



Artigo

Desempenho Dinâmico de um AVR UNITROL 1020 em Gerador Síncrono Brushless de 13,8 kV: Avaliação Experimental em Comissionamento Industrial.

Sandro Muniz de Souza¹

1UniCesumar University, Brazil - sandromunizsouza@gmail.com

Recebido: 19/03/2026

Aceito: 13/04/2026

Publicado: 15/07/2026

Resumo: A estabilidade de tensão em geradores síncronos brushless é essencial para a confiabilidade de plantas industriais. Este artigo avalia, em condições reais de comissionamento, o desempenho dinâmico de um AVR ABB UNITROL 1020 aplicado a um gerador síncrono brushless WEG de 13,8 kV e 31,25 MVA. O método integra verificação de isolamento, inspeção do sistema de excitação, curvas a vazio e em curto-circuito, medições de vibração, registros de partida, validação supervisionada de limitadores e interpretação por modelo PID clássico. Os resultados indicaram escorvamento estável, baixo sobressinal e curta acomodação: 750 ms e 1350 ms na malha de corrente de campo, com 1,7% de sobressinal, e 350 ms e 950 ms na malha de tensão terminal, com 1,3% de sobressinal. A maior vibração global foi 2,26 mm/s, abaixo do limite de referência adotado. Conclui-se que a combinação de evidências de campo, parametrização do AVR e teoria de controle permite uma avaliação reproduzível da adequação de sistemas de excitação em comissionamento industrial.

Palavras-chave: regulador automático de tensão; gerador síncrono; excitação brushless; comissionamento; controle PID.

Experimental Evaluation of the Dynamic Performance of a UNITROL 1020 AVR in a 13.8 kV Brushless Synchronous Generator during Industrial Commissioning.

Abstract: Voltage stability in brushless synchronous generators is essential for industrial plant reliability. This paper evaluates, under real commissioning conditions, the dynamic performance of an ABB UNITROL 1020 automatic voltage regulator applied to a 13.8 kV, 31.25 MVA WEG brushless synchronous generator. The method integrates insulation verification, excitation-system inspection, open-circuit and short-circuit characteristics, vibration measurements, start-up records, supervised validation of limiters, and interpretation through a classical PID model. The results showed stable voltage build-up, low overshoot, and short settling time: 750 ms rise time and 1350 ms settling time in the field-current loop, with 1.7% overshoot, and 350 ms rise time and 950 ms settling time in the terminal-voltage loop, with 1.3% overshoot. The highest global vibration was 2.26 mm/s, below the adopted reference limit. The study concludes that field evidence, AVR parametrization, and control theory can support a reproducible assessment of excitation-system suitability during industrial commissioning.

Keywords: automatic voltage regulator; synchronous generator; brushless excitation; commissioning; PID control.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de excitação e os reguladores automáticos de tensão desempenham papel decisivo na operação segura e estável de geradores síncronos. Seu desempenho afeta diretamente a restauração da tensão terminal, o suporte de potência reativa, a prontidão para sincronismo, a resposta a perturbações e o comportamento eletromecânico mais amplo de plantas conectadas ao sistema elétrico. Em máquinas industriais e de utilidade de médio e grande porte, a dinâmica da excitação não constitui uma função auxiliar secundária, mas um elemento central da confiabilidade operacional.

Na literatura técnico-científica, a regulação automática de tensão é frequentemente analisada por meio de modelagem matemática, sintonia por simulação, estimação de parâmetros ou comparação entre controladores clássicos e avançados. Tais estudos demonstram que o desempenho do sistema de excitação está fortemente associado a indicadores dinâmicos como tempo de subida, tempo de acomodação, sobressinal, amortecimento e robustez frente a distúrbios.

Apesar disso, permanece uma lacuna relevante entre o tratamento científico da dinâmica de excitação e a forma como as evidências de comissionamento são usualmente documentadas na prática industrial. Relatórios de campo frequentemente confirmam a partida bem-sucedida e a operação aceitável, mas nem sempre organizam as observações em uma estrutura analítica reproduzível que conecte respostas transitórias medidas, curvas características, verificação de condição da máquina, funcionalidade dos limitadores e interpretação fundamentada em teoria de controle.

Este trabalho aborda essa lacuna por meio de um estudo experimentalmente fundamentado de um regulador digital ABB UNITROL 1020 instalado em um gerador síncrono brushless de 13,8 kV durante comissionamento e partida assistida em ambiente industrial. A hipótese central é que a adequação de um regulador de excitação em ambiente real de comissionamento pode ser demonstrada quantitativamente pelo uso combinado de métricas de resposta transitória, consistência das curvas características, evidências de campo, validação supervisionada de limitadores e interpretação analítica baseada na estrutura clássica PID.

O objetivo deste artigo é avaliar, em condições reais de comissionamento industrial, o desempenho dinâmico de um regulador automático de tensão ABB UNITROL 1020 aplicado a um gerador síncrono brushless de 13,8 kV, integrando medições de campo, curvas características, validação operacional de limitadores, medições de vibração e interpretação por modelo PID clássico, de modo a propor uma estrutura científica reproduzível para análise de adequação de sistemas de excitação em geradores síncronos.

A principal contribuição é metodológica. O estudo propõe uma estrutura científica orientada ao campo para avaliação de comissionamento de sistemas de excitação, em vez de apenas relatar uma partida bem-sucedida. Ao integrar medições reais com interpretação por teoria de controle e comparação explícita com abordagens anteriores, o trabalho avança em relação a um relatório técnico convencional e oferece uma forma reproduzível de analisar o comportamento de reguladores em geradores síncronos industriais.

1.1 Sistemas de excitação, normas e relevância dinâmica

A modelagem dinâmica de sistemas de excitação de máquinas síncronas encontra-se consolidada em estudos de sistemas de potência por meio de modelos padronizados de ordem reduzida. A IEEE Std 421.5 organiza modelos de sistemas de excitação, sinais estabilizantes suplementares e funções limitadoras para estudos de estabilidade, enquanto a IEEE Std 115 apresenta procedimentos de ensaio para máquinas síncronas e determinação de parâmetros aplicáveis à análise dinâmica [1,2]. Essas normas são importantes por estabelecerem uma linguagem comum para modelagem, ensaios e interpretação de sistemas de excitação. Entretanto, seu propósito principal é apoiar modelos e procedimentos padronizados, não transformar registros de comissionamento em uma estrutura científica completa de estudo de caso.

Em geradores brushless, o caminho de excitação inclui excitatriz, ponte retificadora rotativa e campo principal do rotor, eliminando escovas e anéis coletores. Essa arquitetura melhora a manutenibilidade, porém impõe limitações quanto à observação direta de grandezas de campo e à rapidez de desexcitação. Estudos sobre sistemas brushless e estruturas de desexcitação controlada indicam que a ponte de diodos rotativa e a arquitetura da excitatriz influenciam a velocidade de supressão e recuperação de tensão sob distúrbios [10,14]. Assim, uma avaliação de comissionamento não deve se restringir a verificar se a tensão nominal é eventualmente alcançada, mas deve também observar amortecimento, resposta transitória, coerência das curvas características, atuação de limitadores e condição mecânica da máquina.

A curva de saturação a vazio expressa a relação entre a corrente de excitação e a tensão terminal do gerador sem carga. Em baixas excitações, a relação tende a ser aproximadamente linear; com o aumento da excitação, o circuito magnético se aproxima da saturação, exigindo incrementos maiores de corrente para pequenos aumentos de tensão. A curva de curto-circuito, por sua vez, relaciona a corrente de armadura à corrente de excitação com os terminais em curto, sendo usualmente mais linear na faixa de ensaio. A comparação entre essas curvas permite verificar coerência magnética, integridade do caminho de excitação e plausibilidade operacional do regulador.

Os limitadores de excitação são funções de supervisão que restringem a atuação do regulador para evitar operação fora da capacidade admissível da máquina. O limitador V/Hz atua quando a relação entre tensão e

frequência pode indicar risco de sobrefluxo magnético; os limitadores PQ protegem a operação no plano de potência ativa e reativa, reduzindo risco de subexcitação ou sobreexcitação; e o limitador de sobrecorrente de excitação limita esforços térmicos no sistema de campo. Esses elementos são fundamentais porque um AVR pode apresentar boa resposta em ensaio de degrau e, ainda assim, não ser operacionalmente adequado se seus limitadores forem instáveis, mal coordenados ou não seletivos.

1.2 Controle PID aplicado à regulação automática de tensão

Grande parte dos reguladores industriais pode ser interpretada, em sua base dinâmica, por meio de estruturas PID ou PI. A ação proporcional contribui para correção rápida do erro de tensão; a ação integral elimina ou reduz o erro em regime permanente; e a ação derivativa, quando empregada com filtragem adequada, contribui para amortecimento e redução de oscilações. Obras clássicas de controle, como Aström e Hägglund [8] e Ogata [9], fornecem a base teórica para essa interpretação, enquanto estudos recentes aplicados a sistemas de potência exploram sintonia PID, métodos metaheurísticos e comparação com controladores inteligentes em malhas de AVR [11-13,15].

Em modo automático de regulação de tensão, o erro de controle pode ser definido como a diferença entre a tensão de referência e a tensão terminal medida:

$$e_v(t) = V_{\text{ref}}(t) - V_t(t) \quad (1)$$

$$u_f(t) = V_p \left[e_v(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^t e_v(\tau) d\tau + T_v \frac{de_v(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

$$G_{\text{PID}}(s) = \frac{U_f(s)}{E_v(s)} = V_p \left(1 + \frac{1}{T_n s} + T_v s \right) \quad (3)$$

$$G_{\text{PID}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4)$$

$$K_p = V_p \quad (5)$$

$$K_i = \frac{V_p}{T_n} \quad (6)$$

$$K_d = V_p T_v \quad (7)$$

$$M_p(\%) = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{final}}}{y_{\text{final}}} \times 100 \quad (8)$$

Nas Equações (1)-(8), $V_{\text{ref}}(t)$ representa a referência de tensão, $V_t(t)$ representa a tensão terminal medida, $e_v(t)$ é o erro de tensão, $u_f(t)$ é o sinal de controle aplicado ao sistema de excitação, V_p representa o ganho proporcional industrial, T_n o tempo de reset integral e T_v a constante de tempo derivativa. A correspondência com a forma paralela clássica permite interpretar K_p como ganho proporcional, K_i como ganho integral e K_d como ganho derivativo. O sobressinal percentual M_p é utilizado como indicador prático de amortecimento e qualidade de resposta transitória.

Essa formulação não pretende reproduzir todos os detalhes proprietários do regulador digital, nem substituir modelos normalizados de estabilidade. Seu propósito é estabelecer uma ponte interpretativa entre os parâmetros industriais de sintonia e os indicadores observáveis em campo. Na prática de comissionamento, aumentos excessivos da ação proporcional podem acelerar a resposta, mas também elevar o sobressinal; ação integral insuficiente pode deixar erro residual; ação integral excessiva pode induzir oscilação lenta; e ação derivativa ou amortecimento equivalente pode reduzir oscilação quando adequadamente configurado.

1.3 Estudos por simulação, otimização e estimação de parâmetros

Publicações recentes frequentemente tratam o AVR como um problema de controle e otimizam parâmetros PID por enxame de partículas, algoritmos genéticos, métodos neuro-fuzzy ou outras técnicas metaheurísticas [11-13,15]. Esses estudos são relevantes porque permitem comparar objetivamente diferentes estratégias sob condições controladas, geralmente avaliando redução de sobressinal, menor tempo de acomodação, menor erro estacionário e melhor amortecimento em respostas ao degrau.

Contudo, estudos baseados em simulação costumam utilizar funções de transferência simplificadas ou bancadas numéricas que não reproduzem integralmente as restrições de comissionamento, como limitação de número de perturbações, restrições de proteção da máquina, continuidade operacional da planta, resolução de medição, comportamento de vibração e interação com limitadores reais de excitação. Por isso, a qualidade científica de uma avaliação em campo depende não apenas da formulação do controlador, mas da forma como as evidências medidas são estruturadas, interpretadas e discutidas.

Outra linha de pesquisa envolve a estimação de parâmetros de geradores e sistemas de excitação a partir de eventos reais ou respostas transitórias medidas [7,11]. Essa abordagem aproxima-se da prática de campo, pois utiliza dados reais e validação por eventos. Entretanto, muitos estudos de identificação concentram-se na reconstrução

matemática do modelo, deixando em segundo plano o conjunto mais amplo de evidências de comissionamento necessário para concluir se a máquina está apta à operação assistida ou comercial.

1.4 Comparação com abordagens anteriores e lacuna de pesquisa

A literatura anterior pode ser agrupada em três correntes principais: normas e referências de modelagem, que definem linguagem e procedimentos de ensaio; estudos de projeto e otimização de controladores, que comparam PID e algoritmos avançados principalmente por simulação; e estudos de estimação de parâmetros, que utilizam transientes medidos para apoiar identificação de modelos. A limitação comum dessas correntes, para fins de comissionamento, é que elas raramente integram em uma única avaliação as curvas características, inspeção do caminho brushless, ensaios de isolamento, medições de vibração, validação de limitadores, registros de partida e métricas transitórias.

A lacuna de pesquisa tratada neste artigo é a ausência de uma estrutura reproduzível e orientada ao campo que converta evidências industriais de comissionamento em avaliação científica da adequação de um sistema de excitação. Em particular, a lacuna envolve a integração de métricas dinâmicas medidas, consistência das curvas a vazio e em curto-circuito, inspeção do caminho de excitação brushless, validação supervisionada de limitadores, vibração, tendências de partida e interpretação por teoria clássica de controle.

TABELA 1. Comparação entre o presente estudo e as principais correntes da literatura.

Corrente da literatura	Contribuição típica	Limitação para comissionamento	Como este estudo responde
Normas e modelos [1,2]	Linguagem comum para ensaios e modelos de excitação	Não estruturam registros reais como estudo científico completo	Usa as normas como base e organiza evidências reais de campo
PID e otimização [8,9,11-13,15]	Comparação de controladores e melhoria de resposta transitória	Frequentemente baseados em simulação ou funções simplificadas	Emprega dados reais de comissionamento de gerador de 13,8 kV
Excitação brushless [10,14]	Análise da arquitetura e da desexcitação brushless	Foco estrutural, sem validação completa de comissionamento	Avalia caminho brushless junto com curvas, limitadores e vibração
Estimação por eventos [7,11]	Uso de transientes medidos para interpretação de modelos	Ênfase na identificação, não na aceitação operacional	Conecta eventos medidos com evidência de aceitação e limitações explícitas

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Unidade ensaiada

A campanha experimental foi conduzida durante o comissionamento de um gerador síncrono brushless WEG de 13,8 kV, 31,25 MVA, 60 Hz e 1800 rpm, acionado por turbina a vapor. O sistema de excitação utilizou regulador digital ABB UNITROL 1020, e a supervisão de proteção foi realizada por relé SEL-700G. Os principais dados nominais estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Dados nominais do conjunto gerador ensaiado.

Parâmetro	Valor
Fabricante	WEG
Modelo	ST41-900
Tensão nominal	13,8 kV
Corrente nominal	1307 A
Potência aparente	31,25 MVA
Frequência	60 Hz
Rotação	1800 rpm
Regulador de excitação	ABB UNITROL 1020
Relé de proteção	SEL-700G
Tensão de entrada de excitação	83,2 Vcc
Corrente de saída de campo	325,3 Acc
Tensão de saída da PMG	170 Vca

2.2 Registro dos parâmetros operacionais do AVR em serviço

Para complementar a rastreabilidade metodológica, foi incorporado ao estudo o arquivo de parâmetros do ABB UNITROL 1020 exportado pelo software CMT1000 v6.320. O arquivo foi salvo em 26/01/2025, identifica o AVR pelo número de série 00046224/9013 e registra a versão de software de controle e MCU 6.320. Esses dados permitem demonstrar quais ajustes permaneceram efetivamente em operação na máquina ensaiada, reduzindo a incerteza associada à descrição do método de sintonia e das funções limitadoras.

A Tabela 3 resume os principais parâmetros operacionais utilizados como base documental dos ensaios. Esses valores não substituem registros ambientais, térmicos ou metrológicos de laboratório, mas fortalecem a exigência metodológica da revista porque documentam a base real de configuração do regulador, incluindo escalas de medição, rampas, ganhos de controle, droop, limitadores, critérios de sincronismo e funções de supervisão. Portanto, *R4EM*, v. 8, n. 1, p.135-155 2026. DOI: <https://doi.org/10.21708/issn27635325.v8n1.a15345.2026>

os parâmetros podem ser usados como evidência técnica de campo para corroborar a reprodutibilidade do estudo, desde que apresentados como parametrização operacional do AVR e não como calibração laboratorial completa.

TABELA 3. Parâmetros operacionais do ABB UNITROL 1020 utilizados como base documental dos ensaios de comissionamento.

Grupo	Parâmetros operacionais preservados no UNITROL 1020	Função na análise dos ensaios
Identificação do registro	CMT1000 v6.320; arquivo salvo em 26/01/2025; AVR S/N 00046224/9013; Control SW/MCU 6.320.	Demonstra rastreabilidade da parametrização utilizada na máquina ensaiada.
Base nominal e medição	UM/UNet nominal = 13,8 kV; secundário TP = 115 V; IM2 nominal = 1307 A; TC = 1500/5 A; frequência = 60 Hz; Ie nominal = 10,4 A.	Define as bases elétricas para interpretação de tensão terminal, corrente de armadura, corrente de excitação e sincronismo.
Excitação e margem dinâmica	Ie em vazio = 29,2%; Kceiling = 11,76 V/V; Xq = 2,16; PMG/entrada conforme registro do sistema.	Indica margem disponível de excitação e coerência com a resposta dinâmica observada.
Soft-start	Starting level = 5,0%; hold time = 1,0 s; ramp time = 10,0 s; line charging starting level = 15,0%; line charging ramp time = 10,0 s.	Corroborar o escorvamento progressivo e a ausência de elevação abrupta de tensão na partida.
Malha automática de tensão	Vp = 9,5; Tb = 0,40 s; Ta = 2,80 s; droop Kq = -5,0%; derivation gain Kb = 3.	Fornece a base real para interpretar a resposta de tensão terminal, sobressinal e tempo de acomodação.
Malha PF/Var/PQ	Vp = 10,0; Ta = 3,00 s; deadband do regulador Q = 2,0%; on delay = 5,0 s.	Documenta a parametrização das funções de potência reativa e sua interação com a regulação principal.
Modo manual / limitador Ie	Vp = 7,0; Ta = 1,00 s.	Sustenta a análise da malha de corrente de campo e dos ensaios em FCR/manual.
Setpoint automático de tensão	Initial = 100,0%; mínimo = 90,0%; máximo = 110,0%; ramp rate = 0,30%/s; reset ao valor inicial habilitado.	Mostra a faixa operacional permitida e a velocidade de mudança de referência.
Limitador V/Hz	fKnee = 57,0 Hz; slope = 90,0%; measurement delay = 1000 ms; Udrop = 10,0%; hold time = 10,0 s; recovery time = 10,0 s.	Comprova a configuração da proteção contra sobrefluxo durante baixa frequência ou condição transitória.
Limitador IeMax	Máximo = 150,0% por 1,0 s; delayed = 120,0% por 30,0 s; continuous = 105,0%; ativo = TRUE.	Define os limites térmicos e transitórios de sobrecorrente de excitação.
Limitador PQ / UEL	Q mínimo: -45% em P=0%, -32% em 25%, -28% em 50%, -22% em 75%, 0% em 100%; dependência de tensão ativa.	Documenta a curva de subexcitação/potência reativa usada na validação operacional.
Limitador de tensão terminal	UM mínimo = 90,0%; UM máximo = 110,0%; ambos ativos.	Confirma a janela de tensão permitida pelo regulador durante operação e ensaios.
Sincronismo	Delta U máximo = 5,00%; ângulo máximo = 10 graus; tempo total de fechamento do disjuntor = 90 ms; voltage matching habilitado.	Relaciona a regulação de tensão à prontidão para sincronismo seguro.
Monitoramento de diodos	Ativo = TRUE; alarme = 5,0% por 10,0 s; trip = 20,0% por 0,3 s.	Corroborar a supervisão do caminho brushless e a proteção da ponte retificadora rotativa.
Parâmetros de máquina no assistente de sintonia	Xd = 2,19 pu; Xd' = 0,27 pu; Td0' = 3,08 s; Ksat = 1,10; Ke = 1,00; Kd = 0,50; Kc = 0,10; Kg = 0,60; overshoot alvo = 15,0%.	Relaciona a sintonia do AVR às características elétricas inseridas para suporte ao ajuste dinâmico.

2.3 Condições de campo e premissas de registro

Os ensaios foram executados em ambiente industrial durante fase de comissionamento e partida assistida. Como característica típica desse tipo de campanha, algumas condições ambientais e térmicas foram monitoradas operacionalmente, mas nem todas permaneceram registradas de forma metrológica no dossiê final de campo. Assim, temperatura ambiente, umidade relativa, estado térmico inicial detalhado da máquina e condições exatas da rede no instante de sincronismo são tratados como variáveis de campo não totalmente controladas, devendo ser consideradas limitações experimentais.

A condição térmica inicial da máquina foi avaliada de forma operacional antes das etapas dinâmicas, por inspeção de prontidão, checagem de alarmes, verificação de tendências térmicas disponíveis no sistema supervisor e confirmação de ausência de impedimentos de proteção. A rede elétrica foi considerada apta ao sincronismo quando as condições usuais de tensão, frequência e permissivos de sincronismo permaneceram dentro dos critérios de operação da planta e do sistema de proteção. Essa abordagem é compatível com comissionamento industrial, mas difere de ensaios laboratoriais com controle ambiental integral.

Para preservar a rastreabilidade, as grandezas foram interpretadas a partir de registros do regulador, telas de supervisão, tendências históricas, registros de proteção e medições de campo. Quando a documentação original não continha valor numérico de incerteza ou calibração individual, a incerteza foi tratada de modo conservador como associada à resolução dos canais, tolerância de extração por cursor, repetibilidade visual das formas de onda e classe típica dos instrumentos empregados em comissionamento.

2.4 Sequência experimental passo a passo

Etapa 1 - Verificação preliminar e segurança: Foram confirmadas as condições de liberação operacional, aterramentos temporários quando aplicáveis, permissivos de proteção, disponibilidade do sistema auxiliar, prontidão da PMG, integridade aparente do painel de excitação e ausência de alarmes impeditivos.

Etapa 2 - Ensaios de isolamento: Foram verificados os níveis de resistência de isolamento e condição dielétrica conforme prática de ensaio de máquinas elétricas, utilizando a IEEE Std 43 como referência para interpretação geral [3]. O objetivo foi confirmar ausência de condição crítica antes da energização e da elevação de tensão.

Etapa 3 - Inspeção do sistema brushless: Foram inspecionados visual e funcionalmente os elementos do caminho de excitação, incluindo excitatriz, retificador rotativo, conexões, cabos, bornes, aterramentos, alimentação PMG e interface do regulador.

Etapa 4 - Curva em curto-circuito: Com os terminais do gerador em condição controlada de curto-circuito de ensaio, a corrente de excitação foi elevada de forma gradual e supervisionada, registrando-se a corrente de armadura correspondente. A finalidade foi verificar linearidade aproximada, coerência do caminho de excitação e resposta da máquina em condição controlada.

Etapa 5 - Curva a vazio: Com a máquina em rotação nominal e sem carga, a excitação foi elevada progressivamente, registrando-se a tensão terminal em função da corrente de campo. A finalidade foi identificar a tendência de saturação magnética e confirmar que a faixa de excitação utilizada pelo AVR era compatível com a tensão nominal.

Etapa 6 - Escorvamento e partida: Foi monitorado o build-up automático de tensão, observando estabilidade, ausência de oscilação sustentada, coerência entre referência e tensão terminal e ausência de alarmes críticos.

Etapa 7 - Sintonia e validação em FCR: Em modo de regulação de corrente de campo, aplicou-se degrau de 5% na referência de corrente de campo. Foram extraídos tempo de subida, tempo de acomodação e sobressinal máximo.

Etapa 8 - Sintonia e validação em AVR: Em modo automático de regulação de tensão terminal, aplicou-se degrau de 5% na referência de tensão. Foram extraídos os mesmos indicadores transitórios, comparando-se a resposta com o comportamento esperado de uma malha adequadamente amortecida.

Etapa 9 - Validação supervisionada de limitadores: Funções limitadoras foram ativadas temporariamente e sob supervisão, com o objetivo de confirmar atuação previsível, retorno controlado e ausência de interferência instável na regulação principal.

Etapa 10 - Medição de vibrações: Foram realizadas medições globais de vibração em posições horizontais, verticais e axiais nos lados acoplado e não acoplado, em condições sem excitação, com excitação e em ponto de carga documentado.

Etapa 11 - Análise integrada: As evidências elétricas, mecânicas e de controle foram analisadas em conjunto para concluir sobre a adequação do sistema de excitação ao comissionamento.

2.5 Aquisição, processamento de dados e incerteza

Os registros de resposta transitória foram obtidos a partir do ambiente de comissionamento do regulador ABB UNITROL 1020, incluindo o software CMT1000 e registros correlatos de supervisão. Além das formas de onda, foi utilizado o arquivo de parâmetros do UNITROL 1020 como evidência da configuração efetiva da máquina. O registro preservou versão de software, bases de medição, ganhos da malha automática, ganhos da malha PF/Var/PQ, parâmetros da malha manual/corrente de campo, rampas de referência, limitadores V/Hz, IeMax, PQ e UM, critérios de sincronismo e monitoramento de diodos. A taxa de amostragem efetiva, a resolução individual de cada canal e os filtros internos aplicados às capturas oscilográficas não estavam explicitamente documentados no pacote final de campo. Por essa razão, os resultados são apresentados como métricas de engenharia extraídas de registros de comissionamento, complementadas pela parametrização operacional do AVR, e não como estimativas metrológicas de laboratório. As evidências visuais originais da máquina ensaiada, do painel de excitação e das telas reais dos ensaios executados no ABB UNITROL 1020 por meio do software CMT1000 são apresentadas no APÊNDICE A1, como suporte documental à metodologia crítica executada em campo.

As formas de onda foram avaliadas por inspeção dos registros oscilográficos e extração por cursor dos principais pontos temporais. O tempo de subida foi definido como o intervalo necessário para a variável controlada evoluir da condição inicial até a proximidade da nova referência após o degrau. O tempo de acomodação foi definido como o intervalo necessário para a variável permanecer dentro de uma faixa aceitável ao redor do valor final, sem oscilação sustentada relevante para a operação. O sobressinal foi calculado conforme a Equação (8).

Quando registros repetidos não estavam disponíveis, a incerteza foi interpretada a partir da resolução visual do registro, estabilidade da forma de onda, tolerância de leitura por cursor e coerência com as tendências operacionais. Essa abordagem é coerente com validação de comissionamento, na qual segurança da planta, disponibilidade operacional e limites de proteção restringem a repetição de perturbações.

2.6 Método prático de sintonia PI/PID

A sintonia foi conduzida de modo incremental e conservador, conforme prática de comissionamento de reguladores industriais e com apoio dos parâmetros efetivamente gravados no UNITROL 1020. Na malha automática de tensão, os parâmetros operacionais registrados foram $V_p = 9,5$, $T_a = 2,80$ s, $T_b = 0,40$ s, droop $K_q = -5,0\%$ e ganho derivativo $K_b = 3$. Na malha PF/Var/PQ, foram preservados $V_p = 10,0$, $T_a = 3,00$ s, banda morta de $Q = 2,0\%$ e atraso de entrada $= 5,0$ s. Na malha manual/corrente de campo, os registros indicaram $V_p = 7,0$ e $T_a = 1,00$ s. Inicialmente, buscou-se garantir estabilidade da malha com resposta sem oscilação sustentada. Em seguida, a ação proporcional foi mantida em nível suficiente para obter velocidade de correção compatível com a dinâmica da máquina, evitando sobressinal excessivo. A ação integral foi preservada em tempos compatíveis com convergência ao valor de referência sem induzir oscilação lenta. A componente derivativa/amortecedora, representada por T_b e

Kb na parametrização industrial, contribuiu para resposta amortecida sem amplificação indevida de ruído de medição.

Dessa forma, a análise passa a utilizar os valores reais de operação do regulador como base documental dos ensaios. A correspondência com a formulação PID clássica deve ser entendida como aproximação interpretativa, pois o ABB UNITROL 1020 utiliza nomenclatura industrial própria, filtragens internas e funções adicionais de limitação. Ainda assim, a disponibilidade dos valores V_p , T_a , T_b , K_q , K_b e das rampas/limitadores fortalece a reprodutibilidade do estudo e atende de forma mais robusta à necessidade de descrever como os ganhos foram definidos e preservados na prática de comissionamento.

2.7 Medição de vibrações e critério normativo

As vibrações foram medidas como velocidade global de vibração em mm/s, em posições horizontais, verticais e axiais nos mancais ou pontos representativos do lado acoplado e do lado não acoplado. O critério de aceitação adotado considerou a ISO 10816-3 e sua atualização pela ISO 20816-3 para avaliação de vibração em partes não rotativas de máquinas industriais [16,17]. Para máquinas industriais de grande porte do Grupo 1 em base rígida, o limite de referência entre as zonas A/B é frequentemente tratado como 2,3 mm/s RMS, valor adotado neste estudo como referência conservadora de condição satisfatória.

A maior vibração global registrada foi de 2,26 mm/s, ligeiramente abaixo do valor de referência de 2,3 mm/s RMS. Essa proximidade recomenda acompanhamento em operação, mas, dentro do critério adotado, não indicou condição impeditiva ao comissionamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parametrização operacional documentada do UNITROL 1020

A incorporação do arquivo de parâmetros confirmou que a avaliação dinâmica foi realizada com uma configuração industrial identificável e preservada. A malha automática de tensão permaneceu configurada com $V_p = 9,5$, $T_a = 2,80$ s, $T_b = 0,40$ s, droop $K_q = -5,0\%$ e $K_b = 3$. Esses valores são coerentes com a resposta registrada no ensaio de tensão terminal, que apresentou tempo de subida de 350 ms, tempo de acomodação de 950 ms e sobressinal de 1,3%. A malha manual/corrente de campo, com $V_p = 7,0$ e $T_a = 1,00$ s, também é compatível com a resposta de campo documentada, caracterizada por tempo de subida de 750 ms, tempo de acomodação de 1350 ms e sobressinal de 1,7%.

Os limitadores registrados reforçam a interpretação operacional dos ensaios: o limitador V/Hz foi configurado com joelho em 57 Hz e atraso de medição de 1000 ms; o IeMax permaneceu ativo com limites de 150%, 120% retardado e 105% contínuo; o limitador PQ apresentou curva de subexcitação em função da potência ativa; e os limites de tensão terminal foram mantidos entre 90% e 110%. Assim, a resposta dinâmica observada não deve ser interpretada isoladamente, mas como resultado de uma parametrização completa de controle, referência, limitação e supervisão.

3.2 Curvas características

As curvas de curto-circuito e a vazão obtidas durante o comissionamento apresentaram comportamento compatível com o esperado para geradores síncronos. A corrente de curto-circuito aumentou de forma coerente com a corrente de excitação na faixa ensaiada, enquanto a característica a vazão apresentou tendência progressiva de saturação. Esse resultado apoia a integridade do caminho de excitação brushless e a adequação da faixa operacional de controle utilizada durante o comissionamento.

3.3 Métricas de resposta dinâmica

O comportamento dinâmico registrado indicou respostas rápidas e amortecidas nos dois modos avaliados. A Tabela 4 resume as métricas extraídas dos ensaios com degrau de 5%.

TABELA 4. Métricas dinâmicas obtidas nos ensaios com degrau de 5%.

Modo de controle	Degrau aplicado	Tempo de subida	Tempo de acomodação	Sobressinal máximo
Regulação de corrente de campo	5%	750 ms	1350 ms	1,7%
Regulação de tensão terminal	5%	350 ms	950 ms	1,3%

3.4 Comportamento de vibração

As medições globais de vibração permaneceram abaixo do limite de referência adotado de 2,3 mm/s RMS. A Tabela 5 apresenta os níveis medidos sem excitação, com excitação e no maior ponto de carga documentado, de 11,5 MW. O maior valor global registrado foi de 2,26 mm/s na posição MLNA-A sob carga, permanecendo compatível com o critério de aceitação aplicado.

TABELA 5. Níveis globais de vibração medidos nas condições documentadas.

Posição	Sem excitação (mm/s)	Com excitação (mm/s)	A 11,5 MW (mm/s)
MLA-H	0,60	0,77	1,47
MLA-V	0,40	0,60	0,85

Posição	Sem excitação (mm/s)	Com excitação (mm/s)	A 11,5 MW (mm/s)
MLA-A	0,86	1,00	1,37
MLNA-H	0,64	0,62	0,89
MLNA-V	0,65	0,79	1,67
MLNA-A	0,98	1,27	2,26

3.5 Evidências operacionais de campo

Os registros de campo também documentaram escorvamento automático da tensão, validação supervisionada de limitadores e acompanhamento de tendências térmicas, corrente de excitação, corrente de armadura, tensão terminal e potência ativa. Em conjunto, essas evidências indicam que as métricas transitórias aceitáveis não foram observações isoladas, mas parte de um padrão mais amplo de comportamento coerente da máquina durante o comissionamento e a operação assistida.

3.6 Discussão técnica dos resultados

Os resultados confirmam que a adequação de um regulador de excitação em comissionamento industrial não deve ser julgada apenas pelo fato de o gerador atingir a tensão nominal. A qualidade do comissionamento deve incluir a velocidade e o amortecimento da resposta, a coerência das curvas características, a previsibilidade dos limitadores e a ausência de evidências eletromecânicas anormais, como vibração excessiva ou tendências instáveis.

As respostas medidas em corrente de campo e tensão terminal foram compatíveis com uma condição de controle equilibrada. O baixo sobressinal e os curtos tempos de acomodação indicam que a ação proporcional foi suficiente para correção rápida sem induzir oscilação relevante, enquanto os efeitos integral e de amortecimento foram adequados para reduzir erro residual e manter estabilidade. Essa interpretação está alinhada à estrutura clássica PID descrita por Aström e Hägglund [8] e Ogata [9], bem como aos estudos de AVR que empregam tempo de subida, sobressinal e tempo de acomodação como indicadores centrais de desempenho [11-13,15].

Em comparação com estudos de otimização PID por simulação, o presente trabalho oferece contribuição distinta. Enquanto esses estudos permitem comparar algoritmos sob condições numéricas controladas, eles geralmente não incorporam ensaios de isolamento, curvas a vazio e em curto-circuito, evidência mecânica de vibração, ativação supervisionada de limitadores e restrições práticas de um ambiente de comissionamento industrial energizado. O avanço deste artigo está na integração desses elementos normalmente separados em uma estrutura de avaliação rastreável.

Em relação às normas de ensaio e modelagem, o estudo não pretende substituir procedimentos padronizados. Ao contrário, utiliza a lógica da IEEE Std 421.5 e da IEEE Std 115 como base para uma narrativa científica mais ampla [1,2]. A contribuição consiste em conectar tais procedimentos à decisão prática de campo: se a resposta dinâmica, o caminho de excitação, a atuação dos limitadores e a condição mecânica são mutuamente coerentes para sustentar a aceitação do comissionamento.

Comparado a estudos de estimação de parâmetros, o presente trabalho é menos ambicioso em reconstrução matemática, mas mais abrangente em validação operacional. Não se reivindica identificar todos os parâmetros do gerador e do regulador. Em vez disso, demonstra-se que, mesmo quando ajustes proprietários ou registros históricos incompletos impedem reconstrução total de V_p , T_n e T_v , o engenheiro de comissionamento pode produzir avaliação cientificamente defensável ao relacionar transientes medidos, curvas características, limitadores e vibração.

Portanto, o avanço em relação ao estado da arte não é um novo controlador ou algoritmo de otimização, mas uma metodologia reproduzível para transformar evidências de campo em avaliação científica da adequação de um sistema de excitação. Essa distinção é importante porque plantas reais frequentemente não podem ser submetidas a campanhas extensas de perturbação experimental, exigindo equilíbrio entre rigor científico, segurança, disponibilidade e restrições operacionais.

3.7 Limitações do estudo

Este estudo apresenta limitações. Primeiro, baseia-se em um único estudo de caso industrial, o que limita a generalização direta para geradores de outras potências, topologias, ambientes operacionais e famílias de reguladores. Segundo, restrições operacionais da planta limitaram o número de perturbações repetíveis, reduzindo a profundidade do tratamento estatístico formal. Terceiro, embora o arquivo de parâmetros do UNITROL 1020 tenha preservado a configuração operacional efetiva do regulador, incluindo V_p , T_a , T_b , droop, rampas e limitadores, a documentação não permite reconstruir todos os algoritmos internos proprietários, filtros digitais e lógicas fechadas do fabricante.

Quarto, a taxa de amostragem efetiva das capturas, a resolução de todos os canais e os filtros internos do sistema de aquisição não estavam integralmente documentados no pacote final, razão pela qual as métricas são apresentadas como indicadores de engenharia de comissionamento, ainda que agora apoiadas pela parametrização real do AVR. Quinto, variáveis ambientais e térmicas, como temperatura ambiente, umidade relativa e estado térmico inicial detalhado da máquina, não foram registradas com controle laboratorial. Sexto, a validação do modelo foi realizada

em sentido analítico simplificado, e não por simulação eletromagnética completa ou identificação paramétrica detalhada. Ainda assim, o caso permanece relevante como estudo de campo estruturado e apoiado por evidências rastreáveis.

4. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma avaliação experimental e apoiada por modelo de um regulador automático de tensão ABB UNITROL 1020 durante o comissionamento de um gerador síncrono brushless de 13,8 kV, incorporando também os parâmetros operacionais efetivamente gravados no regulador em serviço. As evidências de campo documentadas mostraram características de curto-circuito e a vazio coerentes, escorvamento automático estável, baixo sobressinal, curtos tempos de acomodação, atuação seletiva de limitadores e níveis de vibração compatíveis com o critério normativo adotado.

Nos ensaios de degrau reportados, o modo de regulação de corrente de campo apresentou tempo de subida de 750 ms, tempo de acomodação de 1350 ms e sobressinal de 1,7%, enquanto o modo automático de regulação de tensão apresentou tempo de subida de 350 ms, tempo de acomodação de 950 ms e sobressinal de 1,3%. A maior vibração global registrada foi de 2,26 mm/s, permanecendo abaixo do limite de referência de 2,3 mm/s RMS adotado a partir da ISO 10816-3/ISO 20816-3 para a condição considerada.

Além da unidade específica ensaiada, a principal contribuição do trabalho é metodológica. O estudo demonstra que o desempenho de reguladores de excitação em comissionamento real pode ser avaliado por uma estrutura científica que combina medições de campo, consistência de curvas características, parametrização operacional do AVR, evidência operacional, comparação com a literatura, limitações explícitas e interpretação por PID clássico. Nesse sentido, o artigo avança em relação a um relatório convencional de comissionamento ao transformar dados práticos de partida e ajustes reais do regulador em avaliação analítica da adequação do sistema de excitação.

Como trabalhos futuros, recomenda-se incluir ensaios repetidos de perturbação, propagação quantitativa de incertezas, estimação completa de parâmetros do modelo, comparação entre diferentes reguladores e avaliação de respostas sob maior variedade de cargas e condições de rede. Essas etapas permitirão validação estatística mais ampla e maior generalização da estrutura proposta.

AGRADECIMENTOS

Financiamento: O autor declara que não recebeu financiamento específico para este estudo.

Conflitos de interesse: O autor declara não haver conflito de interesse.

Contribuições do autor: Conceitualização, metodologia, investigação, análise formal, visualização e redação do manuscrito original: Sandro Muniz de Souza.

Disponibilidade de dados: Os dados que apoiam os achados deste estudo estão contidos no manuscrito e nos registros suplementares de comissionamento, ou podem ser disponibilizados pelo autor mediante solicitação razoável.

Declaração do Comitê de Ética: Não aplicável.

Declaração de Consentimento Informado: Não aplicável.

Materiais suplementares: Figuras suplementares podem incluir capturas originais de comissionamento, traços de partida, registros de validação de limitadores e exportações de histórico utilizadas para apoiar a rastreabilidade entre o estudo científico e os registros originais de campo.

Agradecimentos: O autor agradece o suporte técnico e operacional recebido durante as atividades de comissionamento e validação de campo.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE, 2016.
- [2] IEEE Std 115-2019. IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Including Acceptance and Performance Testing and Parameter Determination for Dynamic Analysis. IEEE, 2019.
- [3] IEEE Std 43-2013. IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. IEEE, 2013.
- [4] ABB. UNITROL 1020 Automatic Voltage Regulator - User Manual.
- [5] ABB Switzerland Ltd. UNITROL 1000 Commissioning Instruction and PID Tuning. Document 3BHS399489 E01, 2012.
- [6] WEG. Documentação Técnica para Instalação, Operação e Manutenção de Máquinas Síncronas Brushless.
- [7] Dobrzynski, K. Estimation of synchronous generator and AVR parameters based on gradient and genetic methods. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2023.
- [8] Aström, K. J.; Hägglund, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Instrument Society of America, 1995.
- [9] Ogata, K. Modern Control Engineering. Prentice Hall, 2010.
- [10] Chouaba, S. E.; Barakat, A. Controlled brushless de-excitation structure for synchronous generators. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(3), 4218-4224, 2019.

- [11] Osman, M.; Milano, F. Development of excitation system modelling approaches for dynamic studies. Proceedings of UPEC, 2021.
- [12] Ezenugu, I. A.; Nwokonko, C. S. Automatic voltage regulator control system for synchronous generator. Saudi Journal of Engineering and Technology, 2024.
- [13] Sajnekar, D. M. et al. Design of PID controller for automatic voltage regulator and direct excitation control system of synchronous generator. International Journal of Engineering Research and Technology, 2018.
- [14] Chouaba, S. E.; Barakat, A. Advanced brushless excitation system with dynamic de-excitation capability. International Review of Electrical Engineering, 2019.
- [15] Sekyere, Y. O. M. et al. Optimizing PID control for automatic voltage regulators using metaheuristic techniques. Results in Engineering, 2025.
- [16] ISO 10816-3. Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
- [17] ISO 20816-3. Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 3: Industrial machinery with power above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min.

APÊNDICE A1

EVIDÊNCIAS VISUAIS DA MÁQUINA ENSAIADA E DOS ENSAIOS DE CAMPO DO AVR UNITROL 1020

Este apêndice reúne registros visuais complementares da máquina ensaiada, do painel de controle, proteção e excitação, do regulador ABB UNITROL 1020 e das telas reais obtidas durante os ensaios de campo executados com o software CMT1000. As figuras foram incluídas como evidência documental da metodologia crítica de comissionamento, incluindo levantamento das curvas características, partida automática de excitação, ajustes de ganhos PI/PID, resposta a degraus, atuação de limitadores e testes de sincronismo e carga.

FIGURA A1. Registros visuais da máquina ensaiada, placa de dados, caixa terminal, turbina/redutor, excitatriz e mancais.



Figura 2.1: Local da Instalação do Gerador.



Figura 2.2: Placa de dados do gerador.



Figura 2.3: Caixa terminal do gerador.



Figura 2.4: Turbina e redutor fornecidos pela TGM/WEG.



Figura 2.5: Placa de dados da excitatriz.

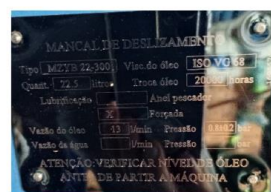


Figura 2.6: Placa de dados mancais LA e LNA.

WEG Equipamentos Elétricos S/A
Av. Prefeito Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC - Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4010 - www.weg.net

FIGURA A2. Painel de controle, proteção e excitação do gerador, vista interna do painel e regulador ABB UNITROL 1020 instalado.



Figura 2.19: Placa de dados da Resistência de Aquecimento.



Figura 2.20: Pino guia soldado.



Figura 2.21: Cubículo de surto e fechamento de neutro (Fornecimento WEG).



Figura 2.22: Painel de Controle, Proteção e Excitação (Vista externa).



WEG Equipamentos Elétricos S/A

Av. Prefeito Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC - Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4010 - www.weg.net

FIGURA A3. Levantamento da curva de curto-circuito do gerador durante o comissionamento.



- 46 – Desbalanço de corrente;
- 50N – Sobre Corrente de Neutro;
- 47 – Sequência de Fase;
- 59 – Sobre Tensão;
- 27 – Sub Tensão;
- 81U e 81O – Sub e Sobre Frequência;
- 24 – Volts/Hertz;

Durante os ensaios de curto-circuito, saturação e energização reversa foi confirmado que o gerador possui sequência de fases positiva horária, igual a sequência de fases da concessionária que o gerador foi testado sendo energizado reversamente com o neutro aberto. Logo, o gerador está apto para iniciar os testes de sincronismo e carga.

Durante os ensaios com excitação a entrada de água do gerador foi mantida fechada para que o interior do gerador fosse aquecido por algum tempo com intuito de eliminar qualquer eventual umidade do interior do gerador.

Abaixo são indicados alguns valores de temperatura e vibração nos mancais do gerador durante os ensaios a vazio.

4.2 Levantamento da curva de curto-circuito do gerador

Realizado levantamento inicial da curva de curto-circuito do gerador. Os valores de corrente foram elevados até 40% da corrente nominal da máquina e pelos dados iniciais os valores obtidos durante o teste indicam conformidade aos dados de projeto do gerador.

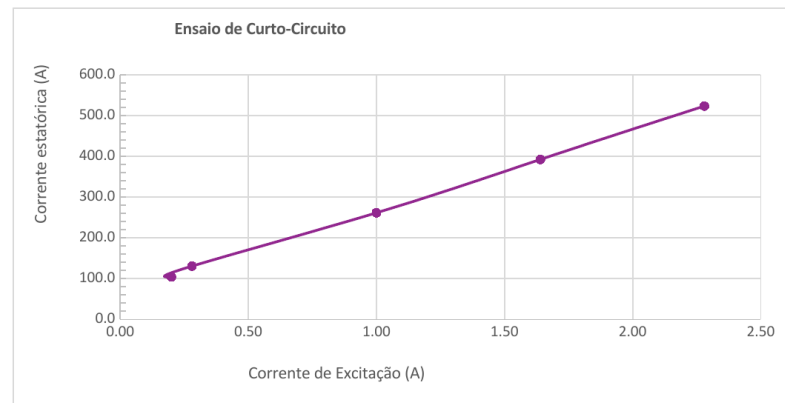


Figura 4.1: Curva de saturação em curto do gerador.

Tabela 4.3 – Valores obtidos durante o levantamento da curva de saturação em curto-circuito do gerador.

	I_M (A)	I_{EXC} (A)	V_{EXC} (V _{cc})
Residual	104,0	0,20	1,82
10% nominal	130,7	0,28	2,65
20% nominal	261,4	1,00	6,64
30% nominal	392,1	1,64	10,58
40% nominal	522,8	2,28	14,36

WEG Equipamentos Elétricos S/A

Av. Prefeito Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC - Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4010 – www.weg.net

22

FIGURA A4. Levantamento da curva de saturação a vazio do gerador durante o comissionamento.



4.3 Levantamento da curva de saturação a vazio do gerador

No gráfico e tabela abaixo é possível observar os valores obtidos para o levantamento da curva de saturação a vazio do gerador. Os valores obtidos em campo são condizentes com os valores verificados na fábrica durante os ensaios do gerador.

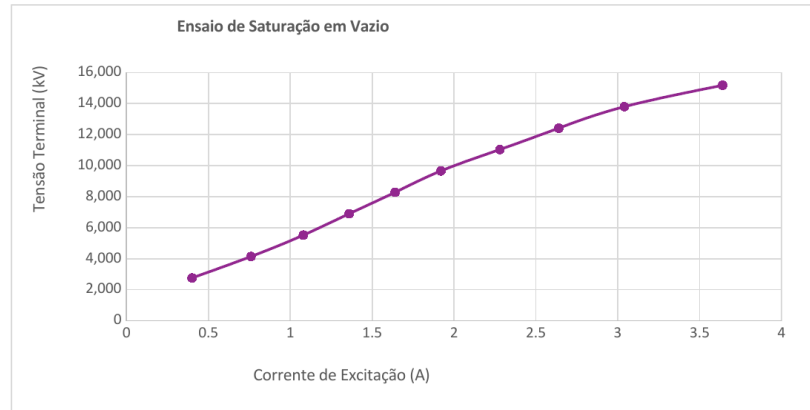


Figura 4.2: Curva de saturação a vazio do gerador.

Tabela 4.4 – Valores obtidos durante o levantamento da curva de saturação a vazio do gerador

%Tensão [kV]	Iexc [Adc]	Uexc [Vdc]	Uest [Vac]
Residual	0	0	707
10% - 1,4 kV	0,1	1,2	1500
20% - 2,7 kV	0,40	3,40	2700
30% - 4,2 kV	0,76	5,40	4200
40% - 5,5 kV	1,08	7,44	5560
50% - 6,9 kV	1,36	9,11	6901
60% - 8,3 kV	1,64	10,96	8355
70% - 9,9 kV	1,92	12,80	9700
80% - 11,0 kV	2,28	14,82	11050
90% - 12,4 kV	2,64	17,04	12410
100% - 13,8 kV	3,04	19,67	13800
110% - 15,2 kV	3,64	23,25	15216

WEG Equipamentos Elétricos S/A

Av. Prefeito Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC - Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4010 – www.weg.net

23

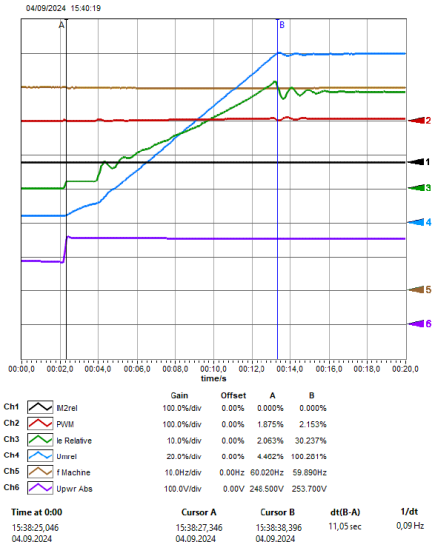
FIGURA A5. Partida automática de excitação do regulador UNITROL 1020 e início dos ajustes de controle manual.



4.4 Parametrização, Ajustes e testes realizados no regulador Unitrol 1020

Concluído a parte de proteções do relé SEL, a vazio, foi realizado ajuste de PID's em modo manual e automático do regulador de tensão, e partida automática de excitação.
No gráfico abaixo é indicado o gráfico de partida automática de excitação em modo MTVC.

Gráfico 4.1: Partida automática de excitação do regulador Unitrol 1020.



4.4.1 Ajuste do ganhos PI para o modo de controle manual (Controle corrente de campo - FCR)

O modo de controle de corrente foi ajustado também, e nos gráficos abaixo é possível observar os degraus dados e a resposta dinâmica do regulador após o ajuste dos ganhos PI do modo controle de corrente.

FIGURA A6. Resposta ao degrau de 5% na malha de corrente de campo em modo FCR, com registros reais do CMT1000.



Gráfico 4.2: Resposta ao degrau de 5% no valor de corrente. Tempo de subida de 750ms.

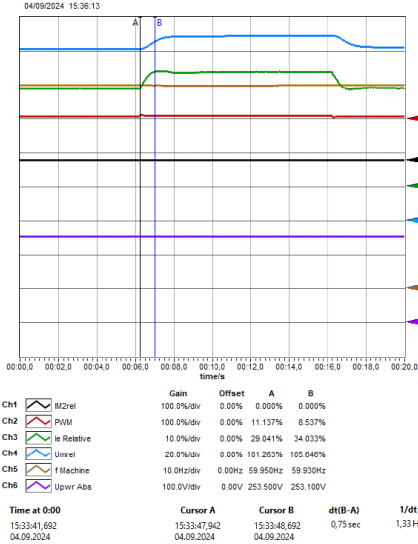


Gráfico 4.3: Estabilização da Ie de 1350ms.

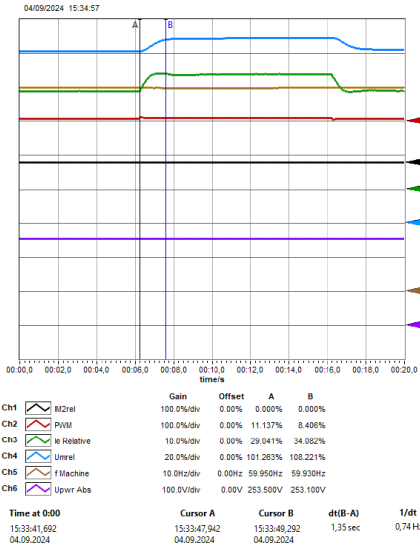
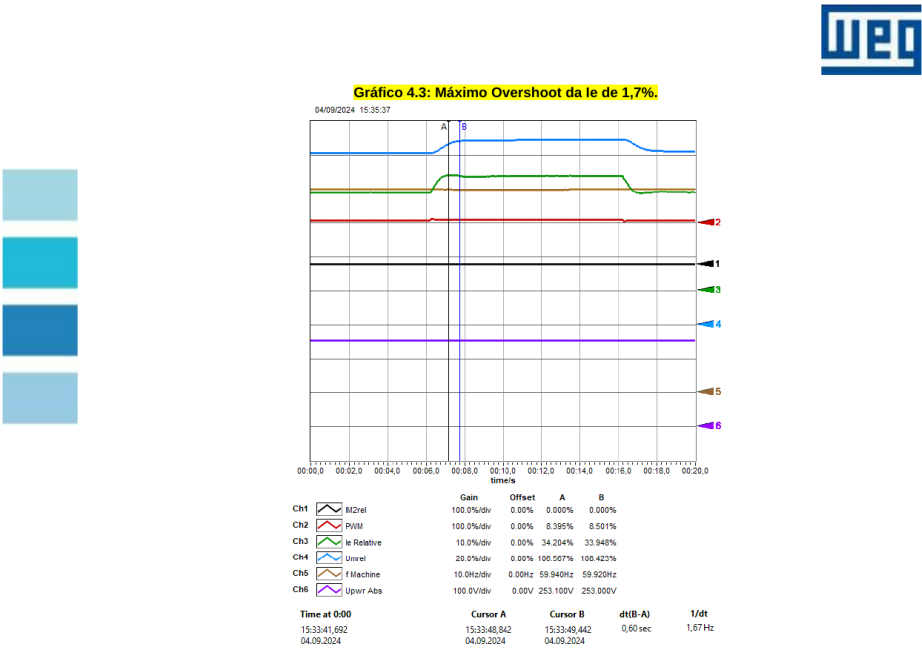


FIGURA A7. Resposta dinâmica adicional da malha de corrente de campo e início do ajuste PID para o modo automático de tensão.



4.4.2 Ajuste do ganhos PID para o modo de controle automático (Controle automatico de tensão - AVR)

Concluído os ajustes dos ganhos do modo de corrente (FCR) foi realizado ajuste dos ganhos do modo de controle de tensão (AVR).
No gráfico abaixo é possível observar a resposta dos ajustes realizados no modo de controle de tensão.

FIGURA A8. Resposta ao degrau de 5% na referência de tensão terminal em modo AVR, com registros reais do CMT1000.



Gráfico 4.4: Resposta ao degrau de 5% na referência de tensão. Tempo de subida de 350ms.

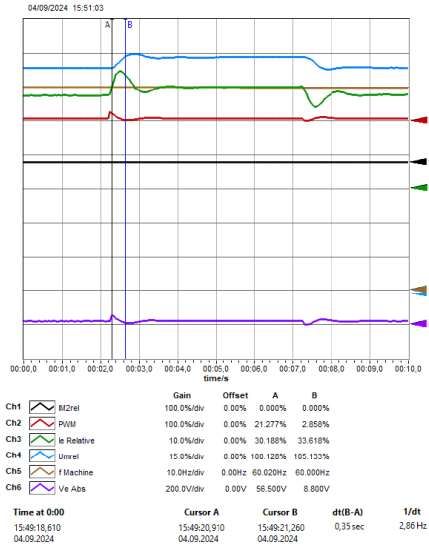


Gráfico 4.5: Resposta ao degrau de 5% na referência de tensão. Tempo de estabilização de 950ms.

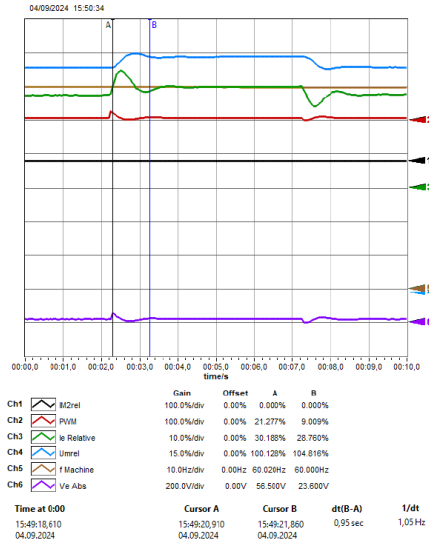
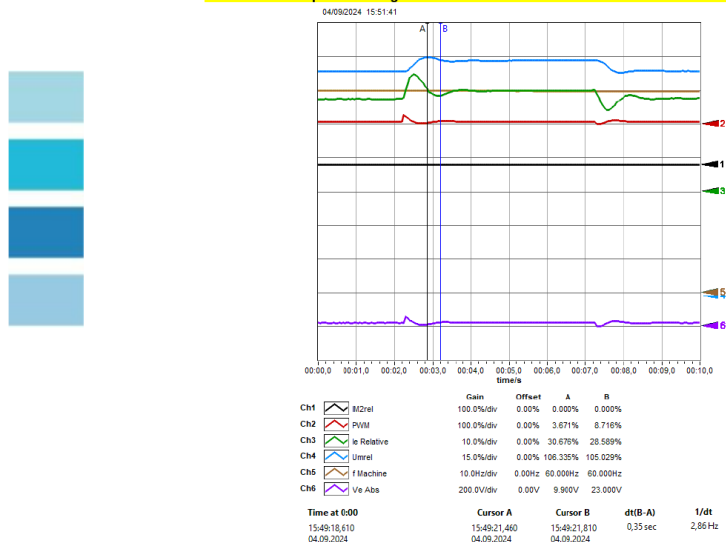


FIGURA A9. Registro complementar da resposta ao degrau no modo automático de tensão e descrição da atuação dos limitadores do AVR.



Gráfico 4.6: Resposta ao degrau de 5% na referência de tensão. Máximo overshoot de 1,3%.



Observando os gráficos acima, é possível verificar que a dinâmica de ajuste para o modo de controle de tensão está satisfatória, pois o tempo de subida, overshoot e tempo de estabilização estão com valores adequados.

4.4.3 Ajuste dos ganhos para o modo de controle de tensão e FP em carga

Para a planta em questão o controle de FP será realizado pelo DSLC, mantendo o regulador sempre em modo de controle de tensão.

4.4.4 Atuação dos limitadores de proteção do regulador de tensão

Os 2 limitadores principais do regulador de tensão foram testados, sendo eles:

1. Limitador volts/hertz;
2. Limitador de sobrecorrente de excitação;
3. Limitador PQ.

Abaixo, nas figuras seguintes é possível observar a atuação destes limitadores de forma correta.

Na figura 4.3 é possível visualizar a atuação do limitador V/HZ atuando com a redução da velocidade da turbina. O valor de atuação do mesmo foi alterado de 57Hz para 59Hz de modo a ativar a atuação do mesmo antes.

Na figura 4.4, indica a atuação do limitador de sobrecorrente de excitação, onde o valor de nível máximo de corrente foi alterado para 27% somente para avaliar atuação do mesmo. Foi utilizado filtro de atraso de 5 segundos.

Na figura 4.5, indica a atuação do limitador de PQ, onde o valor de nível máximo de potência reativa consumida foi alterado para -0,5% somente para avaliar atuação do mesmo. Foi utilizado filtro de atraso de 5 segundos.

WEG Equipamentos Elétricos S/A

Av. Prefeito Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC - Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4010 - www.weg.net

28

FIGURA A10. Telas reais do CMT1000 associadas à atuação de limitadores de sobrecorrente de excitação e supervisão operacional.

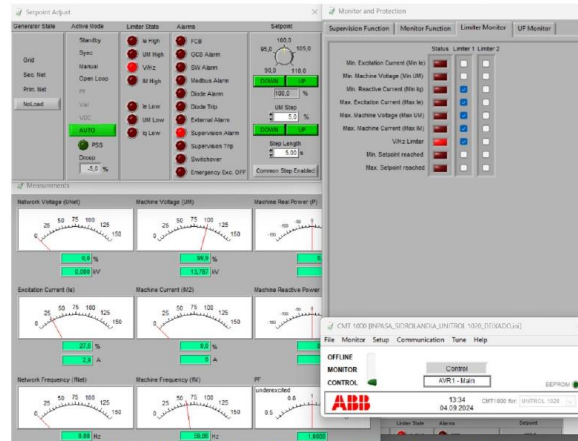


Figura 4.3: Atuação do limitador V/Hz – Limitador Atuado.



Figura 4.4: Atuação do limitador de sobrecorrente de excitação.

WEG Equipamentos Elétricos S/A

Av. Prefeito Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC - Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4010 – www.weg.net

FIGURA A11. Telas reais do CMT1000 associadas aos testes de sincronismo, controle PQ e ensaios iniciais com carga.

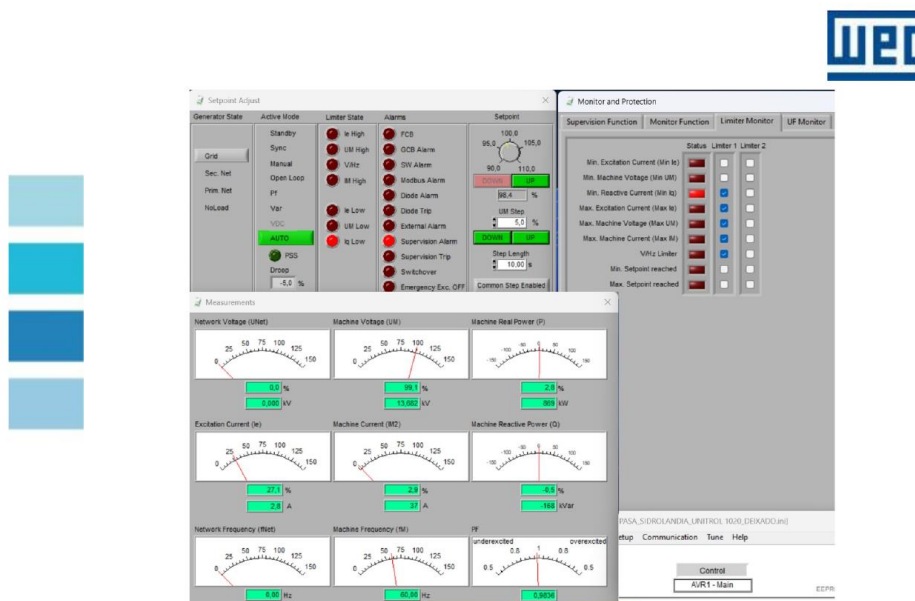


Figura 4.5: Atuação do limitador PQ.

4.5 Testes de sincronismo e carga do gerador

Concluído os testes com o gerador a vazio dado início aos testes de sincronismo e carga com o conjunto gerador/turbina. Foi confirmado durante os testes a vazio que o gerador possui sequencia horaria positiva (A-B-C) como a concessionária.

Realizado dessa forma na sequência teste de falso sincronismo com o disjuntor do gerador extraído para avaliar controle de tensão e "speed bias" do DSLC sobre o RT e RV. Realizado teste de falso sincronismo de maneira satisfatória, tendo como resultado o fechamento do disjuntor na condição extraído.

Na sequência dos testes foi realizado inserção do disjuntor do gerador para sincronismo real em modo local. O primeiro sincronismo ocorreu de modo satisfatório onde foi inserido cerca de 1MW no conjunto. Em seguida, foi realizado novamente o sincronismo do gerador para observar as grandezas elétricas destes equipamentos. Os valores lidos de potência ativa e reativa para todos equipamentos estão iguais, seja para proteção ou medição.

Na condição de sincronismo com a concessionária, foram testados os modos de Controle de Tensão e controle de Fator de Potência. Em ambos os modos os ajustes de setpoint são controlados pelo controlador DSLC e estão operando normalmente.

Para a operação, ficará ajustado o modo de controle de tensão como "Padrão", podendo o cliente habilitar o modo de controle de fator de potência via supervisão ou remoto (no painel de controle do gerador).

4.6 Ensaios com Carga

Após o sincronismo com a rede, os testes com carga foram iniciados, porém as proteções de Potência Reversa (32R) e Perda de Excitação (40) não puderam ser realizadas devido a Subestação Principal ainda não estar finalizada e a conexão provisória da CIA ser instável. Na sequência foi realizado aumento de carga em degraus.

Os valores de vibração em velocidade, na condição com carga, foram aferidos na carcaça dos mancais do gerador quando chegou-se a máxima carga (11,5MW) e estão apresentados na tabela 4.5. Os valores de vibração foram coletados em diferentes estágios de carga e estão apresentados na tabela 4.6.

WEG Equipamentos Elétricos S/A

Av. Prefeito Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC - Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4010 - www.weg.net