanente. No segundo caso, o ângulo aumenta constantemente até que o gerador perca o sincronismo. Já no terceiro caso, o gerador inicia estável, porém demonstra a presença de instabilidade com o avanço das oscilações. Os casos 1 e o 2 ocorrem usualmente devido a efeitos transitórios.

A estabilidade dinâmica de um gerador síncrono pode ser colocada a teste com estudos como o estudo de rejeição de carga. Segundo Pequena (2009), o estudo de rejeição de carga consiste na desconexão do disjuntor que conecta o gerador ao sistema de energia elétrica ou à carga, podendo acontecer à plena tensão e plena carga ou em cargas reduzidas. Realizando testes como esse, se torna possível analisar a performance dos sistemas de proteção e controle dos geradores frente a cenários de instabilidade.

Equipamentos como reguladores de tensão e de sincronismo conseguem responder de forma eficiente a situações de estabilidade estática, onde mudanças nas variáveis do sistema ocorrem de maneira progressiva, entretanto, podem não ser tão ágeis em cenários de perda repentina de carga (Horowitz; Phadke, 2008), como na rejeição de carga.

É importante destacar que o sistema de proteção deve não só proteger as unidades geradoras e o sistema elétrico, mas também evitar desligamentos desnecessários. Portanto, é essencial que os relés distingam corretamente entre faltas e oscilações, e para realizar a escolha do equipamento correto e configurá-lo de forma adequada, diversas situações que o gerador e o sistema podem enfrentar são simuladas em um simulador de estabilidade transitória (Horowitz; Phadke, 2008). Assim, é possível definir, por exemplo, por quanto tempo uma máquina síncrona consegue permanecer operando com valor inferior a frequência do barramento enquanto ele busca a sincronia, sem gerar danos a máquina ou a rede.

METODOLOGIA

A pesquisa possui uma abordagem qualitativa e aplicada, estruturada em duas fases principais: (i) uma revisão bibliográfica aprofundada sobre os fundamentos teóricos de geradores síncronos, sistemas de excitação, estabilidade (estática e dinâmica) e dispositivos de proteção e controle, utilizando obras de referência como Kundur (1994), Chapman (2013) e Horowitz & Phadke (2008); e (ii) um estudo de caso único, de natureza exploratória e descritiva, conduzido em uma usina sucroalcooleira do triângulo mineiro, com coleta de dados primários obtidos por

meio de relatórios técnicos internos da empresa e observação direta dos ensaios de rejeição de carga realizados nos geradores G1 e G2.

A escolha pelo estudo de caso é justificada por sua adequação a pesquisas que buscam investigar fenômenos contemporâneos em seu contexto real, como é o caso da atuação dos sistemas de proteção e controle de geradores em situações de instabilidade transitória. A usina sucroalcooleira foi selecionada por sua relevância setorial e pela possibilidade de acesso a dados provenientes de ensaios reais de rejeição de carga. Todos os dados operacionais foram fornecidos com autorização da empresa e tratados sob sigilo, sendo utilizados estritamente para fins acadêmicos, com a identidade da organização preservada

A fase empírica do trabalho consiste na análise documental dos registros de três testes sucessivos de rejeição de carga, nos quais foram monitoradas as respostas dos sistemas de controle (AVR Unitrol F, controlador de velocidade Woodward 505-XT, sincronizadores DLSC e MLSC) e de proteção (relé SEL-300G) diante da abertura abrupta do disjuntor de conexão com a concessionária. A metodologia comparou o comportamento esperado (baseado na fundamentação teórica) com o observado em cada teste, permitindo identificar falhas de configuração e ajustes necessários.

Dessa forma, o estudo adotou um procedimento técnico de pesquisa-ação indireta, em que os dados de campo foram utilizados para validar a eficácia do sistema de proteção e controle em cenários reais de instabilidade transitória, culminando em recomendações práticas para a correção das lógicas de controle e a garantia da continuidade operacional da usina..

RESULTADOS E DISCUSSÃO: ESTUDO DE CASO

Descrição da Usina

A geração de energia elétrica para consumo próprio em uma indústria, com potencial de exportação do excedente para a concessionária local, proporciona não apenas economia, mas também representa uma fonte adicional de lucro para a empresa. Usinas sucroalcooleiras utilizam do resíduo do bagaço da cana-de açúcar na produção de açúcar e etanol como combustível para geração de vapor nas caldeiras.

O vapor seco gerado no interior da caldeira é direcionado para as turbinas dos geradores síncronos localizados na casa de força, transformando energia térmica em mecânica, e

consequentemente, em energia elétrica. A figura 3 contém a turbina e o gerador síncrono da usina em questão.

Figura 3. Turbina e gerador síncrono.



Fonte: Autores.

A usina sucroalcooleira descrita nesse estudo dispõe de três geradores síncronos cujas capacidades estão descritas no quadro 1. Estão disponíveis no quadro 2 os dados das turbinas dispostas na casa de força.

Quadro 1. Dados dos geradores síncronos.

Gerador	Modelo	Potência	Corrente	Tensão
G1	WEG-SPW1000	20MVA	837A	13,8kV
G2	WEG-SPW1120	27,5MVA	1151A	13,8kV
G3	WEG-SPW1000	20MVA	837A	13,8kV

Fonte: Autores.

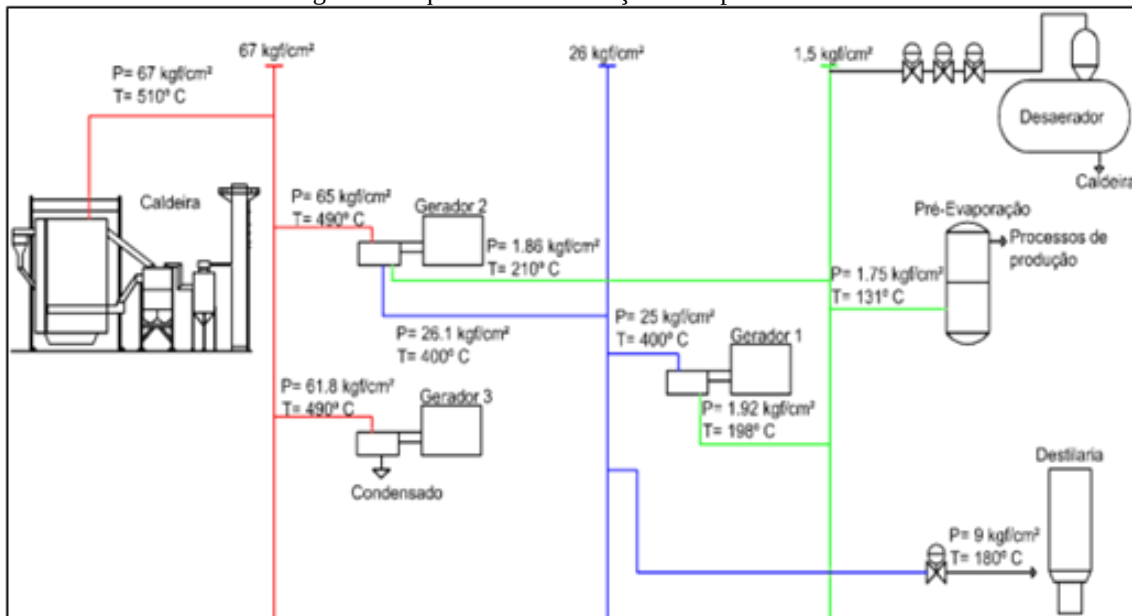
Quadro 2. Dados das turbinas a vapor.

Turbina	Modelo	Potência	Pressão
G1	TGM-TM 15000	16,66MW	25bar/350°C
G2	TGM-TM 35000A	22,86MW	66bar/515°C
G3	TGM-TM 15000	16,66MW	25bar/350°C

Fonte: Autores.

A figura 4 descreve visualmente o esquema do vapor na usina, tais como a pressão e a temperatura em cada linha. O gerador síncrono 2 (G2) se trata um gerador com extração, que desvia parte do vapor que passa por sua turbina para a turbina do gerador 1 (G1), conforme pode ser visto na linha de vapor em azul.

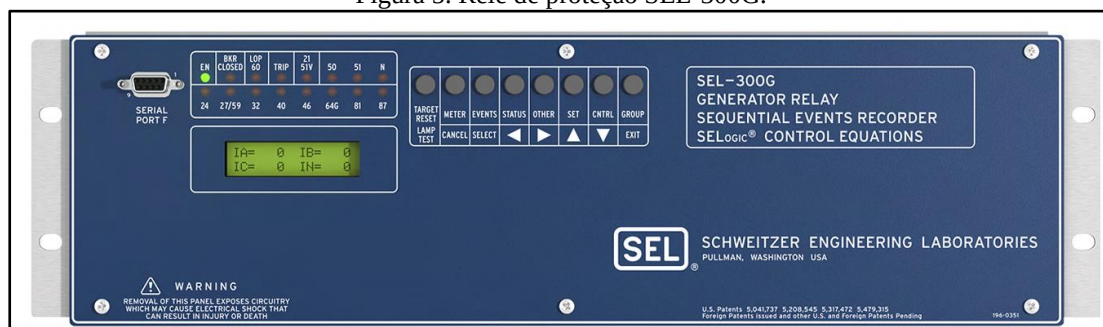
Figura 4. Esquema de distribuição do vapor na usina.



Fonte: Alves et al. (2026)

Para proporcionar uma operação segura e estável da casa de força da usina conta com equipamentos fundamentais para proteção e controle. Os geradores são do tipo *brushless*, e utilizam de um regulador de excitação (AVR). Além do AVR, dentre os componentes instalados na casa de força da usina em estudo, destacam-se o relé de proteção, o sincronizador de cargas e o controlador de velocidade, os quais desempenham papéis essenciais, mostrados na figura 5.

Figura 5. Relé de proteção SEL-300G.



Fonte: Data sheet relay SEL-300G (2021)

O relé de proteção de geradores utilizado na usina em estudo se trata do dispositivo SEL-300G, da Schweitzer Engineering Laboratories, tendo disponíveis as funções mostradas no quadro 3.

Quadro 3. Funções de proteção disponíveis no relé SEL-300G.

Nº ANSI	Descrição da Função
24	Sobreexcitação - Volts/Hertz
27	Subtensão
32	Diferencial de potência
40	Perda de excitação/campo
46	Sobrecorrente de seq. Negativa
50	Sobrecorrente instantâneo
51	Sobrecorrente temporizada
59	Sobretensão
64G	Detecção estator-terra
81	Sub/Sobrefrequência
87	Diferencial de corrente trifásico

Fonte: Autores

Unitrol F, da ABB, é um sistema de excitação (ilustrado na figura 6) com regulador digital (AVR), ponte de tiristores totalmente controlada e circuito de desexcitação com proteção contra sobretensão no rotor (ABB, 2005). Entre suas funções de controle, pode-se citar o limitador de máxima corrente de excitação, máxima corrente de estator, mínima excitação, além também de sua capacidade de controlar o fator de potência. Já nas funções de proteção, o Unitrol F conta com monitoramento de perda de excitação, contra sobrecorrente de excitação, sobretensão/subtensão e temperatura do rotor.

Figura 6. Sistema de excitação Unitrol F, da ABB



Fonte: Ebay (2025)

O controlador e regulador de velocidade 505-XT é um dispositivo configurável para operação e proteção de turbinas industriais a vapor (Woodward, 2014). O modelo 505-XT, mostrado na figura 7, foi desenvolvido para aplicações mais complexas envolvendo turbinas com extração. Esse controlador tem como principal função o controlar a velocidade da turbina,

estabelecendo a sincronização entre os geradores e a frequência elétrica da rede local.

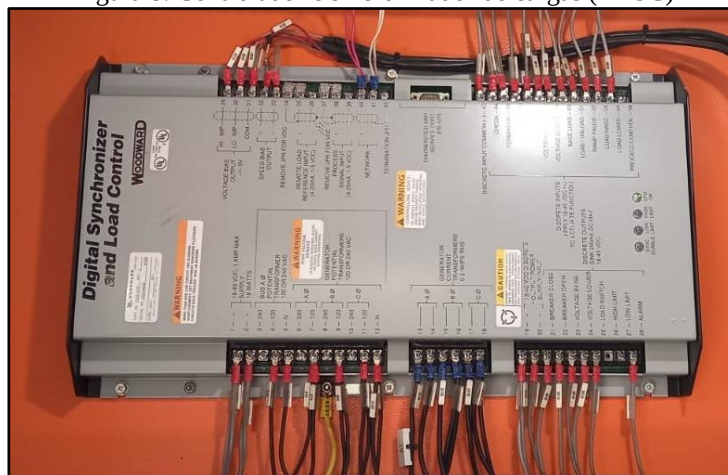
Figura 7. Controlador Woodward 505XT



Fonte: Woodward (2015)

O controlador e sincronizador DLSC (*Digital Synchronizer Load Controller*), disponível na figura 8, é digital e individual para cada gerador. O DLSC é responsável por ajustar as fases produzidas pelo gerador, buscando o sincronismo entre as senoides das fases R, S e T do gerador e do barramento. O equipamento conecta o gerador a rede com mínima variação de tensão e frequência e reduz a sobrecarga na máquina realizando a distribuição conforme sua capacidade.

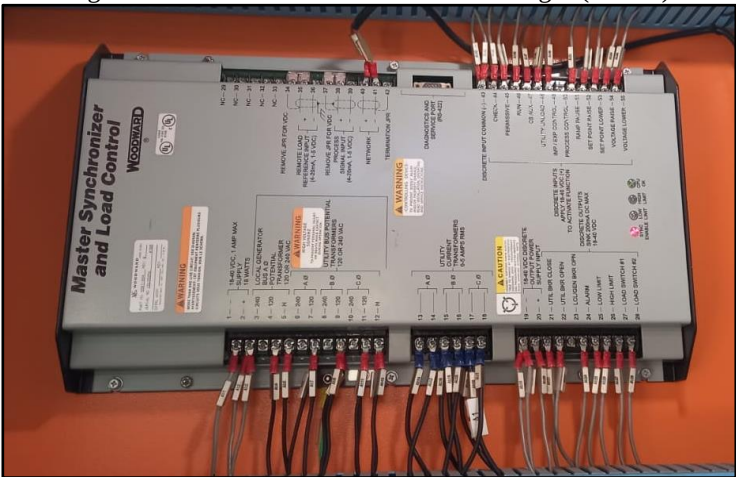
Figura 8. Controlador e sincronizador de cargas (DLSC)



Fonte: Autores.

O controlador MLSC (*Master Synchronizer Load Controller*), mostrado na figura 9, é o controlador mestre, gerenciando e controlando a carga total de múltiplos geradores.

Figura 9. Controlador e sincronizador de cargas (MLSC)



Fonte: Autores

A usina passava pela fase final de entressafra, momento de *startup* e testes dos geradores síncronos a vapor. No dia 26 de fevereiro de 2024, segunda feira, a empresa terceira especializada deu início ao ensaio de rejeição de carga nos geradores G1 e G2. Os dados de cada teste podem ser visualizados no quadro 4.

Quadro 4. Dados dos testes de rejeição de carga

Teste	Data	Resultado	Exportação (MW)	Consumo Interno (MW)	G1		G2	
					Potência ativa (MW)		Potência ativa (MW)	
1	26/02/2024	Oscilou	10	4,5	2	13%	12,5	45%
2	26/02/2024	Blecaute	10,5	4	2	13%	12,5	45%
3	27/02/2024	Ok	11	4	3	19%	12	44%
4	27/02/2024	Ok	15,5	4	5	31%	14,5	53%
5	27/02/2024	Ok	22,5	3,5	6	38%	20	73%

Fonte: Empresa (2024)

Provocar a rejeição de carga visa analisar a estabilidade das máquinas síncronas em um cenário de instabilidade gerado por falhas que desconectariam a casa de força da concessionária local, tais como curto-circuito em linhas ou ocorrência de descarga atmosférica. Nesse cenário, o gerador deveria deixar a função de base de carga, onde o operador determina um *set point* para a geração, e altera automaticamente para a função de divisão de carga.

Ao realizar o primeiro teste (mostrado na figura 10), o operador abriu o disjuntor que conecta os geradores ao transformador da subestação local. Nesse momento, a rotação das turbinas elevou, provocando forte oscilação de frequência, onde o relé SEL-300G desarmou as máquinas. Foi então analisado cada equipamento de controle, onde observou-se que os controladores DLSC estavam em divisão de carga, porém o MLSC em base de carga com *setpoint*

acima do consumo interno. A lógica de controle do controlador MLSC demonstrava status de “fechado”, para o disjuntor, não identificando a rejeição de carga.

Figura 10. Primeiro teste de rejeição de carga.



Fonte: Empresa (2024)

Revisada a lógica do controlador, deu-se início ao segundo teste de rejeição de carga, onde seu resultado pode ser observado na figura 11. Após a abertura do disjuntor, G1 desarmou, o que provocou oscilação de frequência no G2, devido ao controlador 505XT não ser desenvolvido para funcionar sem a extração, impossibilitando que este realize sua função de sincronismo gerador-concessionária. O equipamento não foi capaz de controlar a entrada de vapor na turbina, provocando instabilidade pela subfrequência. Nesse momento, ocorre blecaute na planta.

Figura 11. Segundo teste de rejeição de carga.

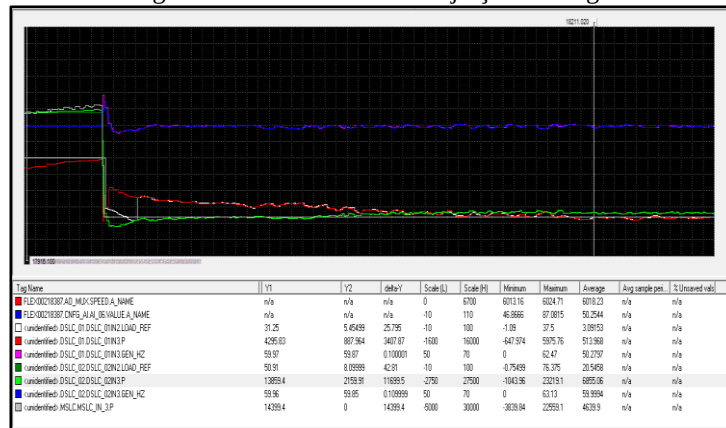


Fonte: Empresa (2024)

No dia seguinte, após a recuperação da caldeira, aquecimento das turbinas e sincronização do G2 e em seguida o G1, foi iniciado o terceiro teste (figura 12). Os sincronizadores atuaram

corretamente, ativando a divisão de carga, assim como os controladores mantiveram a estabilidade da frequência em 60Hz.

Figura 12. Terceiro teste de rejeição de carga.



Fonte: Empresa (2024)

Pode-se notar que no teste 1, a falha de configuração do MLSC resultou em oscilação de frequência, condizente com o cenário de perda de sincronismo descrito por Kundur (1994). E no teste 2, a atuação do relé SEL-300G, embora correta ao isolar o G1, expôs a limitação do controlador Woodward 505XT para operação ilhada, um ponto crítico não detalhado em sua documentação técnica (Woodward, 2014).

Os testes seguintes tiveram resultado satisfatório, demonstrando que os equipamentos de controle e proteção estão configurados corretamente para uma situação real de instabilidade transitória.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo realiza uma revisão bibliográfica sobre geradores síncronos e a resposta do seu sistema de controle e proteção diante de uma situação de instabilidade transitória. As análises feitas em um estudo de caso em uma usina sucroalcooleira tornaram possível avaliar como o sistema de controle e proteção evita perda de geração e proporciona proteção às máquinas e equipamentos.

Em síntese, a análise realizada ressaltou a relevância de testes em geradores síncronos para sua partida e conexão com a concessionária. O ensaio de rejeição de carga identificou falhas na configuração dos dispositivos de controle e proteção, onde estes não atuaram corretamente

frente à instabilidade provocada pela retirada súbita da exportação de energia elétrica.

Os especialistas conseguiram identificar o que deveria ser corrigido nos dispositivos para que o sistema possa realizar o controle das variáveis dos geradores síncronos e suas respectivas turbinas, mesmo diante de cenários de perda de uma grande carga gerando transitórios na máquina síncrona, promovendo continuidade do fornecimento de energia elétrica durante a etapa de safra na unidade.

REFERÊNCIAS

ABB. **Excitation Systems for Generators**. [S.l.]: ABB, 2005. 24 p. Disponível em: https://library.e.abb.com/public/5b3a49ac2c34d306c1257b130056e11e/GEN-EXC_E.pdf. Acesso em 01 mai. 2025.

ALVES, L. S. et al. Um Estudo de Caso da Eficácia Técnico-Econômica na Geração de Energia Elétrica em uma Usina de Açúcar e Alcool no Pontal do Triângulo. **Revista Tópicos**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 33, p. 1-36, 2026. ISSN: 2965-6672. Disponível em: https://revistatopicos.com.br/generate/pdf_zenodo/pub_778370578.pdf . Acesso em 11 jun. 2026.

CARVALHO, Elissa Soares. **Projeto e otimização de um gerador síncrono de polos lisos**. 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/95807/296897.pdf?sequence=1&isAllowed=y> . Acesso em 11 abr. 2025.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/40609060/Fundamentos_de_Maquinas_Eletricas_Chapman. Acesso em 10 abr. 2025.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Tradução: Onofre de Andrade Martins. 1999. Disponível na biblioteca da Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade Ituiutaba.

EBAY. **ABB Unitrol F Excitation System**. [S.l.]: eBay, 2023. Disponível em: <https://www.ebay.com/itm/166963127464>. Acesso em: 10 maio 2025.

ELECTRICITY – MAGNETISM. **Gerador Síncrono de Ímã Permanente**. 2023. Disponível em: <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/gerador-sincrono-de-ima-permanente/>. Acesso em: 24 maio 2025.

EMPRESA [confidencial]. **Relatório interno de serviço de campo** [informação não publicada]. [s.l.]: [s.n.], 2024. (Informação confidencial obtida por comunicação direta com o setor técnico).

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed.

Porto Alegre: AMGH, 2006.

HERINGER, Wesley Rodrigues. **Análise de estabilidade transitória em geradores distribuídos: considerações sobre a proteção 78PS**. Orientador: Marcus Vinicius Alves Nunes. 2024. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/handle/2011/16754> . Acesso em: 15 abr. 2025.

HOROWITZ, S. H., PHADKE, A. G. **Power System Relaying**. 3rd ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2008. Disponível em: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/32285/1/85.pdf>. Acesso em 24 abr. 2025.

JORDÃO, Rubens Guedes. **Máquinas síncronas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. First Edition. New York: McGraw Hill, 1994. Disponível em: <http://docente.ifsc.edu.br/klunger.beck/energia/extra/livros/kundur.pdf>. Acesso em 23 abr. 2025.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. **Proteção de Sistemas Elétricos**. 3ª ed. [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/98738135/Prote%C3%A7%C3%A3o_De_Sistemas_El%C3%A9tricos_Jo%C3%A3o_Mamede. Acesso em 11 abr. 2025.

PEQUENA SUNI, Juan Carlos. **Sobre a determinação de parâmetros de geradores síncronos para estudos de comportamento dinâmico de sistemas elétricos**. 2009. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, 2009. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1611251>. Acesso em 11 abr. 2025.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, Inc. **SEL-300G Generator Relay**. [S.l.]: SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, Inc, (2021), 20p. Disponível em: <https://selinc.com/api/download/2858/>. Acesso em 15 abr. 2025.

SILVA, A. M. B. da. **Análise do desempenho de geradores síncronos distribuídos com controladores dotados de modos de operação comutáveis**. 2016. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/18076/1/AnaliseDesempenhoGeradores.pdf>. Acesso em 05 abr. 2025.

SILVA, R. C. de O. **Estudo de caso: sistema de proteção e seletividade de turbogerador em indústria Petroquímica**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Bahia. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/34699/1/TCC_Raphael_Final.pdf. Acesso em 09 abr. 2025.

VÁSQUEZ, Francis Arody Moreno. **Análise de geradores síncronos de ímãs permanentes em sistemas hidrocínéticos**. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/17312>. Acesso em: 24 maio 2025.

WOODWARD. **505 & 505XT – Steam Turbine Controllers**. Fort Collins: Woodward Inc., 2014. 24 p. Disponível em: https://www.dsfc-technologies.com/wp-content/uploads/2017/04/WOODWARD-505-505XT_SALES-DOCUMENTATION_EN_2017.pdf.

WOODWARD. **505 Digital Governor – Technical Manual, Part 1**. Fort Collins: Woodward Inc., 2015. 158 p. Disponível em: https://www.dsfc-technologies.com/wp-content/uploads/2017/04/WOODWARD-505_TECHNICAL-MANUAL-PART-1_EN_2017.pdf