

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Eduardo Dellagnelo Farias

Uso de métricas como recurso para validação de modelos de simulação no SIN: estudo de caso de um sistema de excitação de unidade geradora de usina hidrelétrica

Florianópolis

2024

Eduardo Dellagnelo Farias

Uso de métricas como recurso para validação de modelos de simulação no SIN: estudo de caso de um sistema de excitação de unidade geradora de usina hidrelétrica

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Farias, Eduardo Dellagnelo

Uso de métricas como recurso para validação de modelos de simulação no SIN: estudo de caso de um sistema de excitação de unidade geradora de usina hidrelétrica / Eduardo Dellagnelo Farias ; orientador, Antonio Felipe da Cunha de Aquino, 2024.

101 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Métricas de Avaliação. 3. Validação de modelos de simulação. 4. Sistema de excitação. 5. Simulações dinâmicas. I. Aquino, Antonio Felipe da Cunha de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Eduardo Dellagnelo Farias

Uso de métricas como recurso para validação de modelos de simulação no SIN: estudo de caso de um sistema de excitação de unidade geradora de usina hidrelétrica

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 16 de dezembro de 2024.

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Eletricista Lucas Borré Lobo.
Operador Nacional do Sistema Elétrico

Este trabalho é dedicado à minha família, amigos e namorada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente minha mãe por todo apoio dado ao longo da vida.

A minha namorada pela incrível companhia e apoio durante essa jornada, ao meu pai também pelo apoio e as demais pessoas de minha família e amigos.

Aos meus amigos e colegas de graduação, do PET EEL e da Reivax que proporcionaram companhia, apoio e trocas de conhecimento valiosas para um crescimento conjunto.

A todos os meus professores ao longo da minha trajetória acadêmica, especialmente aos professores André Luís Kirsten, e André Wüst Zibetti, que contribuíram significativamente para a minha formação durante o período em que estive envolvido no PET EEL e em minha monitoria. Também gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu orientador, Antonio Felipe da Cunha de Aquino, por todo o apoio e ensinamentos transmitidos durante o desenvolvimento deste trabalho e em todas as cadeiras em que tive a satisfação de cursar.

RESUMO

O aumento da complexidade e a crescente expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN) exigem uma validação rigorosa dos modelos utilizados em estudos elétricos, em particular aqueles relativos aos sistemas de excitação de unidades geradoras. Este trabalho visa fornecer elementos que contribuam com o aumento da segurança e da eficiência operacional do SIN, cujas cargas são supridas predominantemente por fontes renováveis, como a geração hidrelétrica. O objetivo principal é estudar a utilização de métricas como recurso para a validação de modelos de componentes pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a partir de um estudo de caso de um sistema de excitação de uma unidade geradora (UG) de uma usina hidrelétrica (UHE) do SIN. A metodologia adotada envolve a modelagem do sistema de excitação utilizando o software ANATEM, seguido de sua validação, a partir da comparação entre os registros de campo e os resultados das simulações. Adota-se uma metodologia para avaliação dos resultados baseada na rotina estabelecida pelo Consejo Nacional de Operación (CNO), que define procedimentos para a avaliação de modelos com a utilização de métricas de discrepância, e é utilizada pelo operador de sistemas da Colômbia, XM. A quantificação das métricas aplicadas na avaliação dos resultados é efetuada através da execução de um algoritmo computacional desenvolvido no âmbito deste trabalho. Os resultados obtidos demonstram que a aplicação das métricas permite uma análise sistemática e objetiva da validação do sistema de excitação. No entanto, o trabalho também revela desafios, como a alta sensibilidade de algumas métricas, o que pode levar a reprovações injustificadas de modelos que, na prática, apresentam desempenho satisfatório. A conclusão do estudo enfatiza a importância da incorporação de métricas no processo avaliativo de modelos de simulação no SIN, sugerindo que futuras pesquisas explorem a adaptação e a evolução dessas métricas para o caso brasileiro, além de desenvolver diretrizes que equilibrem a análise quantitativa e qualitativa.

Palavras-chave: Métricas de avaliação. Validação de modelos de simulação. Sistema de excitação. Simulações dinâmicas.

ABSTRACT

The increasing complexity and ongoing expansion of the Brazilian Interconnected Power System (BIPS) demand rigorous validation of the models used in electrical studies, particularly those related to the excitation systems of generating units. This work aims to provide elements that contribute to enhancing the safety and operational efficiency of the BIPS, whose loads are predominantly supplied by renewable sources, such as hydropower generation. The primary objective is to study the use of metrics as a tool for validating component models by the Brazilian System Operator (ONS), based on a case study of the excitation system of a generating unit (GU) from a hydroelectric power plant (HPP) within the BIPS. The methodology involves modeling the excitation system using the ANATEM software, followed by its validation through a comparison between field measurements and simulation results. Subsequently, a methodology for evaluating the results is applied, based on the routine established by the Consejo Nacional de Operación (CNO), which defines procedures for model assessment using discrepancy metrics, and is used by the system operator of Colombia, XM. The quantification of metrics applied in the evaluation is performed through the execution of a computational algorithm developed as part of this work. The results obtained demonstrate that the application of metrics enables a systematic and objective analysis of the excitation system validation. However, the study also reveals challenges, such as the high sensitivity of certain metrics, which may lead to unjustified rejections of models that, in practice, exhibit satisfactory performance. The study concludes by emphasizing the importance of incorporating metrics into the evaluation process of simulation models in the BIPS, suggesting that future research explore the adaptation and evolution of these metrics for the Brazilian context, as well as develop guidelines that balance quantitative and qualitative analysis.

Keywords: Evaluation metrics. Simulation model validation. Excitation system. Dynamic simulations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada no SIN de julho 2024 até dezembro 2028.	26
Figura 2 – Estimativa da evolução física do sistema de transmissão do SIN - linhas de transmissão.	26
Figura 3 – Processo de avaliação e inserção de modelos na base de dados do operador de sistemas.	29
Figura 4 – Elementos básicos de um sistema de excitação.	33
Figura 5 – Esquema simplificado de um sistema de excitação estático <i>bus-fed</i>	34
Figura 6 – Esquema detalhado do sistema de excitação do tipo estático <i>bus-fed</i> empregado.	35
Figura 7 – Esquema da modelagem e parametrização com códigos DTDU e ACDU.	40
Figura 8 – Fluxograma do processo de validação de modelos de sistemas de excitação.	42
Figura 9 – Curva de saturação.	46
Figura 10 – Legenda das curvas de capacidade.	48
Figura 11 – Curva de capacidade para tensão nominal.	49
Figura 12 – Curva de capacidade para tensão mínima (0,95 pu).	49
Figura 13 – Curva de capacidade para tensão máxima (1,05 pu).	50
Figura 14 – Tabela 5.5 da referência técnica.	51
Figura 15 – Representação da rede elétrica no software ANAREDE.	52
Figura 16 – Resultados do Ensaio 1.	55
Figura 17 – Resultados do Ensaio 2.	55
Figura 18 – Resultados do Ensaio 3.	56
Figura 19 – Ensaio 3 – Registros de medição de frequência adotados como referência para o SINARQ.	57
Figura 20 – Resultados para o Ensaio 4 - Parte 1.	58
Figura 21 – Resultados para o Ensaio 4 - Parte 2.	58
Figura 22 – Resultados para o Ensaio 5 - Parte 1.	59
Figura 23 – Resultados para o Ensaio 5 - Parte 2.	59
Figura 24 – Resultados para o Ensaio 6 - Parte 1.	60
Figura 25 – Resultados para o Ensaio 6 - Parte 2.	60
Figura 26 – Resultados para o Ensaio 7 - Parte 1.	61
Figura 27 – Resultados para o Ensaio 7 - Parte 2.	61
Figura 28 – Resultados para o Ensaio 8 - Parte 1.	63

Figura 29 – Resultados para o Ensaio 8 - Parte 2.....	63
Figura 30 – Resultados para o Ensaio 9 - Parte 1.....	64
Figura 31 – Resultados para o Ensaio 9 - Parte 2.....	64
Figura 32 – Resultados para o Ensaio 10 - Parte 1.....	65
Figura 33 – Resultados para o Ensaio 10 - Parte 2.....	65
Figura 34 – Resultados para o Ensaio 11 - Parte 1.....	66
Figura 35 – Resultados para o Ensaio 11 - Parte 2.....	66
Figura 36 – Resultados para o Ensaio 12 - Parte 1.....	67
Figura 37 – Resultados para o Ensaio 12 - Parte 2.....	67
Figura 38 – Resultados para o Ensaio 13 - Parte 1.....	68
Figura 39 – Resultados para o Ensaio 13 - Parte 2.....	68
Figura 40 – Tabela de métricas para limitadores (A3.3).	71
Figura 41 – Ilustração gráfica da obtenção de ES.	73
Figura 42 – Ilustração gráfica da obtenção de ETR.	74
Figura 43 – Ilustração gráfica da obtenção de ETE.....	75
Figura 44 – Ilustração gráfica da obtenção de ETRI.	76
Figura 45 – Ilustração gráfica da obtenção de EVF	77
Figura 46 – Ilustração das etapas para cálculo de métricas pelo algoritmo.	84
Figura 47 – Varável de tensão de excitação do ensaio de verificação de tensão de teto.....	91
Figura 48 – Tensão terminal do ensaio de degrau tensão, com PSS em potência máxima.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do Gerador	44
Tabela 2 – Dados do transformador de excitação.....	44
Tabela 3 – Dados da Turbina.....	44
Tabela 4 – Dados do sistema de regulação de tensão.....	45
Tabela 5 – Dados coletados a partir do ensaio de saturação.	46
Tabela 6 – Parâmetros obtidos da curva de saturação.	47
Tabela 7 – Parâmetros consolidados da máquina síncrona.	47
Tabela 8 – Dados utilizados no cálculo das curvas de capacidade.	48
Tabela 9 – Valores de Base da Simulação.....	51
Tabela 10 – Lista de ensaios para validação.....	53
Tabela 11 – Condições iniciais de tensão e magnitude do degrau nos ensaios em vazio.	54
Tabela 12 – Impedância equivalente, condições operacionais dos ensaios de degrau de tensão em carga.....	57
Tabela 13 – Impedância equivalente, condições operacionais iniciais e magnitude dos degraus nos ensaios dos limitadores.	62
Tabela 14 – Referências dos limitadores dos ensaios.....	62
Tabela 15 – Métricas aplicadas nos ensaios 1, 2, 4, e 5.	80
Tabela 16 – Métricas aplicadas nos ensaios 6 e 7.	80
Tabela 17 – Métricas aplicadas nos ensaios de 8 a 13.....	81
Tabela 18 – Avaliação dos ensaios com UG a vazio e em carga sem PSS	85
Tabela 19 – Avaliação dos ensaios em carga com PSS.....	86
Tabela 20 – Avaliação dos ensaios de limitadores em carga.	87
Tabela 21 – Análise da taxa de aprovação dos índices.....	88
Tabela 22 – Análise da taxa de aprovação dos índices por métrica.	88
Tabela 23 – Variáveis envolvidas no cálculo do índice de ETE.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACDU	Associação de Controlador Definido pelo Usuário
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCL	<i>Coefficiente de correlación lineal</i>
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CDU	Controlador Definido pelo Usuário
CNO	<i>Consejo Nacional de Operación</i>
CS	Compensador síncrono
DAPR	Declaração de Atendimento aos Procedimentos de Rede
DARQ	Código do ANATEM para Leitura de dados de associação de arquivos de entrada e saída
DCST	Definição de Curva de Saturação
DEVT	Código para definição de eventos no ANATEM
DMDG	Definição de Modelo de Gerador
DTDU	Definição de Topologia Definida pelo Usuário
EAMN	<i>Error absoluto medio normalizado</i>
EC	<i>Error combinado</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ES	<i>Error absoluto del sobreimpulso</i>
ESP	Estabilizador de potência
ETE	<i>Error relativo en el tiempo de establecimiento</i>
ETR	<i>Error relativo en el tiempo de retardo</i>
ETRI	<i>Error relativo en el tiempo de respuesta inicial</i>
EVF	<i>Error relativo del valor final</i>
MEL	<i>Minimum Excitation Limiter</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MS	Máquina Síncrona
OEL	<i>Over Excitation Limiter</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico

PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PSS	<i>Power System Stabilizer</i>
RT	Regulador de tensão
RV	Regulador de velocidade
SCL	<i>Stator Current Limiter</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SINARQ	Recurso do Anatem para simulações com leitura de curvas
TCDU	Código para aplicação de evento do tipo degrau
TP	Transformador de potencial
UEL	<i>Under Excitation Limiter</i>
UG	Unidade geradora
UHE	Usina hidrelétrica
V/Hz	<i>Volts Hertz</i>
x_d	Reatância de eixo direto não saturada
x'_d	Reatância transitória de eixo direto não saturada
x''_d	Reatância subtransitória de eixo direto não saturada
x_q	Reatância de eixo em quadratura não saturada
x''_q	Reatância subtransitória de eixo em quadratura não saturada
x_l	Reatância de dispersão
r_a	Resistência da armadura
T'_{do}	Constante de tempo transitória de eixo direto em vazio
T''_{do}	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em vazio
T''_{qo}	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em vazio
D	Coeficiente de amortecimento
2H	Constante de inércia
Ag	Parâmetro da função de saturação
Bg	Parâmetro da função de saturação

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	25
1.1.	CONTEXTO.....	25
1.2.	MOTIVAÇÃO.....	28
1.3.	OBJETIVO	31
1.3.1.	Objetivo geral.....	31
1.3.2.	Objetivos específicos.....	31
2.	VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DO SIN	32
2.1.	INTRODUÇÃO AO SISTEMA DE EXCITAÇÃO.....	32
2.2.	DIRETRIZES DE OPERADORES DE SISTEMA SOBRE O PROCESSO DE VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO.....	35
2.3.	PROCESSO DE VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO	36
2.3.1.	Insumos.....	36
2.3.2.	Ferramentas	38
2.3.3.	Etapas do processo.....	38
2.3.4.	Produtos do processo.....	42
3.	VALIDAÇÃO DE SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE UNIDADE GERADORA DO SIN: ESTUDO DE CASO	43
3.1.	VALIDAÇÃO DO MODELO PARA REPRESENTAÇÃO ESTÁTICA.....	43
3.1.1.	Descrição geral das instalações.....	44
3.1.2.	Ensaio para levantamento da Curva de Saturação	45
3.1.3.	Parâmetros da máquina síncrona	47
3.1.4.	Curvas de capacidade.....	47
3.2.	VALIDAÇÃO DO MODELO PARA REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO	50
3.2.1.	Modelo ANATEM.....	50
3.2.2.	Rede elétrica equivalente	51

3.2.3.	Lista de ensaios de validação da simulação dinâmica	52
3.2.4.	Resultados da validação do modelo do sistema de excitação em vazio	54
3.2.5.	Resultados da validação do modelo do sistema de excitação em carga	57
3.2.6.	Resultados da validação do modelo dos limitadores do sistema de excitação	62
4.	UTILIZAÇÃO DAS MÉTRICAS NA AVALIAÇÃO.....	69
4.1.	CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DAS MÉTRICAS	69
4.2.	SELEÇÃO DAS MÉTRICAS	70
4.2.1.	CNO 1825 – Anexo 3	70
4.2.2.	Métricas selecionadas	72
4.2.3.	Tabelas de utilização de métricas por ensaios.....	79
5.	USO DE MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO	82
5.1.	METODOLOGIA ADOTADA PARA APLICAÇÃO DAS MÉTRICAS	83
5.2.	ALGORITMO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO	83
5.3.	RESULTADOS NUMÉRICOS.....	84
5.3.1.	Resultados para os ensaios com UG a vazio e em carga, sem PSS.....	85
5.3.2.	Resultados para os ensaios com UG em carga, com PSS	86
5.3.3.	Resultados para os ensaios de atuação de limitadores com UG em carga	87
5.3.4.	Análise dos resultados numéricos.....	87
5.4.	ASPECTOS PERTINENTES AO USO DE MÉTRICAS COMO RECURSO AVALIATIVO	89
5.4.1.	Comportamentos e características de interesse na avaliação	89
5.4.2.	Ensaio e variáveis a serem avaliados.....	90
5.4.3.	Adequação dos dados a serem avaliados	92
5.4.4.	Seleção das métricas	92
5.4.5.	Robustez e sensibilidade das métricas	92
5.4.6.	Escolha dos limites de referência das métricas para a avaliação.....	95

5.4.7.	Dependência da aprovação frente aos resultados	96
6.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	98

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados o contexto geral, as justificativas e os objetivos do trabalho de conclusão de curso.

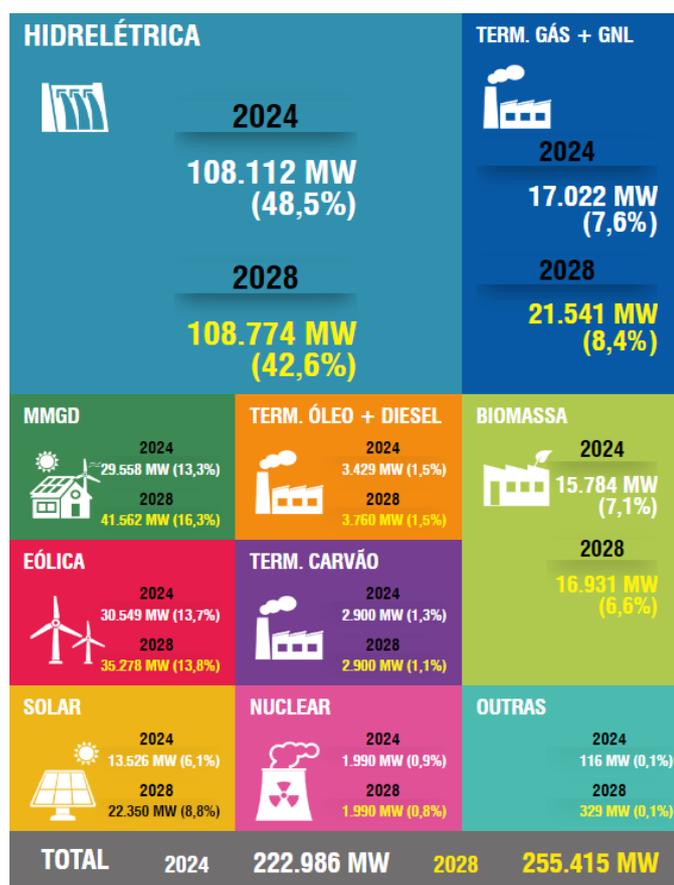
1.1. CONTEXTO

O Brasil possui uma matriz de energia elétrica com predominância de fontes renováveis, tendo a geração hídrica como principal fonte. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) com origem em fontes hídricas é de 108.112 MW, correspondendo à parcela significativa de 48,5% da capacidade instalada total em 2024. Essa fonte continuará sendo a principal em 2028, com previsão de 42,6% do total, conforme ilustrado na Figura 1.

Também na Figura 1, observa-se a previsão de aumento da capacidade instalada da geração, alcançando 255.415 MW em 2028, correspondendo a um aumento de 14,5% em relação a 2024. Destaca-se o aumento expressivo da capacidade instalada de outras fontes de energia renováveis, como solar e eólica. Nesse contexto de grande aumento de fontes de geração baseada em conversores, a proporção de geração de energia baseada em usinas com máquinas síncronas com conexão direta tende a diminuir em relação ao total, o que agrega maiores incertezas em relação à resposta dinâmica do sistema elétrico. Desta forma, destaca-se a importância das ações de controle feitas pelas usinas hidrelétricas (UHEs) remanescentes, e também por compensadores síncronos (CS), para garantir a estabilidade e a segurança do sistema.

Adicionalmente, a expansão contínua da geração do SIN implica na necessidade da expansão tempestiva dos sistemas de transmissão de energia elétrica. Segundo os estudos de expansão realizados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), publicados no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) para 2031, espera-se um aumento de 33.633 km de linhas de transmissão em relação a 2021, conforme observa-se na Figura 2.

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada no SIN de julho 2024 até dezembro 2028.



Fonte: (ONS, 2024a).

Figura 2 – Estimativa da evolução física do sistema de transmissão do SIN - linhas de transmissão.

Tensão	±800 kV	750 kV	±600 kV	500 kV	440 kV	345 kV	230 kV	TOTAL
	km							
Estimativa dez/2021	9.204	2.683	12.816	68.583	6.869	10.397	64.721	175.273
Evolução 2022-2031	2.920	0	0	18.180	77	1.488	10.968	33.633
Evolução 2022-2026	0	0	0	7.228	66	1.354	8.713	17.361
Evolução 2027-2031	2.920	0	0	10.952	11	134	2.256	16.273
Estimativa dez/2031	12.124	2.683	12.816	86.763	6.946	11.885	75.690	208.907

Fonte: (PDE, 2024).

O panorama apresentado evidencia o aumento da complexidade na operação do SIN e aponta para um grande volume de investimentos necessários. Desse modo, variados tipos de estudos elétricos são realizados pelo ONS, constituindo um mecanismo fundamental para a operação segura e redução de custos relativos à operação e manutenção do SIN.

Diante da importância dos estudos elétricos e a necessidade de sua organização e estruturação, a ANEEL, com base em proposições do ONS, submeteu a consulta pública uma série de procedimentos relacionados com as atividades de estudos elétricos. Neste contexto, os Procedimentos de Rede estabelecem regras para as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica no SIN, de acordo com a atribuição dada pela Lei nº 9.648, de 17 de maio de 1998. Os submódulos dos Procedimentos de Rede referentes a estudos elétricos, em particular, estabelecem rotinas, exigências, metodologias, e demais orientações, acerca de estudos elétricos e de seus respectivos processos. São alguns exemplos o Submódulo 2.3 “Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos” e o Submódulo 3.9 “Validação de dados e modelos de componentes para estudos elétricos” (ONS, 2022, 2020).

Entre os estudos elétricos tratados nos citados submódulos dos Procedimentos de Rede, destaca-se que muitos são realizados mediante a execução de simulações computacionais complexas. Para simular determinado cenário ou condição operativa alvo de estudo, utilizam-se modelos computacionais que visam representar, em ambiente de simulação, o comportamento, dos inúmeros componentes que compõem o sistema elétrico pertencente ao estudo de interesse.

Portanto, enfatiza-se que a qualidade dos estudos elétricos depende da capacidade dos modelos de representar de forma eficiente os comportamentos reais dos componentes do sistema elétrico, para assim trazer confiabilidade para os resultados obtidos nas simulações e, conseqüentemente, para os estudos elétricos. Em concordância com GÓMEZ e DECKER (2015), a qualidade dos modelos usados nas simulações de sistemas elétricos de potência é muito relevante para garantir a operação segura de sistemas. De fato, segundo ZYMLER (2020), as decisões operacionais são baseadas, sobretudo, em simulações realizadas pelos estudos de planejamento da operação.

1.2. MOTIVAÇÃO

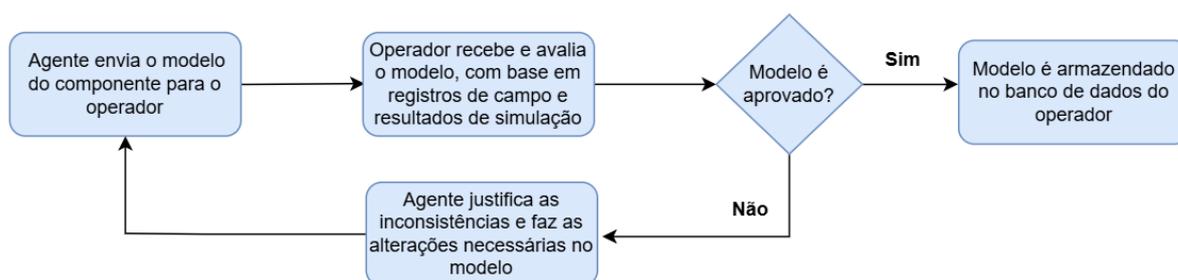
Devido à importância dos estudos elétricos para operação segura do SIN, bem como à necessidade de se dispor de uma base de dados para simulação dinâmica consistente, um dos submódulos que foi submetido pela ANEEL e ONS para consulta pública é o Submódulo 3.9 ONS (2020), que aborda o processo de validação de dados e modelos de componentes para estudos elétricos. Segundo GÓMEZ e DECKER (2015), a validação de um modelo consiste em confirmar se o resultado da simulação para uma determinada perturbação corresponde razoavelmente bem à dinâmica registrada em campo para a semelhante perturbação.

No submódulo 3.9 são estabelecidos processos importantes para a consolidação da base de dados e de modelos de componentes, tais como o recebimento de dados e modelos de componentes, e validação dos dados e atualização da base de dados. Dentro do processo de recebimento de dados e modelos de componentes, enfatiza-se o subitem 1.3.1 do citado documento, que estabelece que “os agentes precisam enviar ao ONS a validação dos modelos de componentes, contendo a comparação entre os registros de campo e os resultados das simulações com os modelos atualizados e com os ajustes feitos em campo”. Já referente ao processo de validação dos dados e atualização da base de dados estabelecido no mesmo submódulo, destaca-se o subitem 2.1, que estabelece que “o ONS analisará e atestará a validade dos dados e modelos de componentes que serão utilizados nos estudos elétricos do SIN”.

Com base no descrito acima, evidencia-se que a validação de modelos de componentes por parte dos agentes, como por exemplo dos sistemas de excitação de máquinas síncronas, assim como a avaliação da validade dos modelos de componentes feita pelo ONS, são processos essenciais para constituição e manutenção de uma base de dados e modelos consistente a ser utilizada em estudos elétricos.

Diante deste contexto, é pertinente destacar as etapas envolvidas no processo de avaliação de modelos de componentes, bem como os fatores que justificam e fundamentam a necessidade do operador de sistemas possuir uma rotina avaliativa de modelos de componentes precisa, confiável e ágil. Neste sentido, apresenta-se o fluxograma da Figura 3, que evidencia os processos que permeiam a avaliação dos modelos de componentes.

Figura 3 – Processo de avaliação e inserção de modelos na base de dados do operador de sistemas.



Fonte: Autor (2024)

Conforme apresentado na Figura 3, entre as etapas do processo tem-se a decisão de aprovar ou reprovar o modelo submetido pelo agente. No caso de reprovação, há necessidade de mais um ciclo com correções e uma nova entrega por parte do agente e uma nova avaliação pela parte do operador. Por outro lado, no caso da aprovação, o modelo é armazenado no banco de dados do operador e fica disponível para ser usado em estudos elétricos diversos, desenvolvidos pelo operador ou outros interessados. Neste caso, a resposta do modelo passa a contribuir para a resposta simulada do sistema, podendo impactar os resultados dos estudos, bem como as decisões derivadas dele.

Nesta perspectiva, enfatiza-se a necessidade de agilidade e precisão no processo avaliativo de modelos de componentes. Essa necessidade é sustentada por dois fatores principais. O primeiro é a complexidade dos sistemas elétricos, que exige estudos com muitas simulações para sua representação. O segundo fator é a importância do uso de modelos de componentes elétricos nessas simulações.

Segundo ALLEN *et al.* (2010), os modelos de componentes são a base de praticamente todos os estudos em sistemas de energia. Dessa forma, eles permitem que o desempenho do sistema elétrico, tanto dinâmico quanto em regime permanente, seja representado em ambiente de simulação.

Salienta-se que o SIN é um sistema elétrico de grande porte, caracterizado por uma extensa malha de transmissão em corrente alternada e em corrente contínua, e com grande diversidade de fontes de geração, caracterizando-se de alto grau de complexidade operacional. De acordo com DECKER *et al.* (2010), a grande dimensão e complexidade do sistema elétrico torna a identificação e a validação de modelos e dados uma tarefa mais difícil. Essa perspectiva também se aplica aos modelos de componentes. Ter uma etapa avaliativa ágil e precisa ajuda a

reduzir as dificuldades impostas pela complexidade do sistema. Além disso, com uma avaliação mais rápida e precisa, aumenta-se o número de modelos validados disponíveis na base de dados em menos tempo, o que contribui para a consolidação da base de dados.

Reforça-se que os estudos elétricos desenvolvidos pelo operador são imprescindíveis para a garantia da segurança operacional do sistema, assim como para a redução de custos de operação e manutenção do SIN. Utilizar um modelo que não represente bem o comportamento do respectivo componente em campo pode prejudicar os resultados obtidos, bem como as tomadas de decisão provenientes destes resultados, podendo acarretar prejuízos financeiros, e segundo ZYMLER (2020), levar o sistema a operar de forma inadequada ou até mesmo insegura.

Um exemplo dos impactos negativos que os problemas na base de dados podem trazer foi verificado na perturbação de 15/08/2023 no SIN, que teve como consequência o desligamento de mais de 22 GW de carga em 25 estados no Brasil e no Distrito Federal. Conforme ONS (2023), modelos matemáticos de centrais geradoras eólicas e fotovoltaicas informados pelos agentes demonstraram, em ambiente de simulação, um comportamento dinâmico diferente do que foi observado em campo na citada perturbação, levando o operador a definir limites de transmissão inadequados para as condições verificadas.

Logo, estudar recursos avaliativos, como métricas de discrepância é fundamental. Esses recursos possuem o potencial de agregar celeridade e eficiência ao processo de avaliação da validade dos modelos de componentes. Além disso, ajudam a acelerar a consolidação de uma base de dados confiável para estudos elétricos e simulações. Como resultado, aumenta a confiança nos estudos e em seus resultados, contribuindo para as complexas e indispensáveis tarefas de representar, planejar e operar o SIN.

1.3. OBJETIVO

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar a utilização de métricas como um recurso para a avaliação da qualidade dos modelos de componentes do SIN. O trabalho se desenvolve por meio do estudo da metodologia de avaliação de modelos adotada pelo operador XM, da Colômbia, e a sua aplicação a um estudo de caso em um sistema de excitação de uma Unidade Geradora (UG) de uma Usina Hidrelétrica (UHE) do SIN.

1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso são:

- Estudo das rotinas de avaliação da validação de modelos de sistemas de excitação adotadas pelo ONS, e pelo operador XM, que utiliza métricas em sua avaliação;
- Modelagem do sistema de excitação de uma unidade geradora (UG) de usina hidrelétrica (UHE) do Sistema Interligado Nacional (SIN) para simulação dinâmica no ANATEM e validação do modelo por meio de sua comparação com registros de ensaios de campo;
- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para quantificação das métricas usadas na avaliação dos resultados da validação dos modelos;
- Aplicação das métricas adotadas pelo operador XM no estudo de caso de validação do modelo de sistema de excitação de UG de UHE do SIN;
- Análise de efeitos do uso de métricas como recurso para avaliação da validação.

2. VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DO SIN

Neste capítulo, será apresentado o processo de validação de modelos de sistemas de excitação do SIN. Para pronta referência, inicialmente é apresentada uma introdução ao sistema de excitação, as diretrizes dos operadores de sistemas ONS e XM sobre o processo de validação de sistemas de excitação, seguida por considerações sobre o processo de validação vigente no setor elétrico brasileiro.

Destaca-se que muitas das considerações e detalhes apresentados neste capítulo são aplicáveis ao processo de validação de modelos de componentes em geral. No entanto, o foco será dado ao sistema de excitação, considerando que o estudo de caso apresentado neste trabalho trata da validação de um sistema de excitação de uma UG de UHE do SIN.

2.1. INTRODUÇÃO AO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

O sistema de excitação é um componente indispensável em uma unidade geradora de um sistema de potência, possuindo a função de controlar e manter a tensão terminal da UG em níveis aceitáveis, além de controlar o fluxo de potência reativa. Além disso, tem a função de manter a máquina dentro de seus limites operativos, contribuindo para a segurança da unidade geradora, para a estabilidade e a segurança do sistema elétrico.

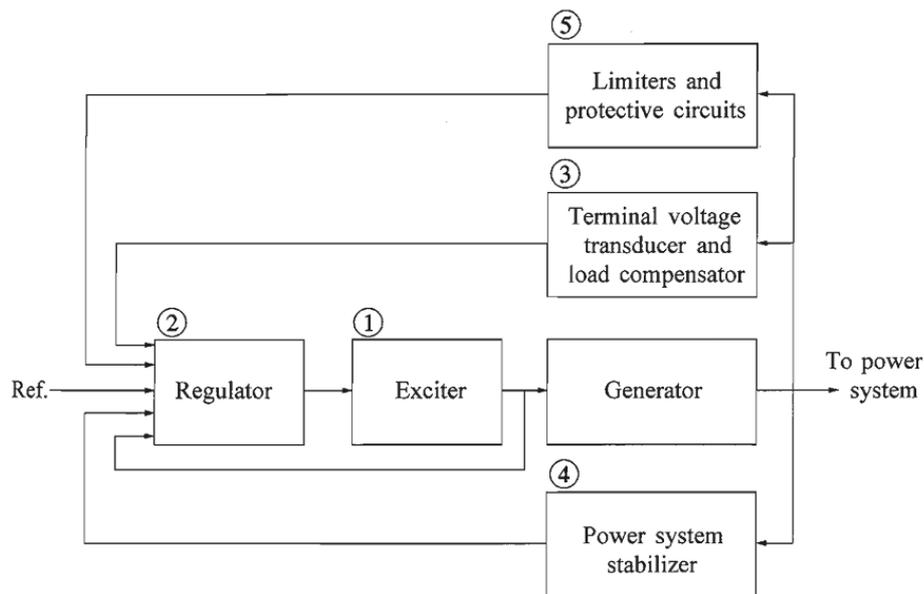
Para exercer sua função, o sistema de excitação controla a tensão aplicada no enrolamento de campo da máquina síncrona (MS). Consequentemente, ele ajusta a corrente de campo, alterando a intensidade do campo magnético gerado e controla a magnitude da tensão induzida no estator. Isso permite que a tensão gerada pela máquina seja mantida dentro de limites adequados para uma operação segura, mesmo em casos de variações nas condições operacionais do sistema, tais como mudanças nos patamares de carga.

Na perspectiva da dinâmica do sistema elétrico, o sistema de excitação também deve contribuir para o controle eficaz da tensão e a melhoria da estabilidade do sistema. Conforme KUNDUR (1994), durante perturbações como curtos-circuitos na rede, o sistema de excitação deve ser capaz de responder rapidamente de modo a aumentar as margens de estabilidade transitória.

A configuração do sistema de excitação de uma unidade geradora de uma usina hidrelétrica varia em função das características e da importância da máquina e da usina. Conforme ilustrado na Figura 4, os sistemas de excitação possuem os seguintes elementos

básicos: Excitatriz, regulador de tensão, transdutor de tensão terminal e compensador de carga, estabilizador de potência, e limitadores e circuitos de proteção. Tais componentes são descritos a seguir.

Figura 4 – Elementos básicos de um sistema de excitação.



Fonte: KUNDUR (1994)

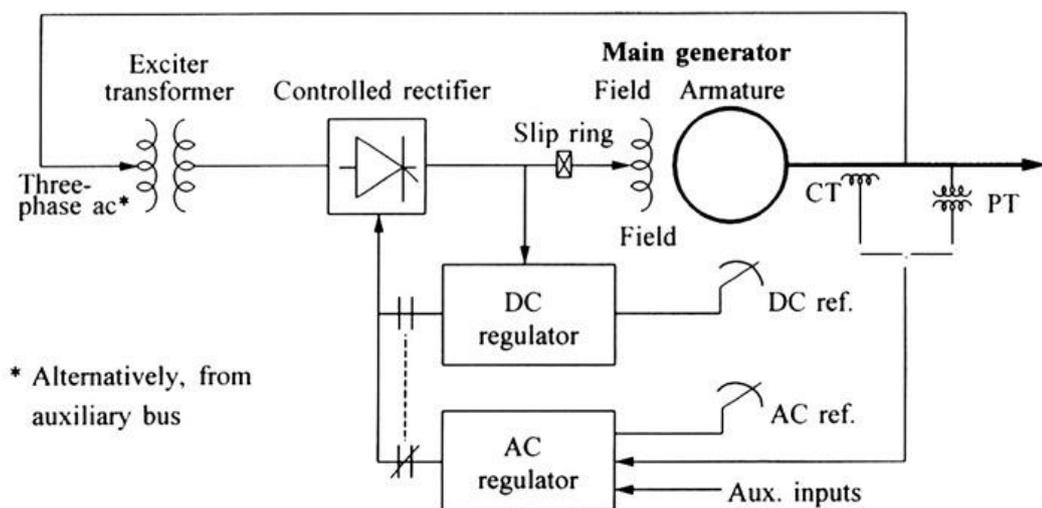
- **Excitatriz:** É a fonte de tensão/corrente contínua usada para alimentar o enrolamento de campo da máquina síncrona a ser excitada;
- **Regulador de tensão:** O regulador automático de tensão controla a tensão de saída da máquina síncrona, ajustando a excitação conforme necessário. O regulador mantém a estabilidade da tensão gerada e responde a variações na carga, contribuindo para a confiabilidade do sistema de geração;
- **Transdutor de tensão terminal e compensador de carga:** Detecta a tensão terminal do gerador, retifica e filtra para uma quantidade em corrente contínua, e a compara com uma referência; o compensador de carga pode ser fornecido se for desejado manter a tensão em um ponto remoto.
- **Estabilizador de potência (ESP):** O estabilizador de sistema de potência é integrado ao regulador de tensão e é responsável por contribuir com o amortecimento de oscilações eletromecânicas na unidade; é também conhecido pela sua designação em inglês "*Power system stabilizer*" (PSS).

- **Limitadores e circuitos de proteção:** Integrados ao regulador de tensão, incluem uma ampla gama de funções de controle e proteção que garantem que os limites de capacidade da excitatriz e do gerador síncrono não sejam excedidos. Algumas das funções mais utilizadas são: limitar a corrente de campo, limitar a corrente do estator, limitar o fluxo, e limitar a potência reativa na região de subexcitação;

Acrescenta-se que os sistemas de excitação podem ser classificados de acordo com três principais categorias, baseando-se na fonte de alimentação da excitação utilizada (KUNDUR, 1994), sendo elas: sistemas de excitação de corrente contínua (CC), sistemas de excitação de corrente alternada (CA) e sistemas de excitação estáticos.

Os sistemas de excitação CC e CA usam máquinas rotativas como fonte da excitação sendo estas, respectivamente, excitatrizes rotativas CC e CA. Os sistemas de excitação estáticos, por sua vez, possuem retificadores estáticos, controlados ou não, que fornecem a corrente de excitação diretamente para o campo do gerador síncrono. O fornecimento de energia para os retificadores vem do gerador principal (ou do barramento auxiliar da estação) através de um transformador para reduzir a tensão a um nível apropriado, ou em alguns casos, de enrolamentos auxiliares no gerador (KUNDUR, 1994). As excitatrizes estáticas proporcionam vantagens importantes em relação às excitatrizes rotativas, como uma constante de tempo inerente muito pequena, possuindo maior velocidade de resposta. A confiabilidade deste tipo de excitatriz é uma das razões de sua ampla adoção em sistemas modernos. Na Figura 5 é ilustrado o arranjo de um sistema de excitação estático *bus-fed*.

Figura 5 – Esquema simplificado de um sistema de excitação estático *bus-fed*.

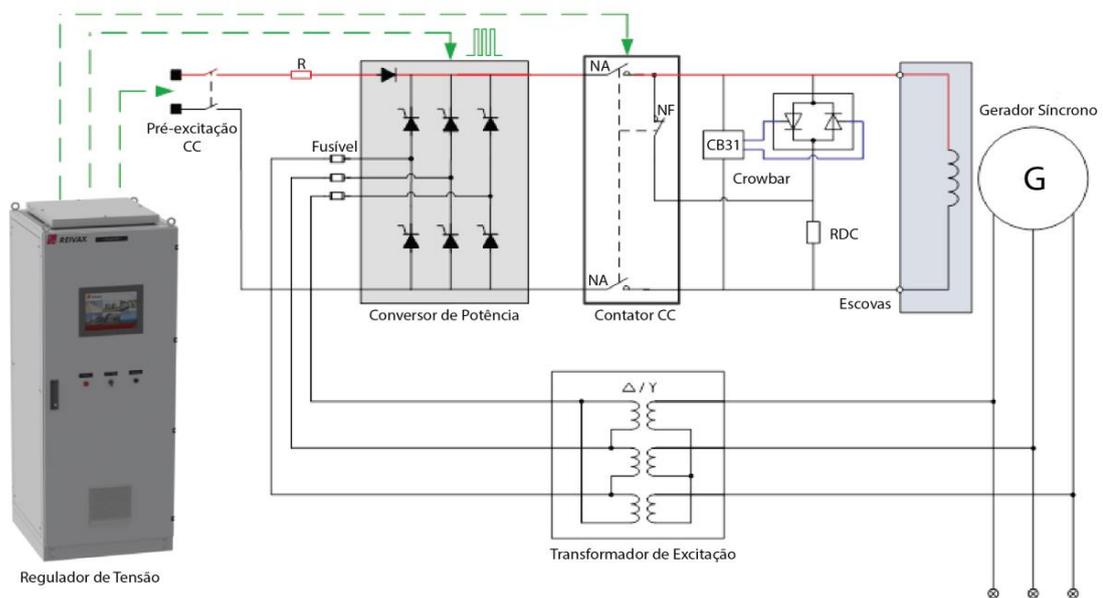


Fonte: KUNDUR (1994)

Em contraponto, o arranjo estático do tipo *bus-fed*, implica que a tensão de excitação é diretamente proporcional à tensão terminal da MS, ou seja, durante distúrbios no sistema com afundamentos de tensão, a tensão de teto, que é a máxima tensão de excitação que pode ser aplicada, será reduzida, caracterizando-se como uma desvantagem.

O sistema de excitação cujo modelo será validado neste trabalho, e para o qual métricas serão aplicadas, é do tipo estático *bus-fed*. Na Figura 6 ilustra-se o arranjo do sistema de excitação estático empregado.

Figura 6 – Esquema detalhado do sistema de excitação do tipo estático *bus-fed* empregado.



Fonte: Reivax (2022)

Na seqüência apresenta-se considerações sobre o processo de validação de sistemas de excitação.

2.2. DIRETRIZES DE OPERADORES DE SISTEMA SOBRE O PROCESSO DE VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Os modelos de simulação representam componentes vitais para o funcionamento de sistemas de potência, como é o caso dos sistemas de excitação. De fato, a importância da validação dos modelos de simulação pelos órgãos responsáveis pela operação e planejamento de sistemas de potência, tais como o ONS e XM.

O subitem 1.3.1 do Submódulo 3.9 dos Procedimentos de Rede preconiza a responsabilidade dos agentes ao ONS de entregar a comprovação da validade dos modelos. Nesta perspectiva, a referência técnica para elaboração dos relatórios de comissionamento e de validação do sistema de excitação, no item 1.4, “Processo de integração”, enfatiza que a elaboração do relatório de validação do sistema de excitação e sua subsequente aprovação caracteriza uma etapa obrigatória no processo de integração de novas UG ou CS ao sistema, além de ser um dos requisitos para obter a Declaração de Atendimento aos Requisitos dos Procedimentos de Rede - DAPR de UHE e UTE, e TL de CS (ONS, 2020, ONS 2024b).

De acordo com ONS (2024b), o item 1.3 “Relatório de validação” define que a validação do modelo matemático do sistema de excitação “consiste na reprodução de determinados ensaios de campo em um ambiente de simulação de transitórios eletromecânicos, utilizando os softwares ANATEM e ANAREDE, ambos desenvolvidos pelo CEPEL. O objetivo é demonstrar a aderência do modelo matemático aos resultados de campo”.

De maneira semelhante, o CNO, órgão responsável por estabelecer os aspectos técnicos para a operação do Sistema Interconectado Nacional (SIN) da Colômbia, aborda no documento *Acuerdo 1825* aspectos como requisitos para a validação do modelo de sistema de excitação. No Anexo 3 desse acordo, define-se que o princípio essencial da validação da resposta dinâmica do modelo é que, ao integrar este na ferramenta usada no planejamento do SIN, ele permita reproduzir, dentro de níveis aceitáveis de precisão, a resposta real dos elementos modelados diante de ensaios de campo ou perturbações em diferentes condições operativas (CNO, 2024).

2.3. PROCESSO DE VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Nesta seção é descrito o processo de validação de modelos de sistemas de excitação. Para facilitar o entendimento, apresentam-se os insumos (entradas) do processo, as ferramentas empregadas na validação, as etapas que compõem o processo e os produtos (resultados) gerados.

2.3.1. Insumos

Os insumos consistem em dados e arquivos utilizados no processo de validação do modelo, os quais possibilitam a reprodução dos ensaios de campo em ambiente de simulação. Entre os insumos empregados no processo de validação estão: arquivos contendo os registros

dos ensaios de campo, arquivos com a parametrização da MS, arquivos de parametrização da topologia do sistema de excitação e arquivos de simulação das ferramentas ANAREDE e ANATEM. Esses insumos são detalhados a seguir, sendo contextualizados com base na referência técnica para a elaboração dos relatórios de comissionamento e validação do sistema de excitação (ONS, 2024b).

- **Registros dos ensaios de campo:** Consistem em arquivos que contêm os valores das grandezas medidas durante os ensaios de campo, definidos pelo ONS. Esses registros descrevem o comportamento de campo do sistema de excitação e representam os ensaios que devem ser reproduzidos no processo de validação;
- **Arquivo de parametrização da máquina síncrona (MS):** Trata-se do arquivo de modelos pré-definidos (built-in) do ANATEM (.blt), que contém os códigos de parametrização da MS do ANATEM (DMDG e DCST). Esses códigos declaram os parâmetros do modelo da máquina síncrona utilizada nas simulações da validação;
- **Arquivo de parametrização da topologia do sistema de excitação:** Trata-se do arquivo de modelos definidos pelo usuário do ANATEM (.cdu), que contém a parametrização da topologia do sistema de excitação, contendo também o código ACDU. Esse código vincula uma nova parametrização à topologia de referência, definida pelo código DTDU, que precisa ser previamente consolidada e aprovada pelo ONS;
- **Arquivo de simulação do ANAREDE:** Trata-se do arquivo histórico do Anarede (.SAV), que contém todos os casos bases utilizados nas simulações, com suas respectivas condições iniciais a serem estabelecidas;
- **Arquivo de simulação do ANATEM:** Trata-se do arquivo de dados dinâmicos e de execução do ANATEM (.stb). Cada ensaio a ser reproduzido possui um respectivo arquivo *.stb*, que permite a reprodução dos ensaios de campo. Isso é possível por meio da integração dos arquivos descritos anteriormente e do estabelecimento de códigos de simulação que reproduzem o evento realizado no ensaio de campo.

Com a descrição dos insumos devidamente apresentada, prossegue-se com a exposição das ferramentas envolvidas na validação de modelos de sistemas de excitação.

2.3.2. Ferramentas

O ANATEM (Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos), desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), é um software que possibilita a realização de simulações dinâmicas, permitindo a análise não-linear dos transitórios eletromecânicos presentes na dinâmica de sistemas elétricos de potência.

O ANAREDE (Programa de Análise de Redes Elétricas) é um software desenvolvido pelo CEPEL que possibilita a análise de sistemas de potência em regime permanente.

2.3.3. Etapas do processo

As etapas processo de validação de modelos de sistemas de excitação, descritas neste item, são fundamentadas na definição de processo de validação previamente apresentada neste trabalho. Conforme a referência técnica do ONS (2024b), esse processo "consiste na reprodução de determinados ensaios de campo em um ambiente de simulação de transitórios eletromecânicos, utilizando os softwares ANATEM e ANAREDE, ambos desenvolvidos pelo CEPEL. O objetivo é demonstrar a aderência do modelo matemático aos resultados de campo".

As etapas do processo de validação são partes fundamentais na reprodução dos ensaios de campo, utilizando os insumos e as ferramentas previamente descritos. São elas: modelagem da máquina síncrona, parametrização da topologia do sistema de excitação, definição da rede equivalente e ajuste das condições iniciais dos ensaios, e execução das simulações do modelo, cujos resultados são comparados aos registros de campo. As descrições das etapas são apresentadas na sequência.

2.3.3.1. Modelagem da máquina síncrona

Essa etapa consiste em representar a máquina síncrona (MS) por meio da parametrização de seu modelo. O arquivo de entrada utilizado é o arquivo de modelos pré-definidos (*built-in*) do ANATEM (.blt), no qual o código DMDG define o modelo da MS a ser usado nas simulações, enquanto o código DCST realiza a leitura dos parâmetros da curva de saturação da máquina síncrona.

Nesse contexto, o modelo comumente empregado na modelagem de MS é o modelo do ANATEM de código MD02, que representa uma máquina síncrona de polos salientes com um

enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores, sendo um no eixo direto e outro no eixo em quadratura. Para modelar adequadamente a MS, é necessário identificar seus parâmetros por meio de uma metodologia específica de identificação, baseada em ensaios de campo. Após essa identificação, incluindo os parâmetros de saturação, os valores obtidos devem ser preenchidos no arquivo (.blt) de parametrização da MS.

Essa etapa é essencial no processo de validação do sistema de excitação, pois o modelo da MS influencia diretamente a validação do sistema de excitação. A tensão terminal, variável de interesse que o sistema de excitação deve controlar, é gerada no terminal da MS. Se a MS for modelada de forma inadequada, a compreensão do desempenho do modelo do sistema de excitação será comprometida, já que o sistema regula a tensão de campo, mas a transformação desta em tensão terminal depende diretamente do comportamento da MS. Assim, uma modelagem precisa da MS é crucial para avaliar corretamente o desempenho do sistema de excitação.

2.3.3.2. *Modelagem e parametrização do sistema de excitação*

Para a realização dos estudos elétricos do Sistema Interligado Nacional (SIN), o ONS exige que os agentes entreguem o modelo matemático do sistema de excitação no software ANATEM, conforme descrito no subitem 1.6, “Modelo matemático” da referência técnica para a elaboração dos relatórios de comissionamento e validação do sistema de excitação (ONS, 2024b).

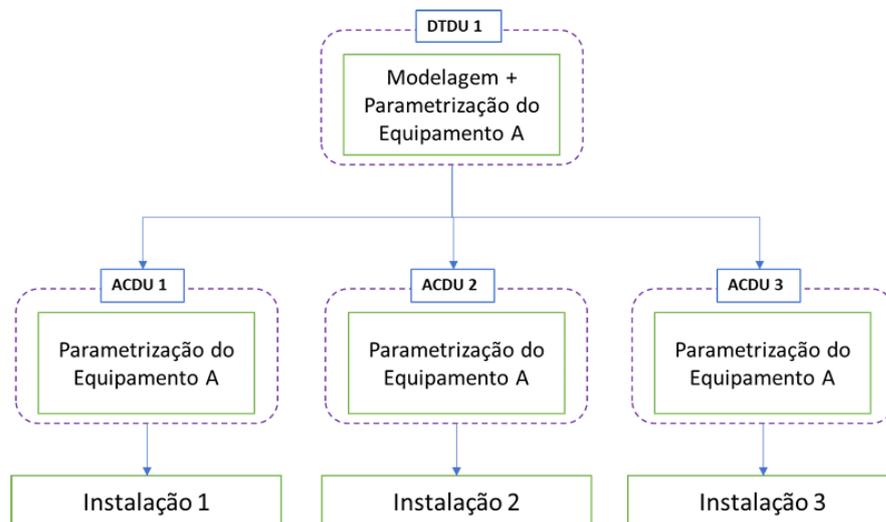
Esse modelo deve ser desenvolvido na forma de um arquivo de modelos definidos pelo usuário do ANATEM (.cdu), que represente as dinâmicas do sistema de excitação. O arquivo deve conter, por meio do código de Definição de Topologia Definida pelo Usuário (DTDU), a topologia de referência do controlador utilizado em campo, a qual deve ser consolidada e aprovada previamente a fase análise dos resultados apresentados no Relatório de Validação (ONS, 2024b).

A referência técnica do ONS (2024b), preconiza que “Caso o controlador não possua uma topologia no formato DTDU consolidada e aprovada pelo ONS, é responsabilidade do Agente elaborar o Relatório da Topologia do Controlador, que deverá ser enviado e aprovado pelo ONS durante a fase de estudo pré-operacional da integração de nova UG ou CS, ou previamente ao envio do Relatório de Validação no caso de modernizações”. Destaca-se que, durante a etapa de consolidação da topologia, deve ser realizado o desenvolvimento do modelo

matemático utilizando o código DTDU, conforme descrito na Referência técnica para elaboração da topologia do sistema de excitação (ONS, 2024c).

Além de conter a topologia de referência com sua parametrização padrão, o arquivo (.cdu) a ser entregue na validação do sistema de excitação, deve conter, por meio da associação do código de execução (ACDU), a parametrização conforme os ajustes de comissionamento realizados durante os ensaios de campo, estabelecendo-se como a aplicação da topologia de referência utilizada no processo de validação. Na Figura 7 é ilustrada a modelagem no formato DTDU e sua aplicação utilizando o código ACDU.

Figura 7 – Esquema da modelagem e parametrização com códigos DTDU e ACDU.



Fonte: (ONS, 2024c).

A modelagem e a parametrização do sistema de excitação conforme o campo constitui uma etapa essencial do processo de validação.

2.3.3.3. Definição da rede equivalente e ajuste das condições iniciais dos ensaios

Em estudos de validação de modelos, é comum tratar o sistema elétrico de forma equivalente, o que permite reduzir a dimensão do sistema modelado e colocar foco no modelo a ser validado.

Neste contexto, a rede equivalente representa, em ambiente de simulação, a configuração da rede e as condições operacionais as quais a unidade geradora esteve sujeita durante os ensaios no campo. A correta representação da rede equivalente é fundamental, pois cada ensaio é realizado em uma condição operacional específica, de modo que a representação incorreta resultará em divergências entre os resultados simulados e os obtidos em campo.

O arquivo de simulação do ANAREDE (.SAV), contém, para cada ensaio, um caso base de simulação no qual a rede equivalente é representada com as respectivas condições iniciais de tensão terminal e potência ativa, por exemplo.

2.3.3.4. Execução das simulações do modelo e comparação com os registros de campo

Para a realização das simulações no ANATEM, utiliza-se o arquivo de dados e de execução do ANATEM (.stb). No arquivo, por meio do código DARQ, são indicados arquivos de entrada e saída de dados, pertinentes à simulação. Entre os arquivos de entrada, destacam-se o arquivo de parametrização da máquina síncrona (MS), o arquivo de parametrização da topologia do sistema de excitação e o arquivo de simulação do ANAREDE.

Além disso, o arquivo (.stb), por meio do código DEVT, define as informações referentes ao evento a ser executado na simulação, com o objetivo de reproduzir o evento realizado no ensaio de campo. Um exemplo disso é a aplicação de um degrau, configurada pelo comando TCDU, que especifica a variável submetida ao degrau, sua magnitude, sentido e o instante da simulação em que o degrau ocorre. Portanto, como parte do processo de validação, é necessário sincronizar o evento aplicado na simulação ao comportamento observado no registro de campo, ajustando seus instantes, sentidos e magnitudes.

O arquivo (.stb) também permite a definição de um arquivo de saída, por meio do código DARQ, que é gerado após a execução. Esse arquivo de saída (.plt) contém informações para plotagem dos resultados da simulação. É um arquivo no formato texto, cujo conteúdo pode ser visualizado no programa Edit CEPEL, além de poder ser lido pelo programa de plotagem PlotCepel ou, ainda, ser analisado por meio de algoritmos computacionais. Adicionalmente, ao converter os arquivos de registros dos ensaios de campo para o formato (.plt), no PlotCepel torna-se possível realizar sobreposição das curvas geradas pela simulação do modelo com as curvas dos registros de campo, permitindo uma comparação visual entre ambas.

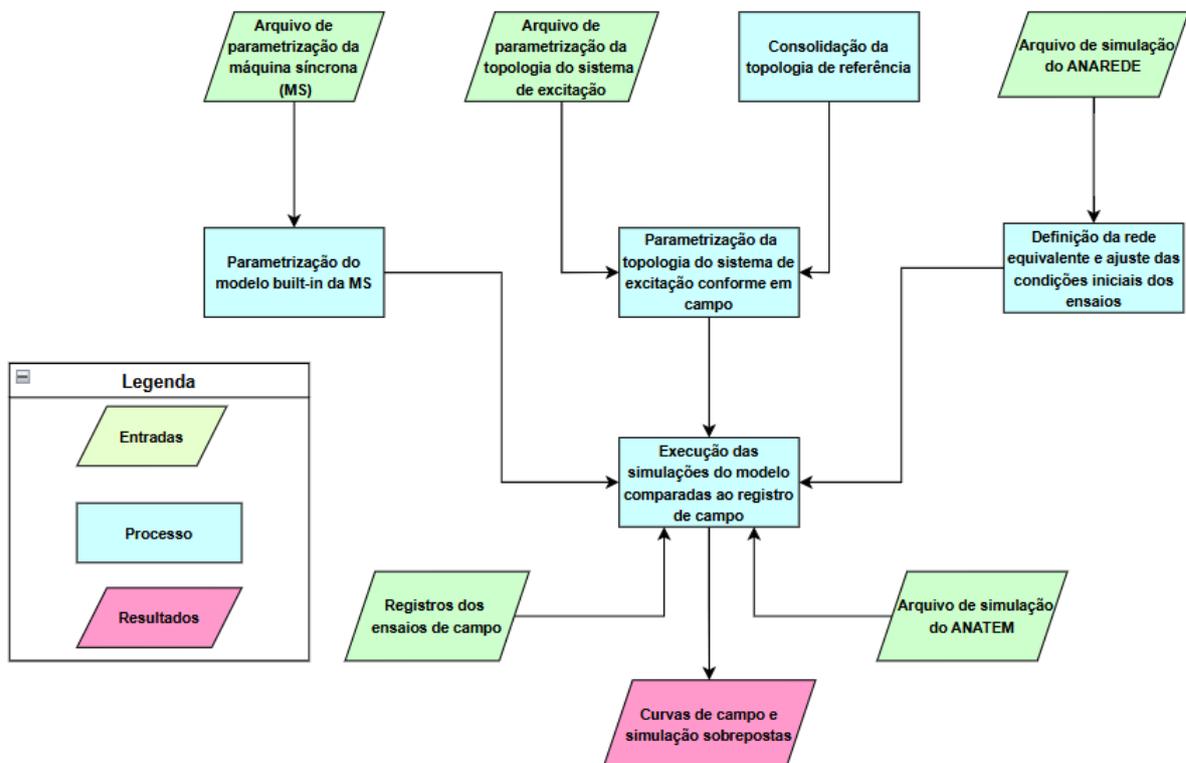
2.3.4. Produtos do processo

Entre os principais produtos do processo de validação de modelos de sistemas de excitação, têm-se as curvas geradas a partir das simulações do modelo sobrepostas com as curvas provenientes dos registros de campo. Esse resultado exprime graficamente o grau de aderência do modelo matemático aos resultados de campo e permite fazer um diagnóstico a respeito da validade do modelo de simulação.

Diante disso, medidas da discrepância entre as curvas são de extrema importância no processo de avaliação da validade dos modelos pelo operador do sistema. É no processo de análise desses resultados que o uso de recursos avaliativos, como métricas que buscam quantificar a aderência do modelo aos registros de campo, pode ser aplicado, a fim de contribuir para o processo de avaliação conduzido pelo operador.

Na Figura 8 apresenta-se, a partir de um fluxograma, o processo de validação de modelos de sistemas de excitação, conforme definição da referência técnica (ONS, 2024b).

Figura 8 – Fluxograma do processo de validação de modelos de sistemas de excitação.



Fonte: Autor (2024)

3. VALIDAÇÃO DE SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE UNIDADE GERADORA DO SIN: ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, é apresentada a validação do sistema de excitação de uma unidade geradora de usina hidrelétrica do SIN, abordando tanto a parte estática da validação, quanto a parte referente às simulações dinâmicas. Os registros de campo e as curvas resultantes das simulações são avaliadas no Capítulo 5 deste trabalho, utilizando métricas de discrepância.

Os conteúdos referentes à validação do estudo de caso deste trabalho são apresentados de forma distinta da estabelecida na referência técnica para a elaboração dos relatórios de comissionamento e validação do sistema de excitação (ONS, 2024b). Contudo, buscou-se seguir as orientações da referida referência técnica do ONS. Adicionalmente, o estudo de caso contempla a maior parte dos ensaios de campo para a validação previstos na referência técnica, com as exceções devidamente justificadas neste capítulo.

Destaca-se também, que os ensaios usados nesse estudo de caso foram realizados pela empresa Reivax S/A Automação e Controle. A unidade geradora ensaiada não será identificada.

3.1. VALIDAÇÃO DO MODELO PARA REPRESENTAÇÃO ESTÁTICA

A parte estática da validação do sistema de excitação é uma etapa essencial para garantir que a máquina síncrona e o sistema de excitação em campo estejam representados de forma coerente no modelo a ser simulado.

Será apresentada, inicialmente, a descrição geral das instalações, contendo os dados dos equipamentos pertinentes ao estudo de caso. Em seguida, será apresentado o ensaio de curva de saturação a vazio, seguido pela apresentação dos parâmetros da máquina síncrona e das curvas de capacidade. Em relação aos ensaios da validação estática descritos no capítulo 5.8 da referência técnica do ONS (2024b), não foi possível incluir o conteúdo do subitem 5.8.3, “Faixa Operativa e Confirmação dos Parâmetros de Saturação”, devido à ausência dos registros dos respectivos ensaios.

3.1.1. Descrição geral das instalações

Nas Tabelas 1 a 4, são ilustrados os dados gerais do gerador e do sistema de excitação.

Tabela 1 – Dados do Gerador

Característica	Dados
Tipo de Gerador	Síncrono
Tipo de Rotor	Polos Salientes
Potência Nominal	25,0 MVA
Tensão Nominal	13,8 kV
Fator de Potência Nominal	0,80
Tensão de Excitação Nominal	144,6 V
Corrente de Excitação Nominal	492,7 A
Frequência Nominal	60 Hz

Fonte: Autor (2024)

Tabela 2 – Dados do transformador de excitação

Característica	Dados
Potência Nominal	250 kVA
Tensão Primário	13,8 kV
Tensão Secundário	265 V

Fonte: Autor (2024)

Tabela 3 – Dados da Turbina

Característica	Dados
Tipo	Francis
Rotação nominal	327,27 rpm
Potência ativa nominal	20,50MW

Fonte: Autor (2024)

Tabela 4 – Dados do sistema de regulação de tensão

Característica	Dados
Excitação	Estática
Alimentação do Conversor de Potência	Bus-fed
Tensão Nominal de Base	13,8 kV
Potência Nominal de Base	25,0 MVA
Corrente de Excitação Base	321 A
Tensão de Excitação Base	80 V
Tensão de Teto	357,75 V
Referência Máxima de Tensão	1,05 pu
Referência Mínima de Tensão	0,95 pu
Ganho de Compensação de Corrente Reativa (CCR)	0,0
Limitador de sobreexcitação (OEL)	Referência Térmica: 1,535 pu Referência de Pico: 2,300 pu
Limitador de subexcitação (UEL)	Característica: Potência P (0,00; 1,00; 1,00) pu Q (-0,60; -0,40; -0,40) pu
Limitador SCL	Referência Térmica: 1,05 pu
Limitador V/Hz	Referência V/Hz: 1,051 pu
Limitador MEL	Referência MEL: 0,65 pu
PSS	PSS2B/C

Fonte: Autor (2024)

3.1.2. Ensaio para levantamento da Curva de Saturação

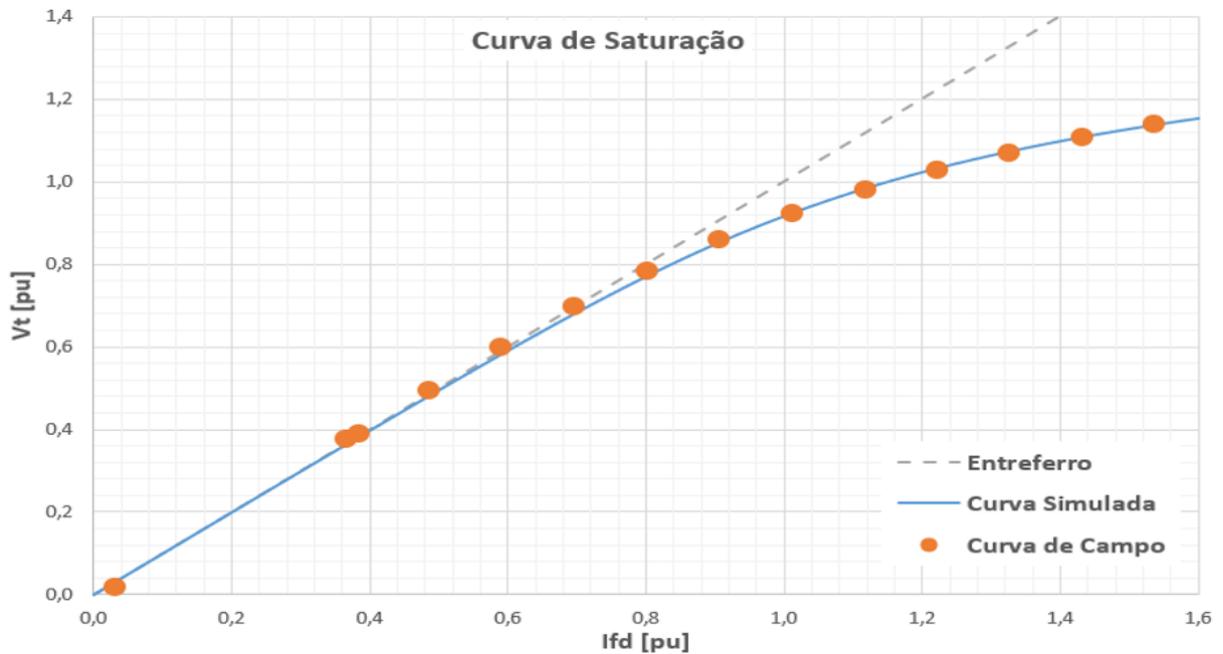
Através de registros do ensaio de curva de saturação em vazio é possível estabelecer os parâmetros do modelo da curva de saturação da máquina. A Tabela 5 relaciona os pontos coletados do ensaio de saturação, na base do entreferro. A curva de saturação modelada a partir dos dados dos ensaios é apresentada na Figura 9. A curva está sobreposta aos pontos coletados em campo.

Tabela 5 – Dados coletados a partir do ensaio de saturação.

Vt [pu]	Vf [pu]	If [pu]
0,018	0,018	0,021
0,376	0,374	0,370
0,390	0,391	0,388
0,493	0,494	0,494
0,598	0,598	0,602
0,697	0,707	0,712
0,784	0,812	0,821
0,860	0,917	0,930
0,923	1,019	1,039
0,979	1,129	1,149
1,029	1,231	1,257
1,070	1,331	1,366
1,106	1,431	1,475
1,139	1,539	1,584
1,167	1,642	1,694
1,192	1,744	1,802
1,211	1,830	1,889

Fonte: Autor (2024)

Figura 9 – Curva de saturação.



Fonte: Autor (2024)

Da curva estimada são extraídas as informações da Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos da curva de saturação.

Parâmetro	Valor
Corrente de Campo em Vazio	321 A
Corrente de Campo na base do Entreferro	268,927 A
Tensão de Campo em Vazio	80 V
Tensão de Campo na base do Entreferro	67,022 V
Resistência de Campo (75 °C)	0,249 Ω
Ag	0,0520
Bg	6,3343
Temperatura calculada no ensaio de saturação:	75 °C

Fonte: Autor (2024)

3.1.3. Parâmetros da máquina síncrona

Os parâmetros da máquina síncrona foram obtidos através de ensaios de rejeição de carga de eixo direto e em quadratura, utilizando a metodologia de obtenção de parâmetros descrita em (LOBO, 2021). A Tabela 7 explicita os parâmetros identificados.

Tabela 7 – Parâmetros consolidados da máquina síncrona.

Parâmetro	Valor Identificado	Unidade
xd	0,8724	pu
x'd	0,2282	pu
x''d	0,1918	pu
xq	0,6663	pu
x''q	0,1918	pu
xl	0,1718	pu
ra	0,0200	pu
T'do	5,1350	s
T''do	0,0332	s
T''qo	0,2200	s
D	0,1	pu
2H	8,5	s

Fonte: Autor (2024)

3.1.4. Curvas de capacidade

O item 5.8.4 da referência técnica aborda a curva de capacidade, trazendo orientações para preenchimento de tabelas de informações e apresentação das curvas em três níveis de tensão: mínima, nominal e máxima (ONS, 2024b).

A seguir, é apresentada a Tabela 8 com os dados necessários e requisitados na referência para a obtenção das curvas de capacidade e também a apresentação destas. Não foi possível incluir na tabela e nas curvas os dados correspondentes relativos à proteção de perda de excitação (ANSI – 40), limites inferiores de potência mínima e faixa operativa da turbina e traçado operacional.

Tabela 8 – Dados utilizados no cálculo das curvas de capacidade.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Potência Nominal	25,0 MVA	OEL térmico	492,735 A
Tensão Terminal Nominal	13,8 kV	UEL – Tabela P	[0,00; 1,0; 1,0]
Fator de potência Nominal	0,80	UEL – Tabela Q	[-0,60; -0,40; -0,40]
Corrente de Campo Nominal	492,7 A	SCL	1,05 pu
Xd	0,8724 pu	Tensão terminal máxima	1,05 pu
Xq	0,6663 pu	Tensão terminal mínima	0,95 pu
MEL térmico	208,65 A		

Fonte: Autor (2024)

Na sequência é apresentada a Figura 10, que mostra a legenda comum às curvas de capacidade a serem apresentadas.

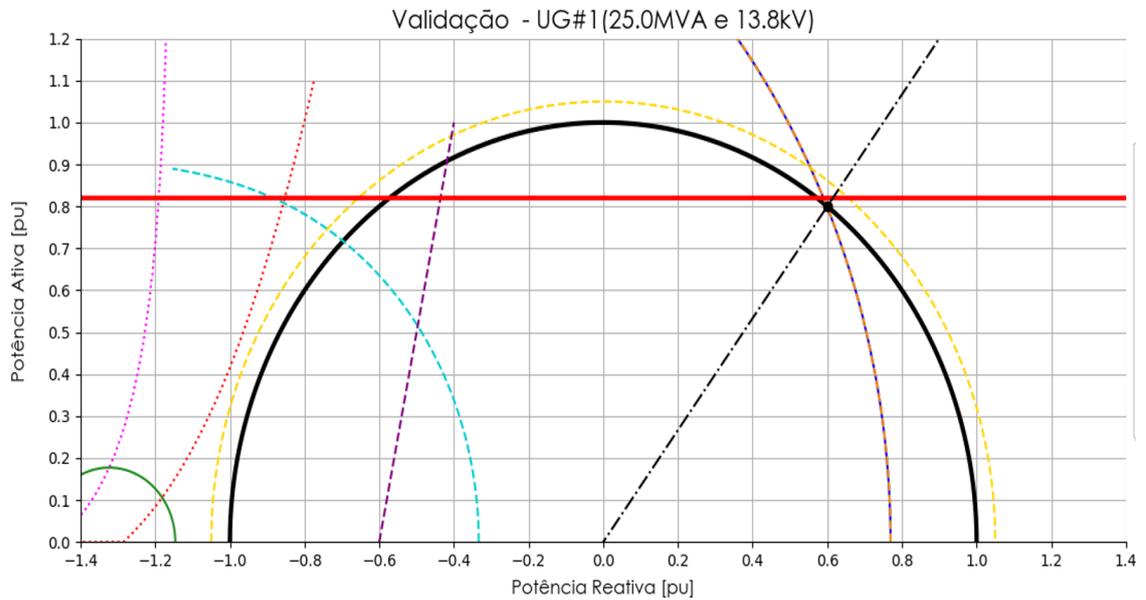
Figura 10 – Legenda das curvas de capacidade.

	Potência Nominal
	Limite de Estabilidade Teórico
	Limite de Estabilidade Prático
	Saliência Polar
	Corrente de Campo Nominal
	OEL
	MEL
	SCL
	UEL
	Potência Máxima da Turbina
	Fator de Potência Nominal
	Ponto de Operação Nominal

Fonte: Autor (2024)

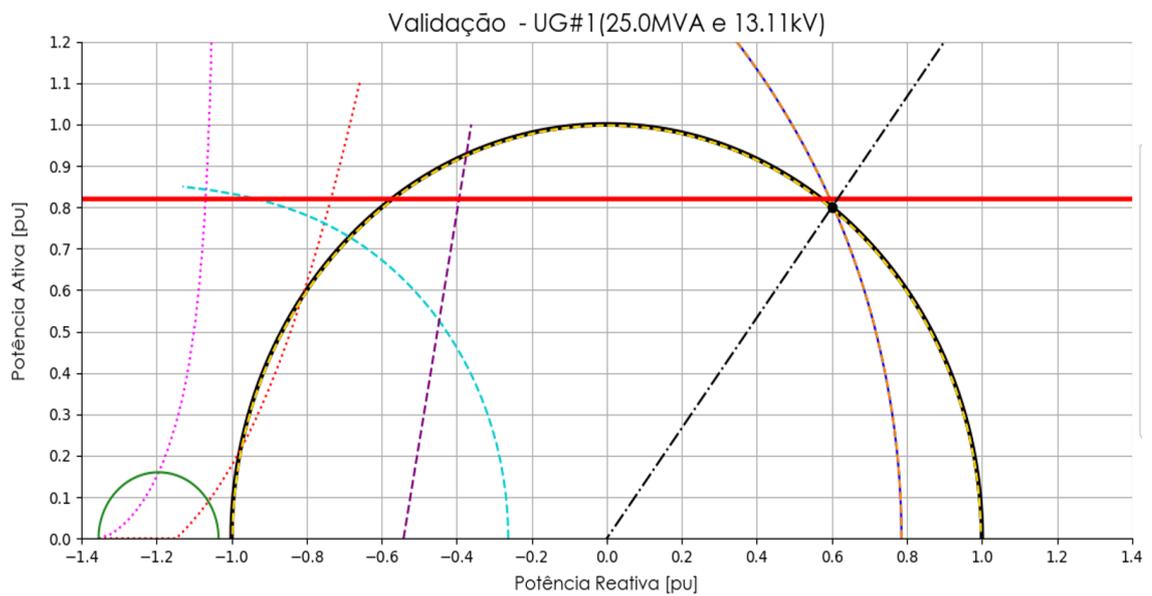
A Figura 11 apresenta a curva de capacidade para o nível de tensão nominal, enquanto a Figura 12 para o nível de tensão mínima e a Figura 13 para o nível de tensão máxima.

Figura 11 – Curva de capacidade para tensão nominal.



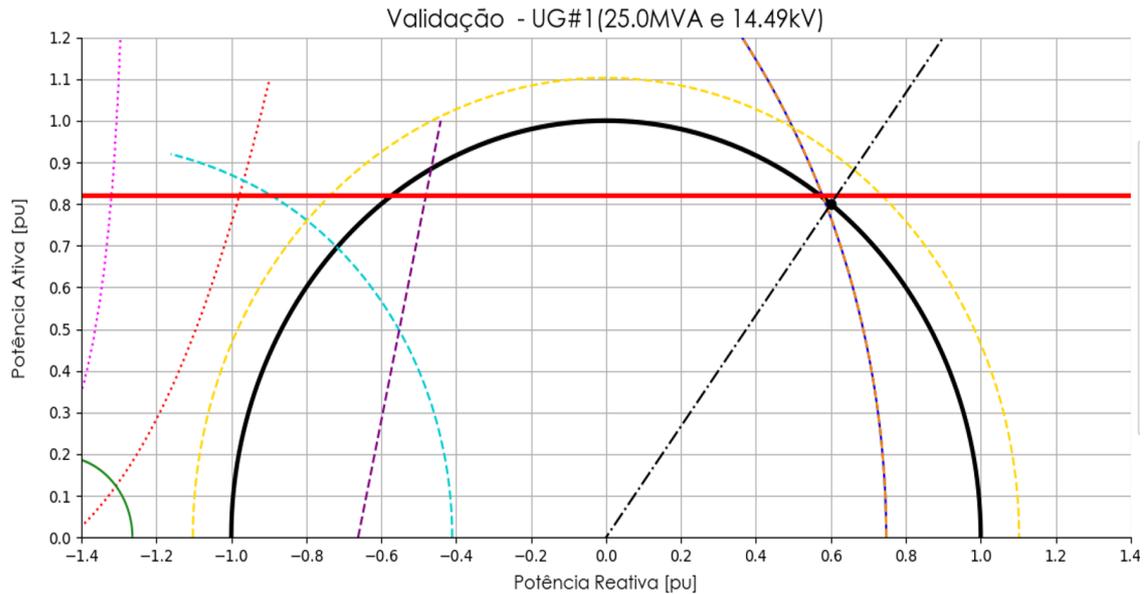
Fonte: Autor (2024)

Figura 12 – Curva de capacidade para tensão mínima (0,95 pu).



Fonte: Autor (2024)

Figura 13 – Curva de capacidade para tensão máxima (1,05 pu).



3.2. VALIDAÇÃO DO MODELO PARA REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO

Neste item, é apresentada a parte referente às simulações dinâmicas da validação, contendo considerações sobre o modelo ANATEM, com os valores de base utilizados na validação, a apresentação da rede elétrica equivalente usada no ANAREDE, a lista de ensaios a serem validados, considerações sobre a apresentação das curvas e a exibição das curvas das simulações dinâmicas dos ensaios, acompanhadas de suas respectivas tabelas de condições iniciais.

3.2.1. Modelo ANATEM

A topologia do regulador de tensão, referência, utilizada nesta validação foi desenvolvida e fornecida pela Reivax e já é consolidada e aprovada pelo ONS. Desta forma, o modelo utilizado está de acordo com o estabelecido no item 1.6 da referência técnica do ONS (2024b), também cumprindo a orientação de possuir a parametrização do código ACDU coerente com os ajustes do regulador de tensão (RT) conforme adotados nos ensaios de campo, através do correto preenchimento do arquivo (.cdu) de parametrização da topologia do sistema de excitação. Em relação aos valores de base, a Tabela 9 expõe os valores utilizados.

Tabela 9 – Valores de Base da Simulação

Característica	Dados
Potência	25,0 MVA
Tensão terminal	13,8 kV
Corrente do Estator	1046 A
Frequência	60 Hz
Corrente de campo	321 A
Tensão de campo	80 V

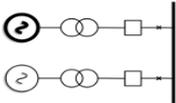
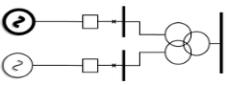
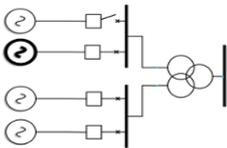
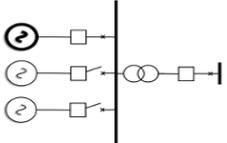
Fonte: Autor (2024)

3.2.2. Rede elétrica equivalente

Para fins da validação, as diretrizes para representação da rede equivalente simulada para cada configuração do sistema e condição operacional são descritas no item 5.7.4, “Rede equivalente” da referência técnica (ONS, 2024b).

No caso desta validação, o arranjo real da máquina é a configuração onde o transformador de potencial (TP) de medição do RT está localizado no terminal da MS, conforme mostrado na Figura 14, que retrata a tabela 5.5 do item 5.7.4 da referência técnica (ONS, 2024b).

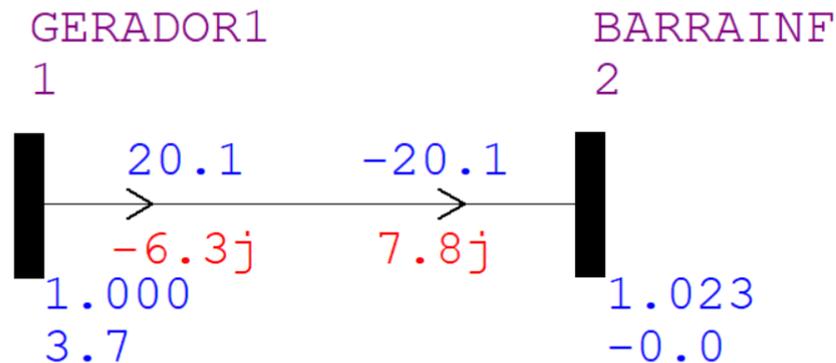
Figura 14 – Tabela 5.5 da referência técnica

Arranjo real	Condição de operação	Rede simulada
	Aplicável se o TP de medição do RT esteja localizado nos terminais da MS.	
	Aplicável se o enrolamento secundário, do TE de três enrolamentos, é individualizado por MS.	
	Aplicável se apenas a UG / CS sob teste está sincronizada no enrolamento secundário do TE de três enrolamentos.	
	Aplicável se todas as demais MS que operam conectadas no mesmo barramento com a MS sob testes estejam desconectadas.	

Fonte: (ONS, 2024b).

A rede modelada no ANAREDE é apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Representação da rede elétrica no software ANAREDE.



Fonte: Autor (2024)

A rede elétrica equivalente modelada para o processo de validação, conforme descrito na Tabela 5.5 da referência técnica (ONS, 2024b), tem como base um equivalente de *Thevenin*. Conforme ilustrado na Figura 15, consiste em uma representação equivalente do sistema elétrico através de uma barra infinita (barra 2) conectada ao terminal da UG por uma impedância equivalente. Para este trabalho, o valor da reatância equivalente atribuída à rede simulada no ANAREDE é calculado segundo a relação $XE = \Delta V / \Delta Q$ (em pu), na base de 100 MVA, em que as variações de tensão e de potência reativa são obtidas dos registros de campo.

Tal estratégia resulta em uma boa estimativa da impedância equivalente de curto-circuito, sendo frequentemente empregada em processos de validação de modelos. Observa-se que para cada ensaio, os valores das condições iniciais podem ser diferentes, portanto, as condições são representadas na rede simulada de forma coerente ao constado em campo. Logo, junto à apresentação das curvas, há uma tabela com as condições iniciais da rede simulada.

3.2.3. Lista de ensaios de validação da simulação dinâmica

Neste tópico são relacionados os ensaios requisitados para a validação do sistema de excitação, conforme o item 5.9 da referência técnica, ONS (2024b). Na Tabela 10 são apresentados os ensaios que constam na referência e cujos resultados são apresentados nesta validação (são os de índice de 1 até o 13). Os ensaios que constam na referência, mas não são apresentados na validação, são os de índice de 14 até 20.

Tabela 10 – Lista de ensaios para validação.

Índice	Ensaio	Tipo
1	Dinâmica do controle de tensão com UG em vazio por degrau de tensão	Controle automático em vazio
2	Tensão de teto com UG em vazio por degrau de tensão	Controle automático em vazio
3	Limitador V/Hz com UG em vazio por degrau de velocidade no regulador de velocidade	Limitador V/Hz em vazio
4	Dinâmica do controle de tensão com potência máxima operativa por degrau de tensão	Controle automático em carga
5	Dinâmica do controle de tensão com potência mínima operativa por degrau de tensão	Controle automático em carga
6	Dinâmica do controle de tensão com PSS habilitado com potência máxima operativa por degrau de tensão	Controle automático em carga com PSS
7	Dinâmica do controle de tensão com PSS habilitado com potência mínima operativa por degrau de tensão	Controle automático em carga com PSS
8	Potência máxima operativa por degrau de tensão e PSS habilitado	Limitadores em carga – V/Hz
9	Potência máxima operativa por degrau de tensão e PSS habilitado	Limitadores em carga – UEL
10	Potência máxima operativa por degrau de tensão e PSS habilitado	Limitadores em carga – OEL
11	Potência máxima operativa por degrau de tensão e PSS habilitado	Limitadores em carga – SCL sobrecitado
12	Potência máxima operativa por degrau de tensão e PSS habilitado	Limitadores em carga – SCL subexcitado
13	Potência mínima operativa por degrau de tensão e PSS habilitado	Limitadores em carga – MEL
14	Dinâmica do controle de tensão com tensão reduzida em vazio por degrau de tensão	Controle automático em vazio
15	Dinâmica do controle de tensão na operação como síncrono por degrau de tensão	Controle automático em carga
16	Inversão entre retificador positivo e negativo por degrau de tensão	Controle automático em carga
17	Evolução do ganho do PSS com potência máxima operativa por degraus sucessivos de tensão com o PSS habilitado.	Controle automático em carga com PSS
18	Operação como síncrono por degrau de tensão	Limitadores em carga
19	Potência máxima operativa por degrau de tensão – Sem PSS.	Limitadores em carga
20	Todos os ensaios do item 5.9.9	Rejeição de carga

Fonte: Autor (2024)

Acerca dos ensaios de potência máxima presentes na tabela acima, observa-se que nem todos atingem a máxima potência de 20,5 MW (limitação da turbina). No entanto, os ensaios

apresentados correspondem aos de maior despacho de geração dentre os registros disponíveis para aquele ensaio específico.

Em relação aos ensaios que não serão validados, destaca-se que os ensaios de operação como síncrono (índices 15 e 18) e o ensaio de inversão de ponte (índice 16) não se aplicam ao estudo de caso. Já os ensaios de índices 14, 17, 19 e 20, apesar de constarem na relação de ensaios do item 5.9 da referência técnica ONS (2024b), não são objeto de validação neste trabalho devido à ausência de seus respectivos registros de campo.

Enfatiza-se que, apesar da ausência dos ensaios de limitadores, feitos por degrau de tensão sem o *Power System Stabilizer* (PSS), há ensaios, mas com a presença do PSS. Desta forma, a atuação dos limitadores poderá ser avaliada. Por fim, destaca-se que não há registros de rejeição de carga como requisitado no item 5.9.9 da referência (ONS, 2024b).

Os resultados da validação são apresentados nas próximas seções. Como referência, as curvas referentes aos ensaios de campo são apresentadas na cor vermelha, e as curvas obtidas através das simulações do modelo são apresentadas na cor azul.

3.2.4. Resultados da validação do modelo do sistema de excitação em vazio

Para a validação do modelo do sistema de excitação com a UG em vazio, foram realizados degraus na referência de tensão (ensaios 1 e 2) e degrau na referência de velocidade do regulador de velocidade, para validação do limitador V/Hz (ensaio 3). Na Figura 16 são apresentados os resultados do ensaio 1; os resultados do ensaio 2 estão apresentados na Figura 17. As simulações foram realizadas conforme os dados da Tabela 11.

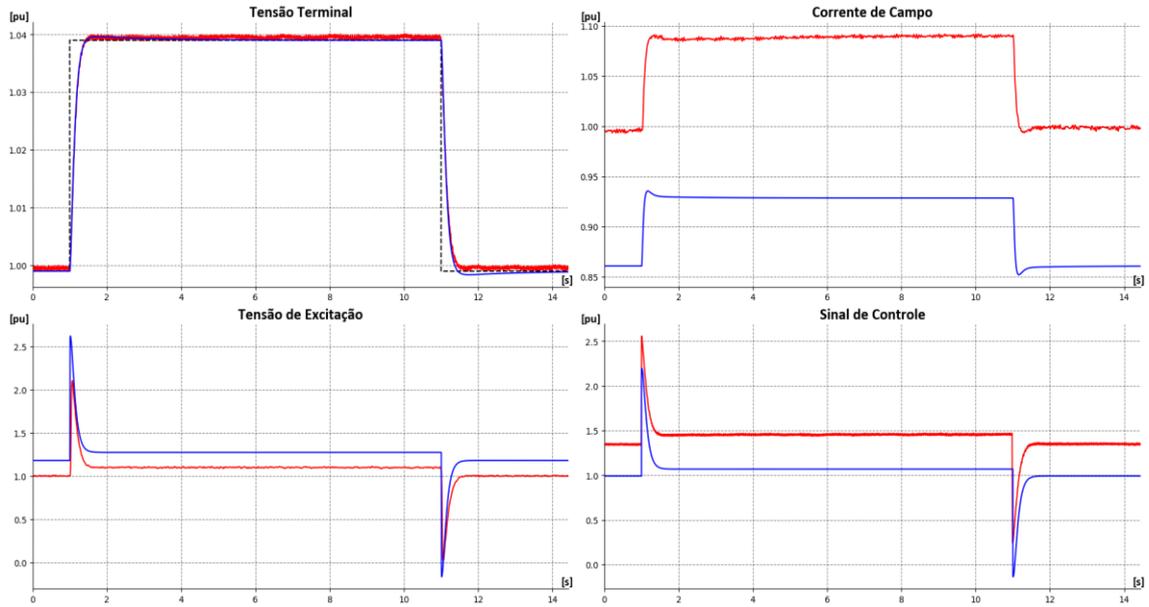
Tabela 11 – Condições iniciais de tensão e magnitude do degrau nos ensaios em vazio.

Ensaio	Tensão terminal (pu)	Degrau (pu)
1	0,999	0,040
2	0,999	0,200
3	1,000	0,040

Fonte: Autor (2024)

3.2.4.1. Degrau na Referência de Tensão Terminal – Ensaio 1

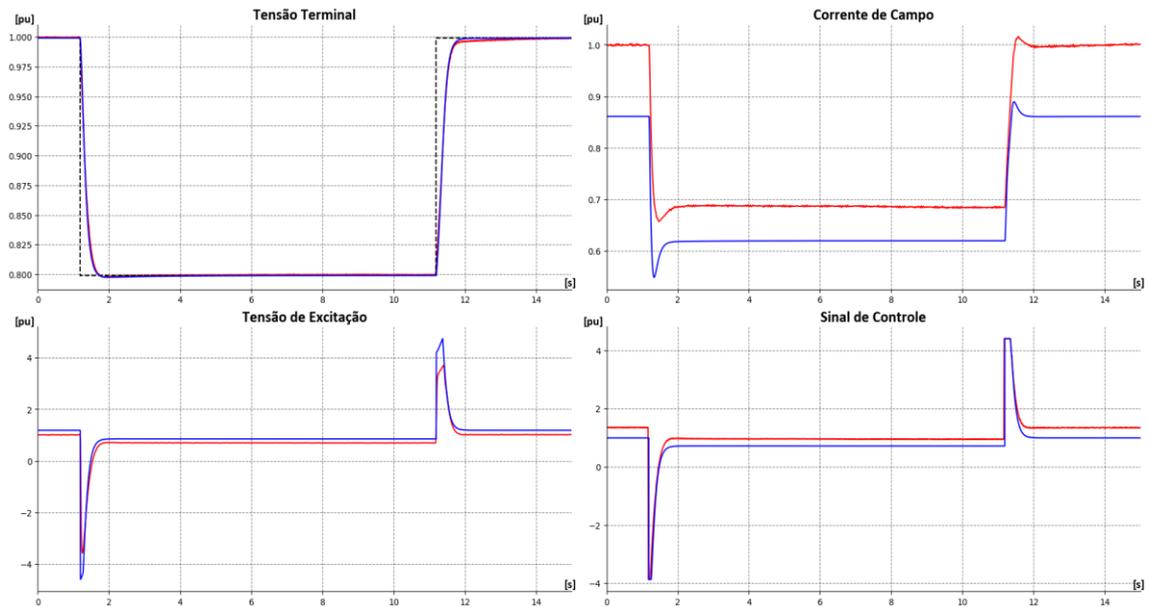
Figura 16 – Resultados do Ensaio 1.



Fonte: Autor (2024)

3.2.4.2. Verificação da Tensão de Teto – Ensaio 2

Figura 17 – Resultados do Ensaio 2.



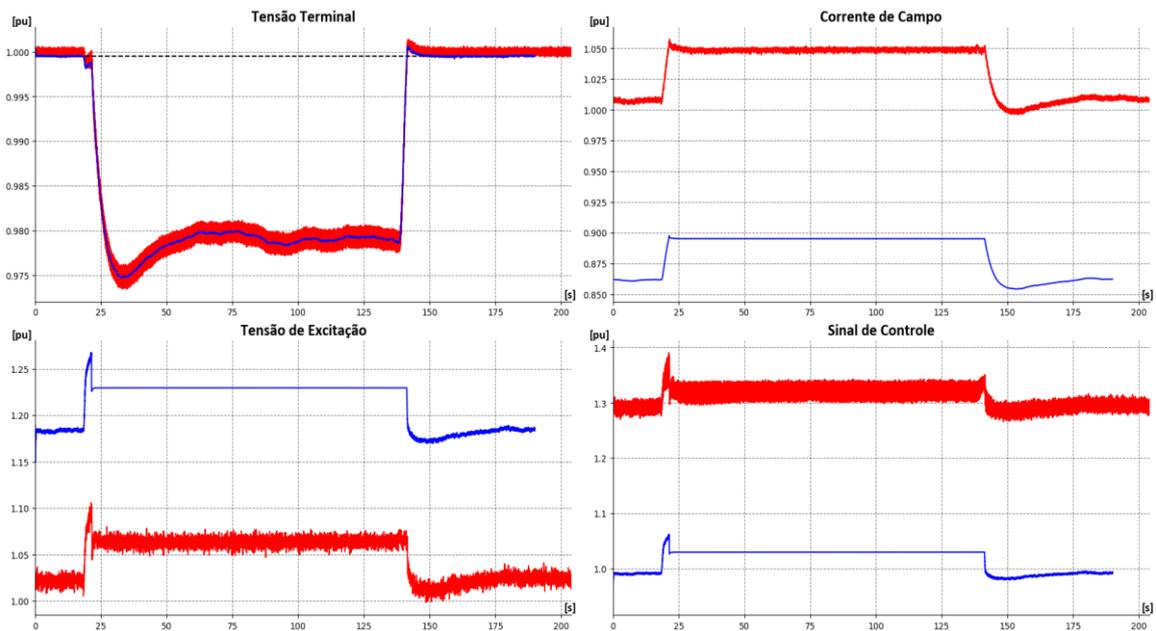
Fonte: Autor (2024)

3.2.4.3. Atuação do limitador V/Hz com a UG em vazio

Este ensaio, descrito no item 5.9.5 da referência técnica, ONS (2024b), difere dos demais devido ao uso da função SINARQ, um recurso do ANATEM para simulações com leitura de dados (curvas). No comissionamento da UG, aplicou-se um degrau de velocidade no regulador de velocidade (RV), tendo sido registrados os valores de frequência. Nas simulações de validação, são injetados os valores das medidas de frequência, via SINARQ, que são lidos na entrada de frequência do modelo do RT para simular uma queda de frequência, enquanto a MS se mantém em frequência nominal. Adicionalmente, a tensão terminal é multiplicada pela frequência medida, adotada como referência para o SINARQ, a fim de reproduzir o efeito da variação de frequência na tensão terminal, visto que a frequência no modelo permanece constante em seu valor nominal.

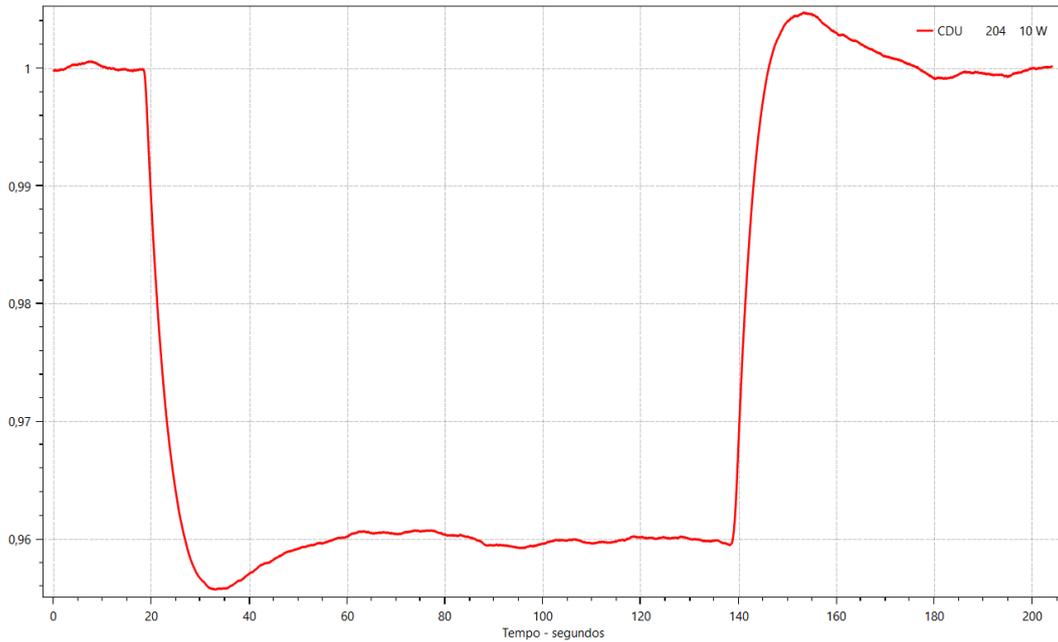
Devido à natureza única deste ensaio, ele não será avaliado por métricas no Capítulo 5 deste trabalho. Na Figura 18 é apresentada a visão geral do ensaio 3, e na Figura 19 são ilustrados os registros de frequência, injetados na simulação por meio do SINARQ.

Figura 18 – Resultados do Ensaio 3.



Fonte: Autor (2024)

Figura 19 – Ensaio 3 – Registros de medição de frequência adotados como referência para o SINARQ.



Fonte: Autor (2024)

3.2.5. Resultados da validação do modelo do sistema de excitação em carga

Para a validação do sistema de excitação em carga, foram realizados degraus na referência de tensão terminal com a UG em carga, sem PSS (ensaios 4 e 5) e com PSS (ensaios 6 e 7). As simulações foram realizadas de acordo com os dados apresentados na Tabela 12. Nas Figuras 20 a 27 são apresentados os resultados dos ensaios de índice 4 até 7.

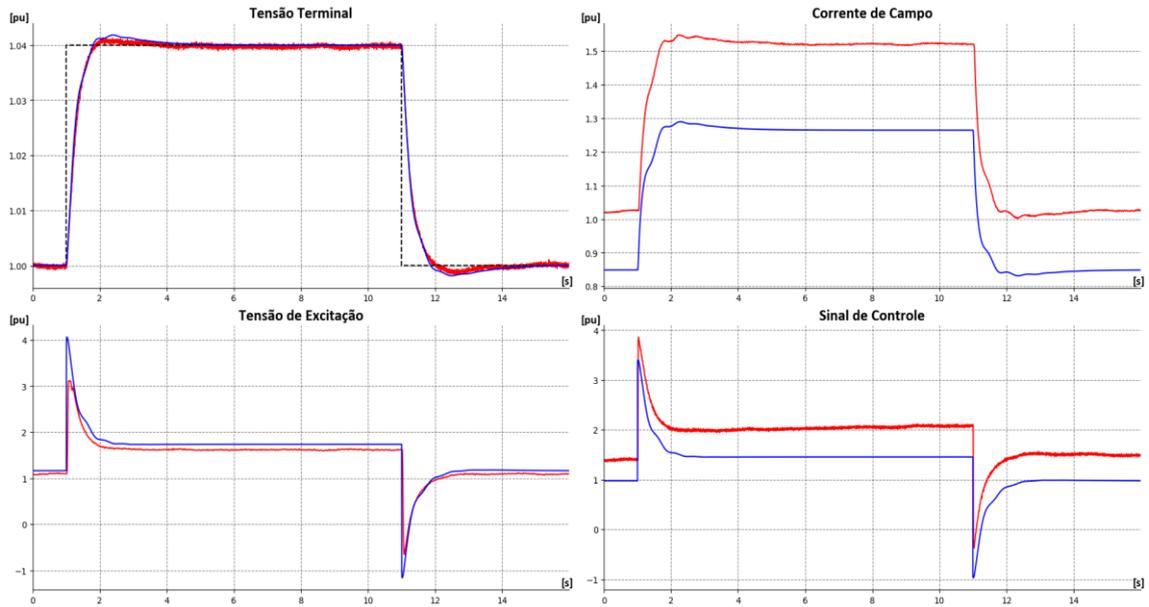
Tabela 12 – Impedância equivalente, condições operacionais dos ensaios de degrau de tensão em carga.

Ensaio	Xe (%)	Tensão terminal (pu)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (Mvar)	Degrau (pu)
4	34,0	1,000	20,1	-6,0	0,040
5	33,0	0,999	3,0	-5,1	0,040
6	33,0	0,999	20,1	-6,3	0,041
7	33,0	1,000	2,8	-5,1	0,040

Fonte: Autor (2024)

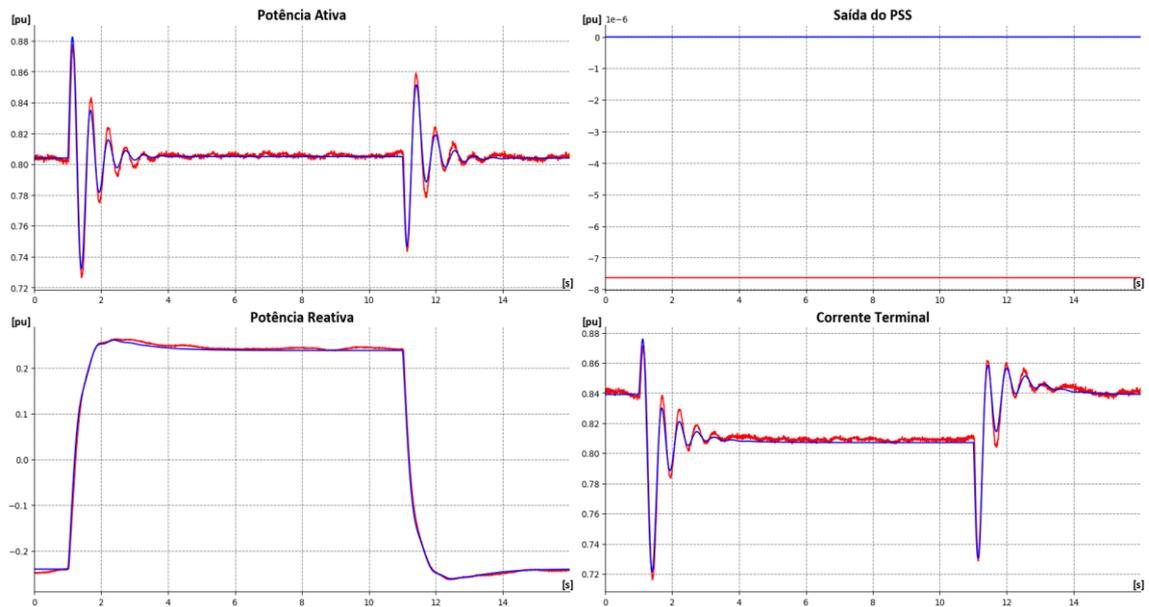
3.2.5.1. Degrau de Tensão Terminal sem PSS em potência máxima – Ensaio 4

Figura 20 – Resultados para o Ensaio 4 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

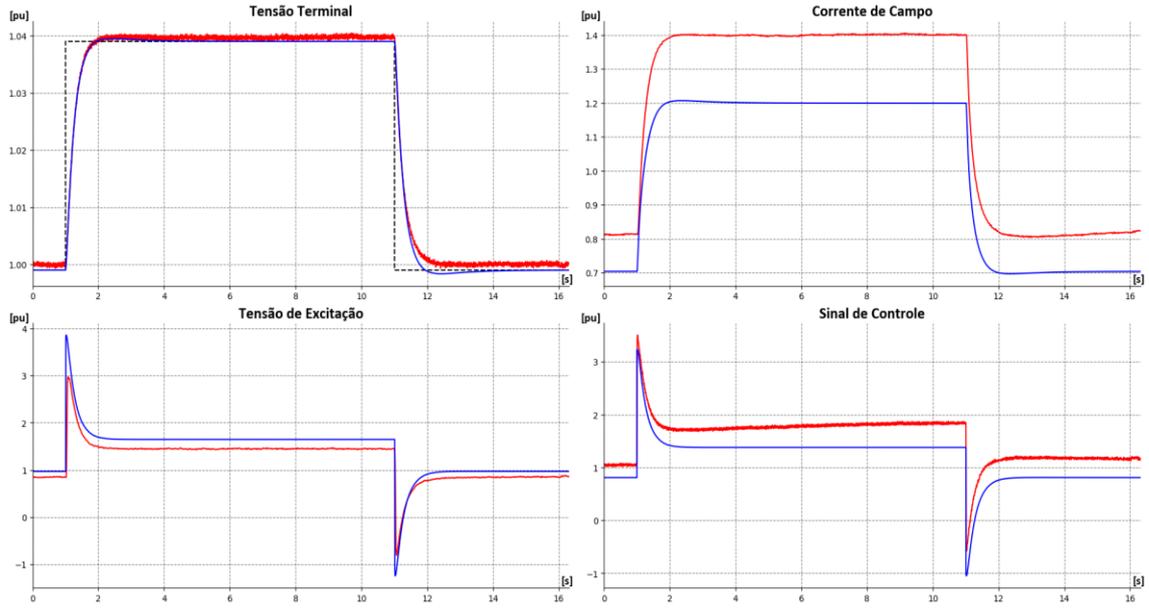
Figura 21 – Resultados para o Ensaio 4 - Parte 2.



Fonte: Autor (2024)

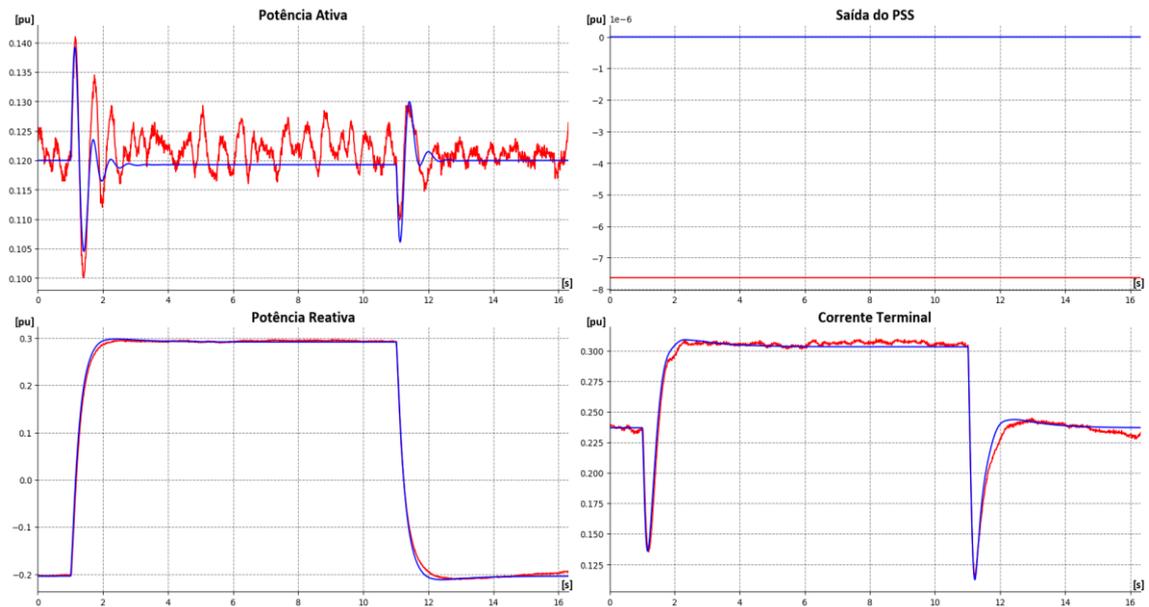
3.2.5.2. Degrau de Tensão Terminal sem PSS em potência mínima – Ensaio 5

Figura 22 – Resultados para o Ensaio 5 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

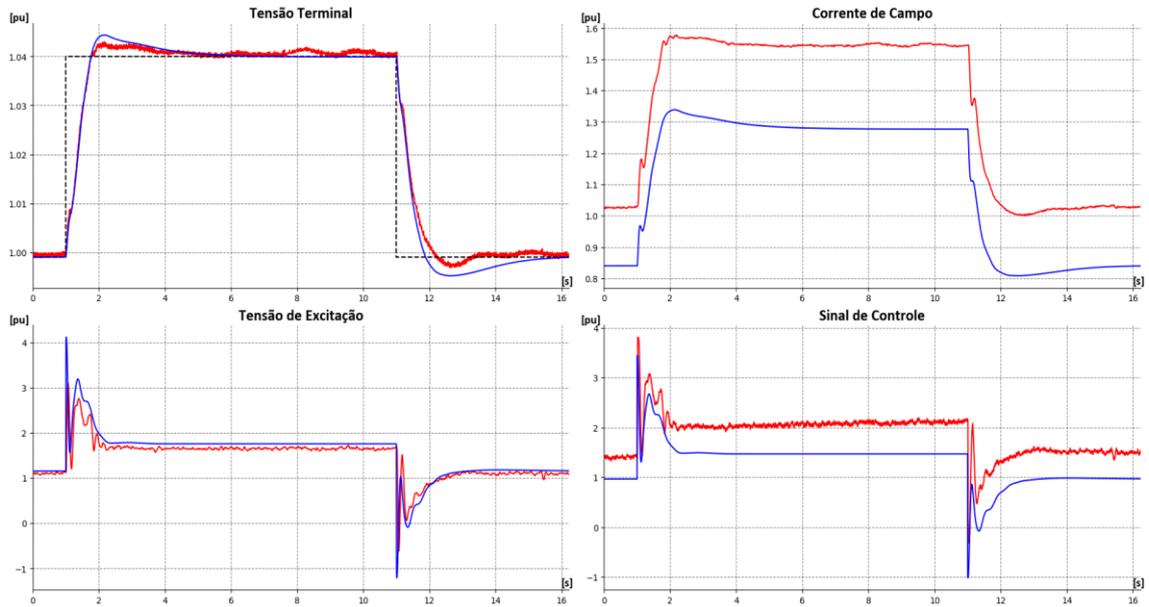
Figura 23 – Resultados para o Ensaio 5 - Parte 2.



Fonte: Autor (2024)

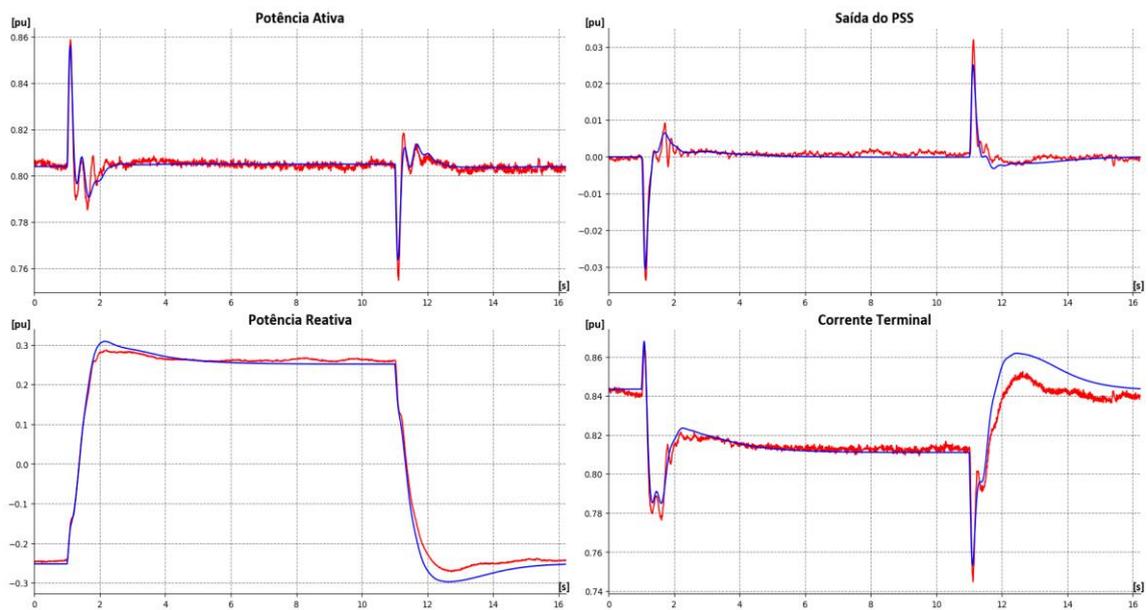
3.2.5.3. Degrau de Tensão Terminal com PSS em potência máxima – Ensaio 6

Figura 24 – Resultados para o Ensaio 6 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

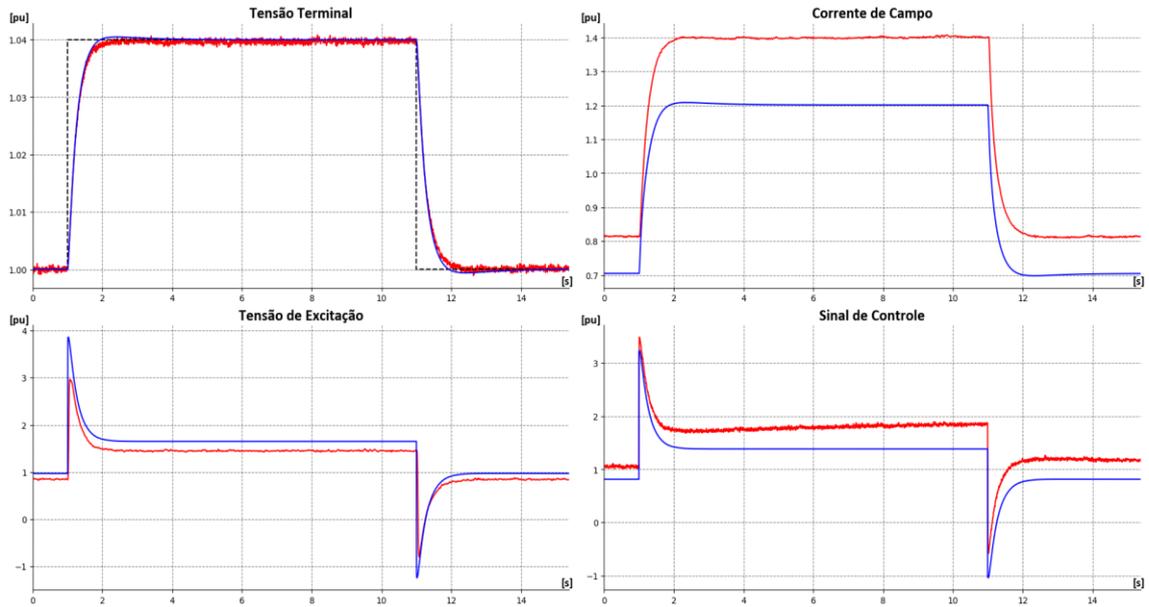
Figura 25 – Resultados para o Ensaio 6 - Parte 2.



Fonte: Autor (2024)

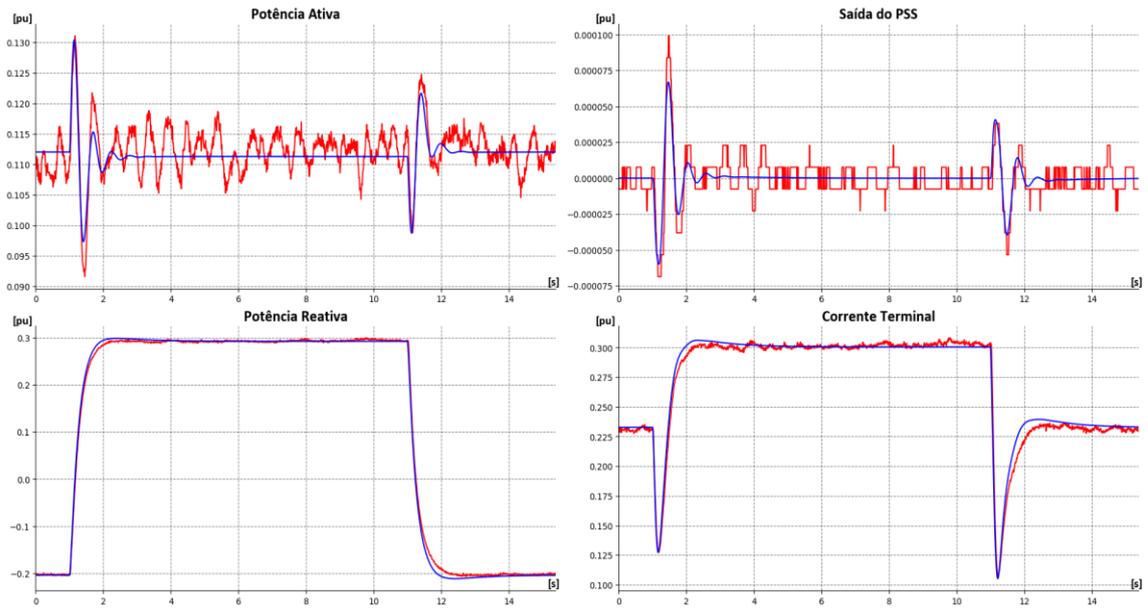
3.2.5.4. Degrau de Tensão Terminal com PSS em potência mínima – Ensaio 7

Figura 26 – Resultados para o Ensaio 7 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

Figura 27 – Resultados para o Ensaio 7 - Parte 2.



Fonte: Autor (2024)

3.2.6. Resultados da validação do modelo dos limitadores do sistema de excitação

Para a validação dos modelos dos limitadores, foram realizados degraus na referência de tensão terminal nos ensaios 8 a 13. As simulações foram realizadas para as condições indicadas da Tabela 13. Os limites associados a cada limitador estão indicados na Tabela 14.

Tabela 13 – Impedância equivalente, condições operacionais iniciais e magnitude dos degraus nos ensaios dos limitadores.

Ensaio	Xe (%)	Tensão terminal (pu)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (Mvar)	Degrau (pu)
8	32,0	1,012	15,0	-7,8	0,040
9	32,0	1,039	15,0	-0,4	-0,040
10	36,5	1,012	15,0	-7,9	0,050
11	32,5	1,015	12,1	-0,3	0,030
12	34,5	1,041	15,1	-0,1	-0,040
13	32,5	1,000	3,1	-4,9	-0,030

Fonte: Autor (2024)

Tabela 14 – Referências dos limitadores dos ensaios.

Limite V/Hz	Limite UEL	Limite OEL Instantâneo	Limite OEL Térmico	Limite SCL Sobre	Limite SCL Sub	Limite MEL
1,029	-0,199	1,050	0,840	0,520	0,639	0,576

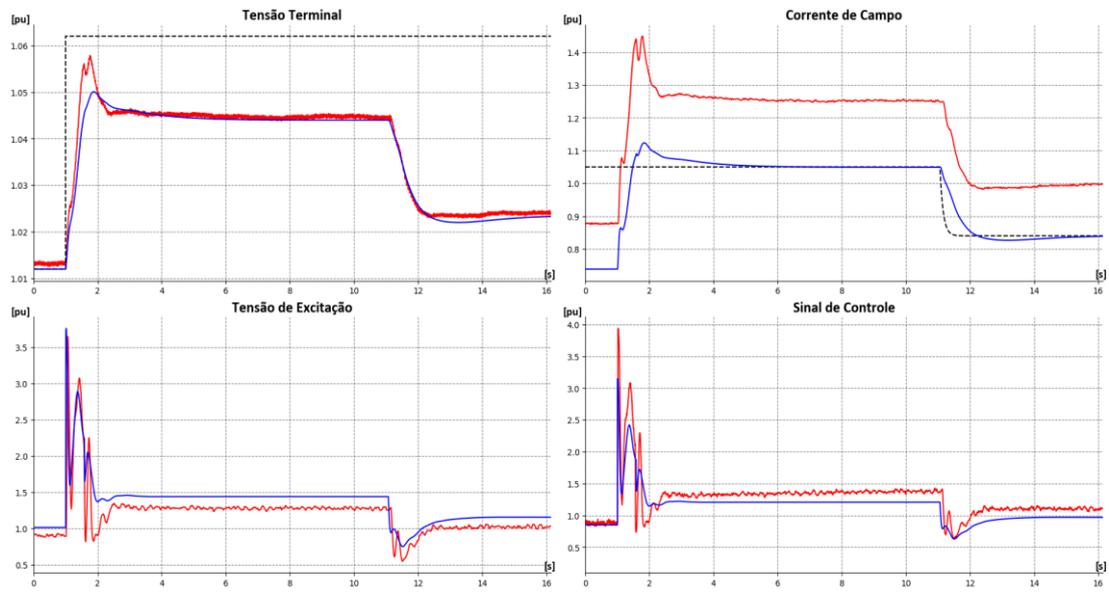
Fonte: Autor (2024)

As Figuras 28 a 39 apresentam a visão geral das curvas dos ensaios de índice 8 até 13

3.2.6.1. Limitador V/Hz – Ensaio 8

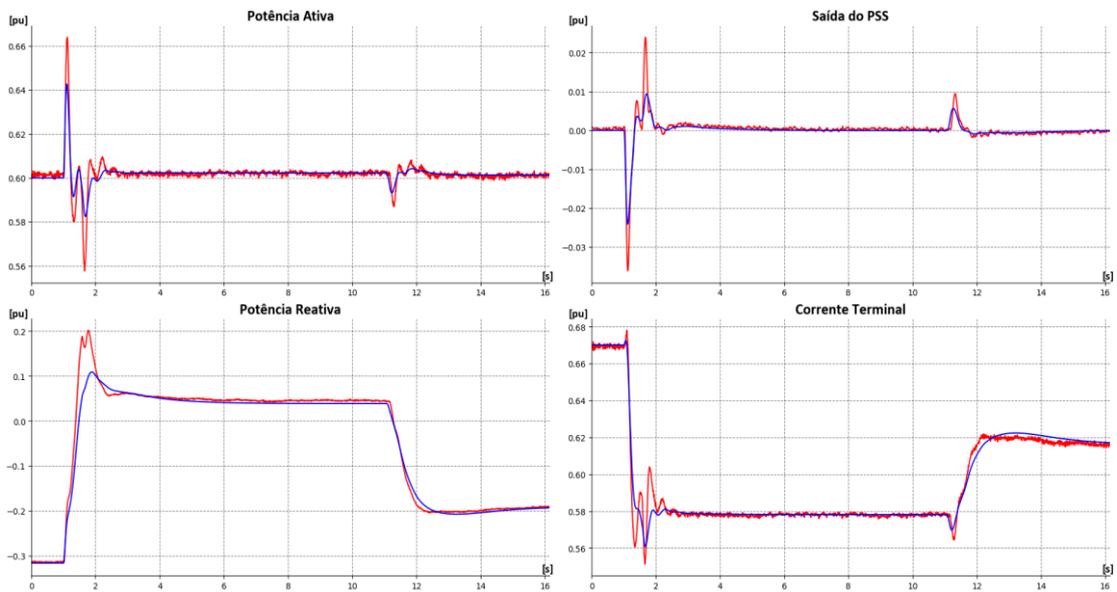
O limitador *Volts Hertz* (V/Hz), ou de sobrefluxo, atua na região de sobreexcitação, limitando a tensão terminal.

Figura 28 – Resultados para o Ensaio 8 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

Figura 29 – Resultados para o Ensaio 8 - Parte 2.

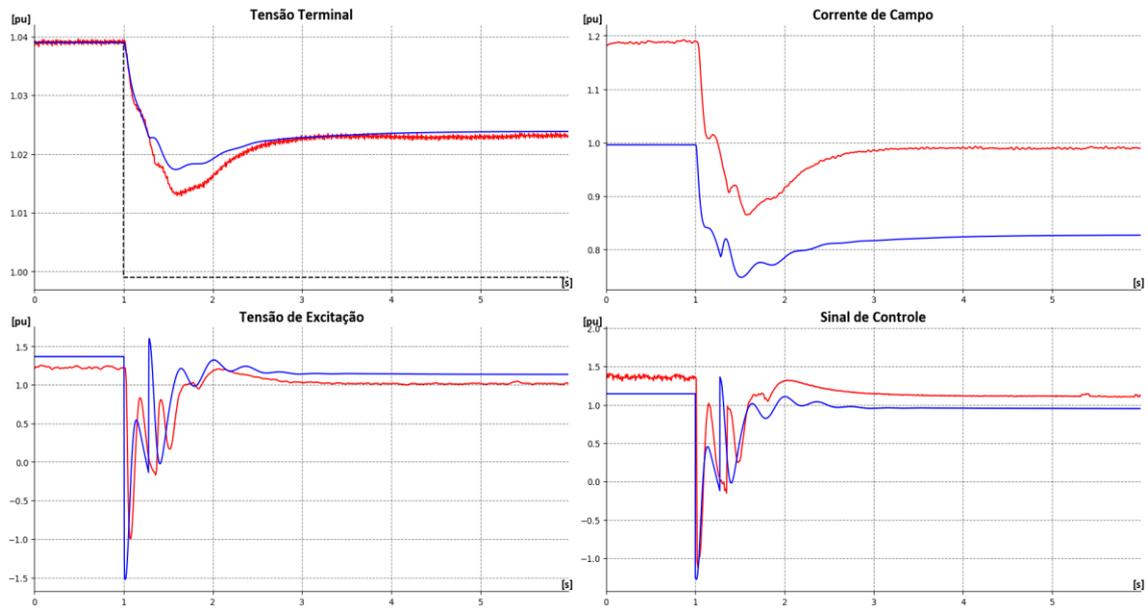


Fonte: Autor (2024)

3.2.6.2. Limitador UEL – Ensaio 9

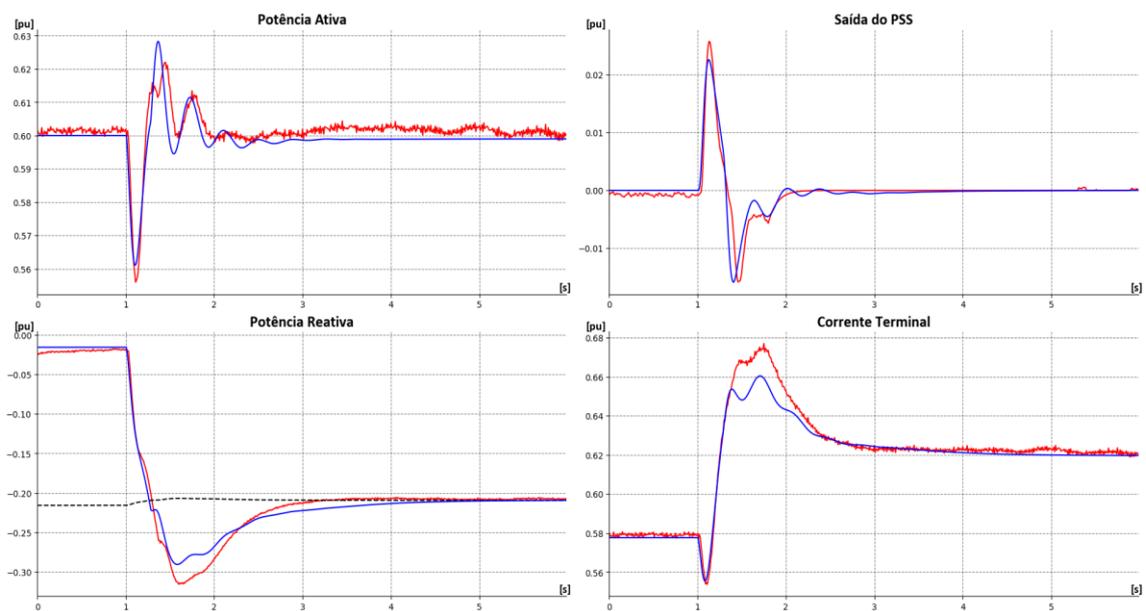
O limitador *Under Excitation Limiter* (UEL) atua na região de subexcitação limitando a absorção de potência reativa.

Figura 30 – Resultados para o Ensaio 9 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

Figura 31 – Resultados para o Ensaio 9 - Parte 2.

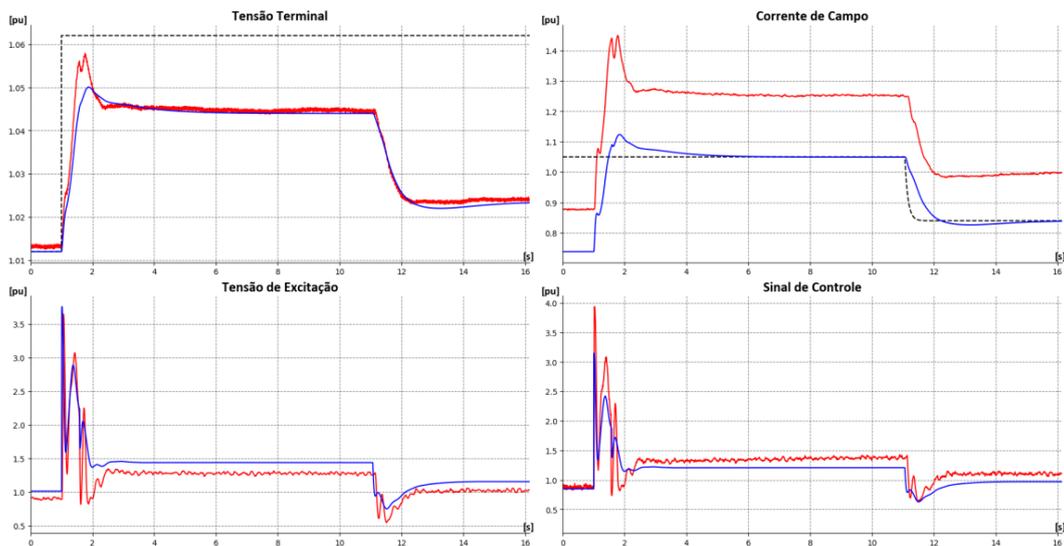


Fonte: Autor (2024)

3.2.6.3. Limitador OEL – Ensaio 10

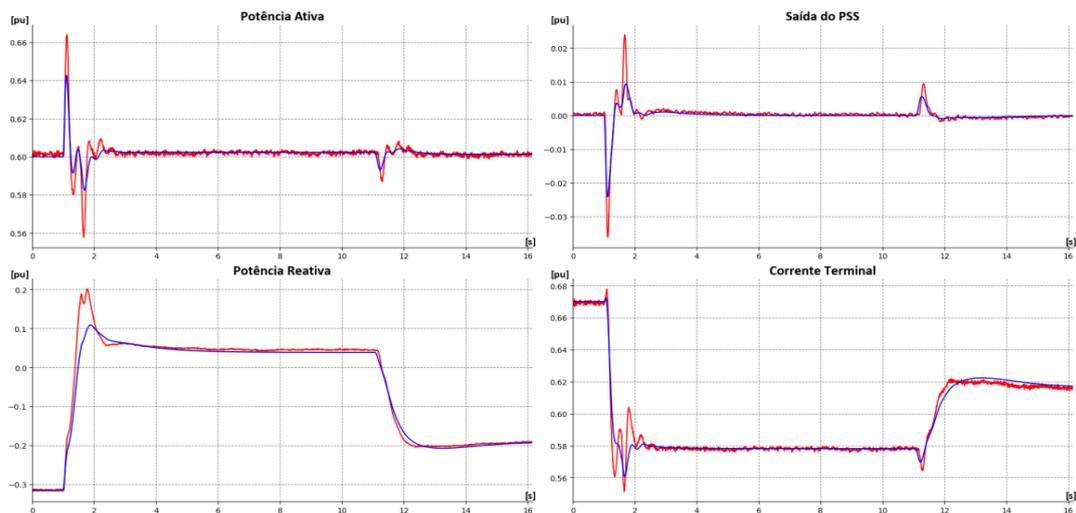
O limitador *Over Excitation Limiter* (OEL) atua na região de sobreexcitação limitando a corrente de campo em duas etapas: a primeira tem ação instantânea, definida com base na magnitude da corrente, e a segunda temporizada, dada pelo limite térmico. O ajuste dos limites do OEL é realizado para melhorar a aderência da tensão terminal simulada do modelo em função dos ajustes feitos nos ensaios de campo.

Figura 32 – Resultados para o Ensaio 10 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

Figura 33 – Resultados para o Ensaio 10 - Parte 2.

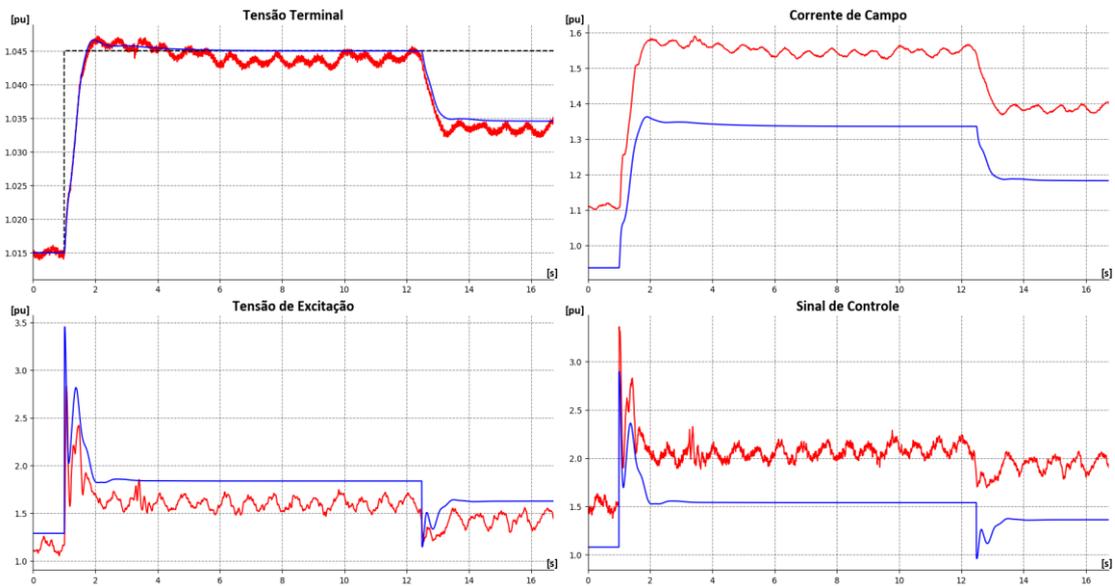


Fonte: Autor (2024)

3.2.6.4. Limitador SCL Sobreexcitado – Ensaio 11

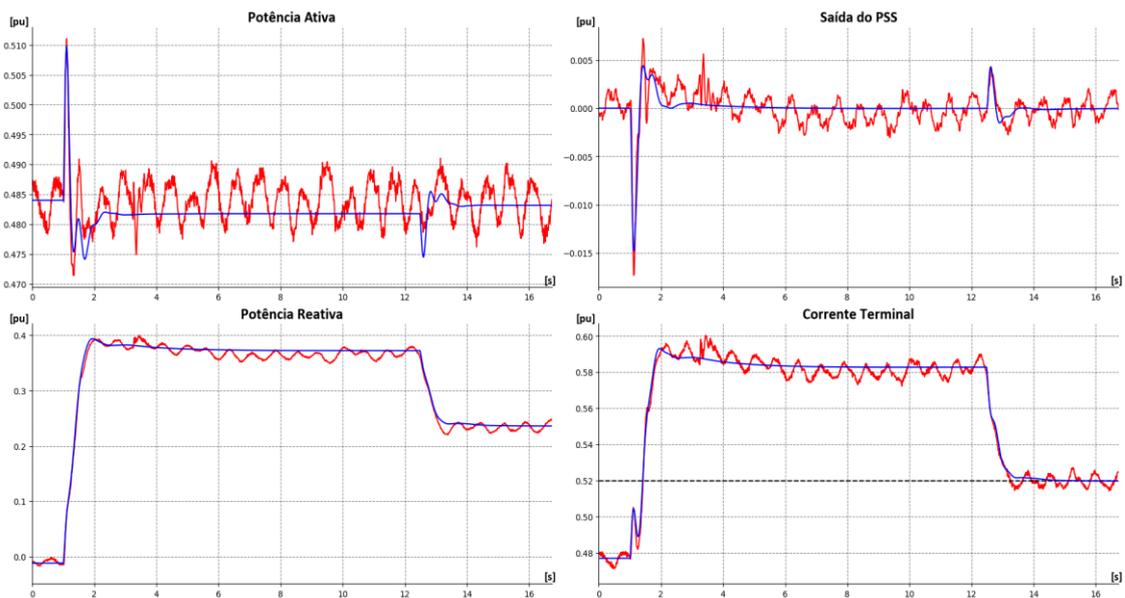
O limitador *Stator Current Limiter – Overexcitation* (SCL – Sobreexcitado) atua na região de sobreexcitação limitando a corrente estatórica, de forma temporizada (limite térmico), quando a UG opera na região de sobreexcitação.

Figura 34 – Resultados para o Ensaio 11 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

Figura 35 – Resultados para o Ensaio 11 - Parte 2.

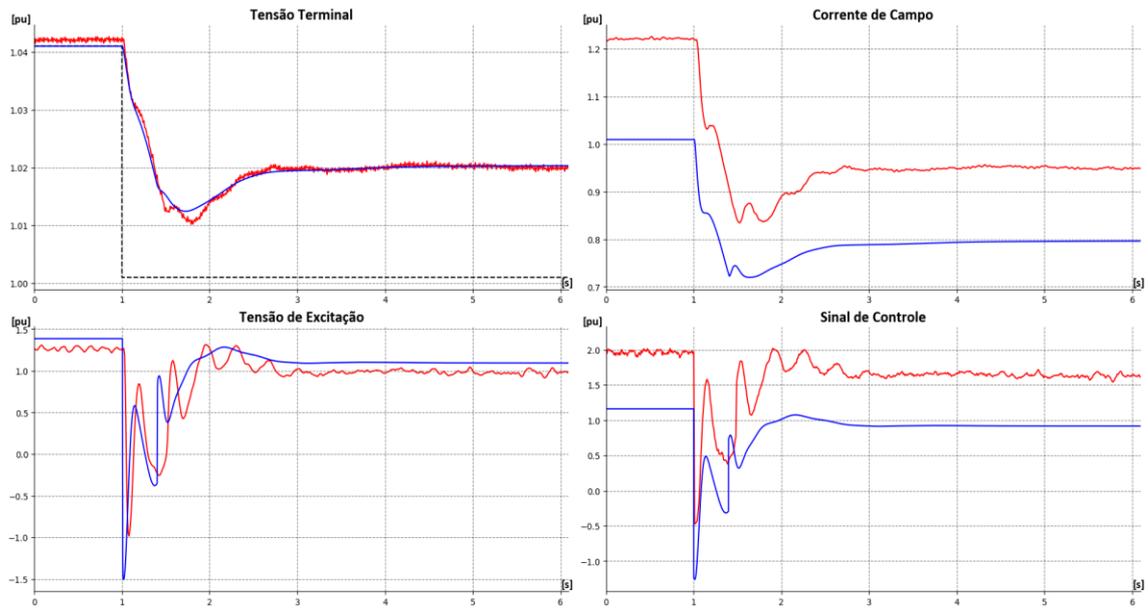


Fonte: Autor (2024)

3.2.6.5. Limitador SCL Subexcitado – Ensaio 12

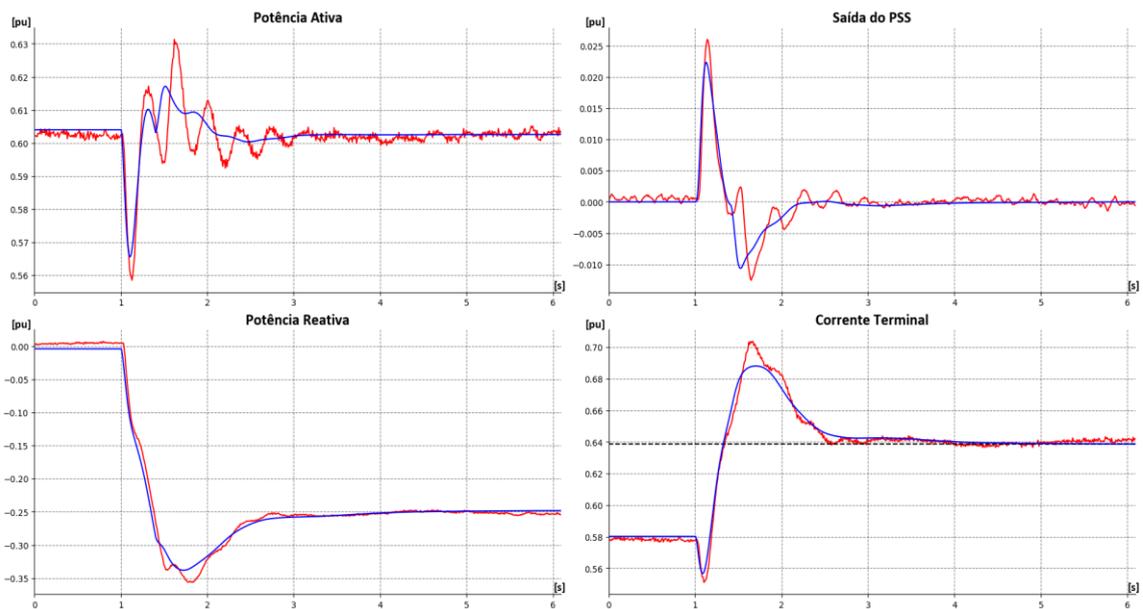
O limitador *Stator Current Limiter – Subexcitation* (SCL – Subexcitado) atua na região de subexcitação limitando a corrente estatórica, de forma instantânea, quando a UG opera na região de subexcitação.

Figura 36 – Resultados para o Ensaio 12 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

Figura 37 – Resultados para o Ensaio 12 - Parte 2.

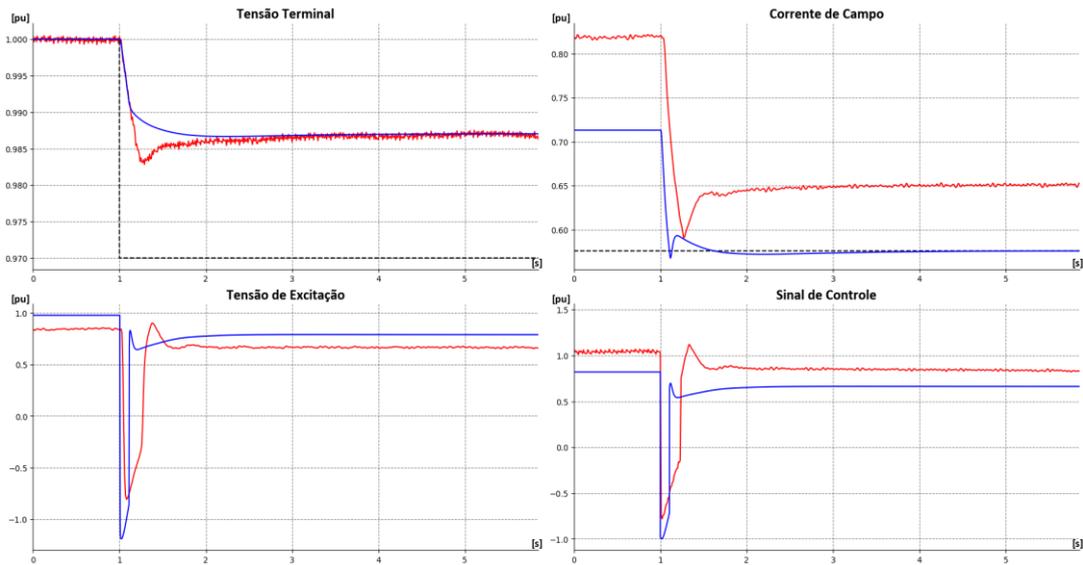


Fonte: Autor (2024)

3.2.6.6. Limitador MEL – Ensaio 13

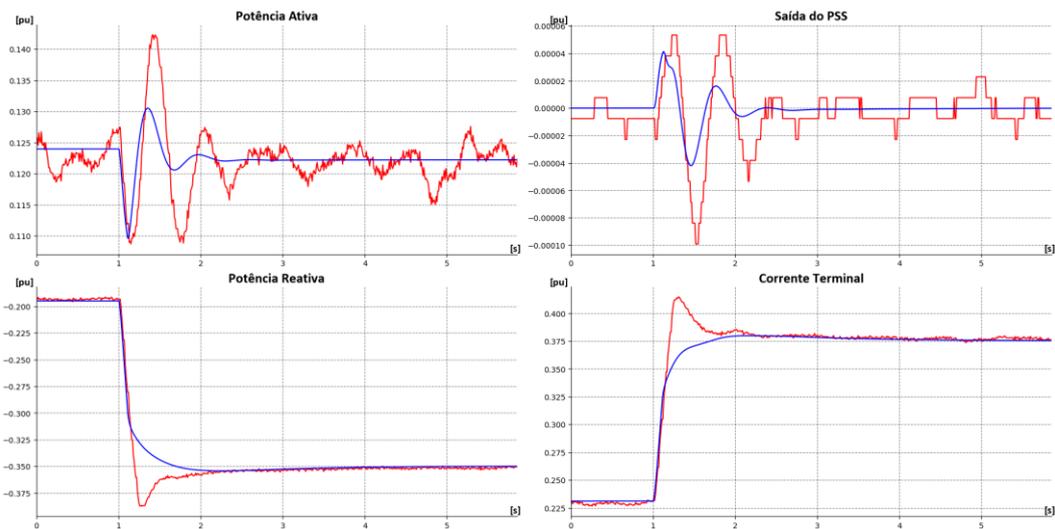
O limitador *Minimum Excitation Limiter* (MEL) atua na região de subexcitação, limitando a mínima corrente de campo.

Figura 38 – Resultados para o Ensaio 13 - Parte 1.



Fonte: Autor (2024)

Figura 39 – Resultados para o Ensaio 13 - Parte 2.



Fonte: Autor (2024)

No próximo capítulo, serão aplicadas métricas de discrepância para a avaliação dos resultados do processo de validação, apresentados anteriormente.

4. UTILIZAÇÃO DAS MÉTRICAS NA AVALIAÇÃO

A proposta deste trabalho é estudar o uso de métricas como recurso para avaliação dos resultados do processo de validação de modelos de simulação da dinâmica do sistema elétrico. Destaca-se que a escolha das métricas a serem utilizadas é uma parte vital do processo avaliativo, exercendo grande influência no foco da avaliação. Tal decisão direciona a análise para aspectos específicos das curvas correspondentes aos ensaios e às simulações.

Os desdobramentos referentes ao uso de métricas na avaliação dos resultados da validação, assim como os aspectos importantes a serem considerados no uso deste recurso, são apresentados e discutidos no Capítulo 5. Portanto, o foco da presente seção é apresentar e justificar a escolha das métricas que serão utilizadas na avaliação dos resultados da validação do sistema de excitação apresentada no Capítulo 3.

Destaca-se, ainda, que este trabalho não é dedicado à análise comparativa entre diferentes tipos de métricas de discrepância, mas sobretudo à análise dos aspectos envolvidos no uso geral deste recurso no processo avaliativo de resultados de validação. No entanto, dado que o processo de escolha das métricas é uma etapa fundamental, foram selecionadas métricas já empregadas para a mesma finalidade previamente, e que são utilizadas por operadores de sistemas.

Conforme comentado anteriormente, atualmente o ONS não estabelece métricas para avaliação quantitativa do processo de validação de modelos de sistemas de excitação de usinas convencionais (hidrelétricas e termelétricas).

4.1. CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DAS MÉTRICAS

Para a escolha das métricas foram adotados como referência os critérios de avaliação que constam no item 5.9.3 “Ensaio da validação dinâmica – Critérios de avaliação dos resultados”, da referência técnica ONS (2024b). Os aspectos considerados na avaliação pelo ONS, que servem como base para a escolha das métricas, são descritos a seguir:

- Condições de regime dos ensaios (final, inicial e patamares intermediários);
- Bases das grandezas simuladas estão coerentes com a base dos registros de campo;
- Reprodução das respostas dinâmicas das grandezas de tensão terminal, potência reativa, sinal de controle, tensão e corrente de excitação;
- Reprodução das oscilações eletromecânicas: amortecimento e frequência de oscilação da potência ativa;
- Chaveamentos na atuação e saída dos limitadores.

4.2. SELEÇÃO DAS MÉTRICAS

Tendo em vista os critérios para a seleção das métricas descritos na seção anterior, a escolha destas será feita entre métricas que já são utilizadas por operadores, mais especificamente, para a subsequente avaliação da validação. Em particular, são selecionadas métricas entre as utilizadas pelo operador XM (Colômbia) em suas avaliações de modelos de sistema de excitação e regulação de velocidade. As citadas aplicações são descritas em detalhes no Anexo 3 do documento *Acuerdo 1825* (CNO, 2024).

4.2.1. CNO 1825 – Anexo 3

O *Acuerdo 1825* do CNO estabelece os requisitos para obtenção e validação dos parâmetros do gerador, dos modelos do sistema de excitação, controle de velocidade e de estabilizadores de sistemas de potência das unidades de geração síncrona do Sistema Interconectado Nacional (SIN) da Colômbia. O documento define diretrizes para os ensaios e reajustes dos controles de geração.

Adicionalmente, em seu Anexo 3 “*Índices de evaluación para verificar la validez de los modelos*”, são apresentadas definições sobre o processo de validação e orientações específicas relativas à forma geral da curva, tais como o tempo de estabelecimento, tempo de resposta inicial, tempo de retardo, bandas mortas e valores de regime. Após essa introdução, são estabelecidos os chamados *índices de evaluación*, que são as métricas utilizadas na avaliação dos resultados de validação de modelos de sistemas de excitação e regulação de velocidade (CNO, 2024).

No Anexo 3 são descritas as métricas e sua fundamentação, bem como a formulação matemática com definição das variáveis envolvidas no equacionamento. São apresentadas

tabelas para cada tipo de modelo, informando, por tipo de ensaio, quais métricas são empregadas, em quais variáveis são aplicadas e o correspondente limiar para aprovação do resultado do ensaio. Reforça-se que para o modelo ser aprovado na etapa de validação, todos os valores de métricas devem cumprir os limiares de referência estabelecidos nas tabelas CNO (2024). O anexo conta com 5 tabelas, são elas:

- A3.1 Índices de coerência (métricas) para o modelo do regulador de tensão e esquema de controle conjunto;
- A3.2 Índices de coerência para o modelo do PSS;
- A3.3 Índices de coerência para os modelos de limitadores do sistema de excitação (CV, OEL, UEL, V/Hz, LPQ, MEL, SCL, RCC, CCC);
- A3.4 Índices de coerência para o modelo do regulador de velocidade / potencia;
- A3.5 Índices de coerência para o controle da qualidade dos modelos.

Para um melhor entendimento do conteúdo das tabelas, na Figura 40 ilustra-se a tabela A3.3 do *Acuerdo* 1825.

Figura 40 – Tabela de métricas para limitadores (A3.3).

Tabla A3. 3 Índices de coherencia para los modelos de los limitadores del sistema de excitación (CV, OEL, UEL, V/Hz, LPQ, MEL, SCL, RCC, CCC)

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
3. Escalón de gran señal en la tensión de referencia del AVR para provocar la actuación del limitador.	V_T	EVF	5%
		CCL	≥ 0.93
		EAMN	$\leq 10\%$
	Q	EVF	10%
		CCL	≥ 0.93
		EAMN	$\leq 10\%$
$U_{LM} 4$	CCL	≥ 0.93	

Fonte: CNO (2024)

A Figura 40 mostrada acima traz os índices (métricas) aplicados em cada sinal e seu respectivo valor de referência (limiar), para os ensaios que avaliam a atuação dos limitadores através da aplicação de um degrau na referência de tensão do regulador automático de tensão.

4.2.2. Métricas selecionadas

Todas as métricas escolhidas para avaliação neste trabalho constam no *Acuerdo* 1825 Anexo 3 CNO (2024). No entanto, nem todas as métricas do Anexo 3 são analisadas, por serem aplicadas apenas em ensaios específicos do *Acuerdo* 1825 para os quais não se dispõe de registros.

A seguir, cada métrica selecionada será descrita. Adicionalmente, são apresentadas tabelas, elaboradas no âmbito deste TCC e inspiradas nas tabelas do Anexo 3, que relacionam as métricas aos ensaios e às grandezas e indicam os correspondentes limiares. Destaca-se que, dos ensaios apresentados na validação, apenas o ensaio de atuação do limitador V/Hz com a UG em vazio não será contemplado, conforme a justificativa previamente fornecida.

4.2.2.1. *Error absoluto del sobreimpulso (ES)*

É a diferença absoluta entre os sobressinais em porcentagem:

$$ES = |SIR - SIS|$$

$$SI = \frac{V_{max} - V_f}{V_f - V_i} \times 100$$

onde:

SIR: Sobressinal da curva do registro tomado em ensaio de campo;

SIS: Sobressinal da curva simulada tomada do modelo;

Vmax: Valor máximo da curva;

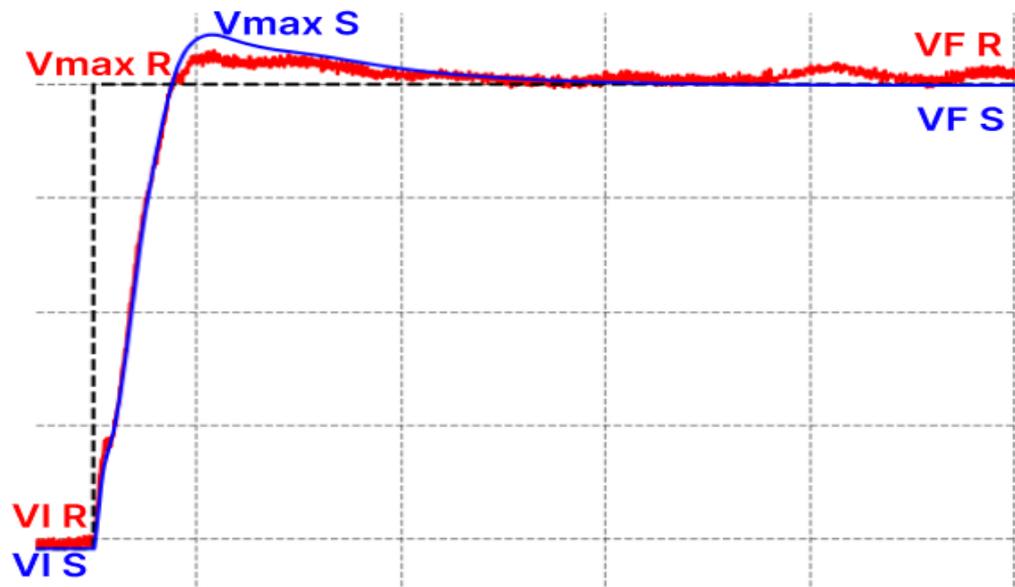
Vf: Valor final da curva;

Vi: Valor inicial da curva.

Essa métrica traz em sua formulação a diferença absoluta dos sobressinais da curva do registro de campo e simulada, em porcentagem. É uma métrica importante para monitorar uma característica vital de comportamentos transitórios, que é o sobressinal

Na Figura 41 a seguir é ilustrado um exemplo gráfico, com indicação das variáveis usadas para o cálculo do valor de ES.

Figura 41 – Ilustração gráfica da obtenção de ES.



Fonte: Autor (2024)

4.2.2.2. *Error relativo en el tiempo de retardo (ETR)*

É a diferença absoluta relativa entre os tempos de retardo em porcentagem:

$$ETR = \left| \frac{TRR - TRS}{TRR} \right| \times 100$$

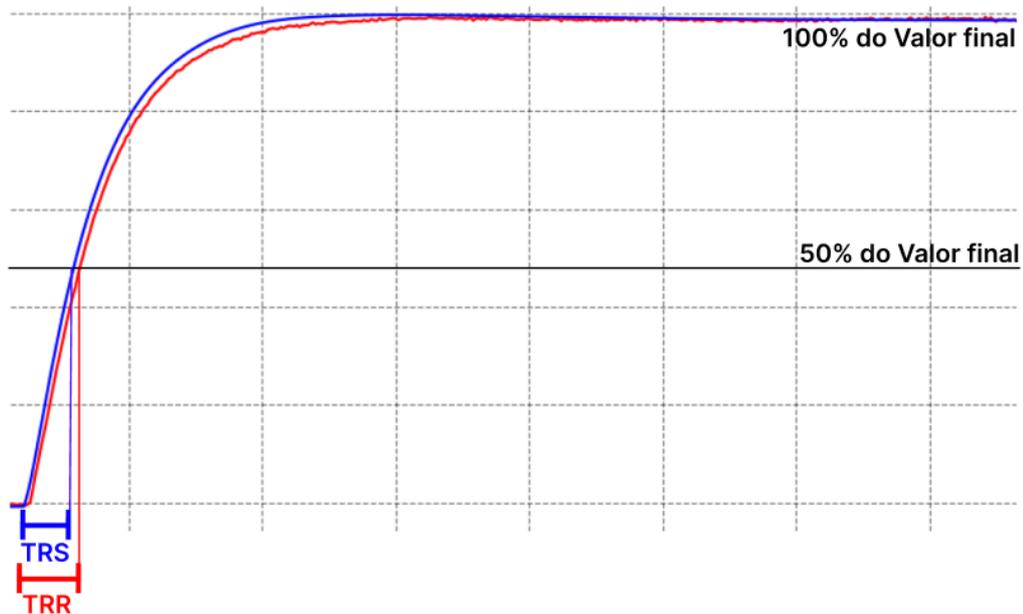
onde:

TRR: Tempo de retardo da curva do registro tomado em ensaio de campo;

TRS: Tempo de retardo da curva simulada tomada do modelo.

Essa métrica traz em sua formulação a diferença absoluta relativa entre os tempos de retardo do registro de campo e da simulação em porcentagem. O tempo de retardo é definido como o tempo necessário para a curva alcançar 50% do seu valor final. Assim, esta é uma métrica importante para monitorar o comportamento de subida das curvas no regime transitório e a aderência das curvas simuladas ante as curvas de campo. Conjuntamente às demais métricas, fornece informações valiosas para garantir que o tempo e a forma da subida das curvas estão sendo bem modelados, o que é crucial para a garantia da estabilidade e bom desempenho dinâmico. Na Figura 42 é ilustrado um exemplo gráfico da obtenção de valores para cálculo da métrica ETR.

Figura 42 – Ilustração gráfica da obtenção de ETR.



Fonte: Autor (2024)

4.2.2.3. *Error relativo en el tiempo de establecimiento (ETE)*

É a diferença absoluta relativa entre os tempos de estabelecimento em porcentagem:

$$ETE = \left| \frac{TER - TES}{TER} \right| \times 100$$

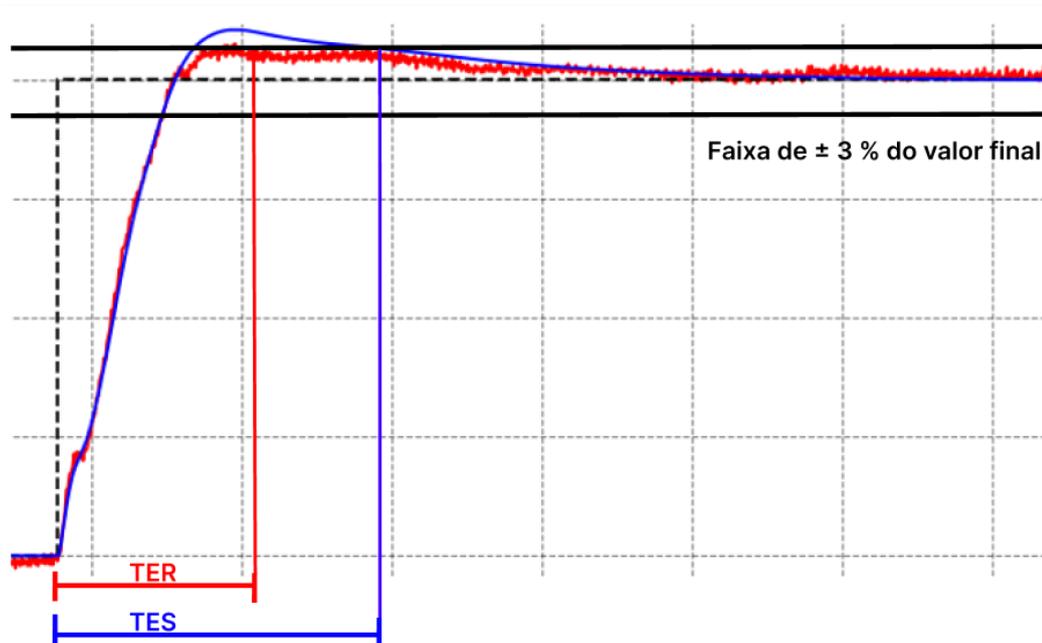
onde:

TER: Tempo de estabelecimento da curva do registro tomado em ensaio de campo;

TES: Tempo de estabelecimento da curva simulada tomada do modelo.

Essa métrica quantifica a diferença absoluta relativa entre os tempos de estabelecimento dos registros de campo e da simulação, em porcentagem. O tempo de estabelecimento é definido como o tempo necessário para a curva entrar e permanecer em uma faixa de $\pm 3\%$ do valor final em relação à aplicação do degrau. Portanto, é uma métrica essencial para avaliar o comportamento das curvas em regime transitório através da análise do tempo de estabilização (tempo de resposta), analisando então, se o modelo representa bem o tempo de resposta do sistema de excitação em campo. Na Figura 43 é ilustrado um exemplo gráfico da obtenção de valores para cálculo da métrica ETE.

Figura 43 – Ilustração gráfica da obtenção de ETE.



Fonte: Autor (2024)

Observa-se que há uma faixa de estabelecimento para os valores simulados e outra para os valores de registro de campo. No entanto, como os valores finais estão muito próximos, a figura acima simplifica a visualização, apresentando apenas uma faixa para os dois sinais.

4.2.2.4. *Error relativo en el tiempo de respuesta inicial (ETRI)*

É a diferença absoluta relativa entre os tempos de resposta iniciais, em porcentagem:

$$ETRI = \left| \frac{TRIR - TRIS}{TRIR} \right| \times 100$$

onde:

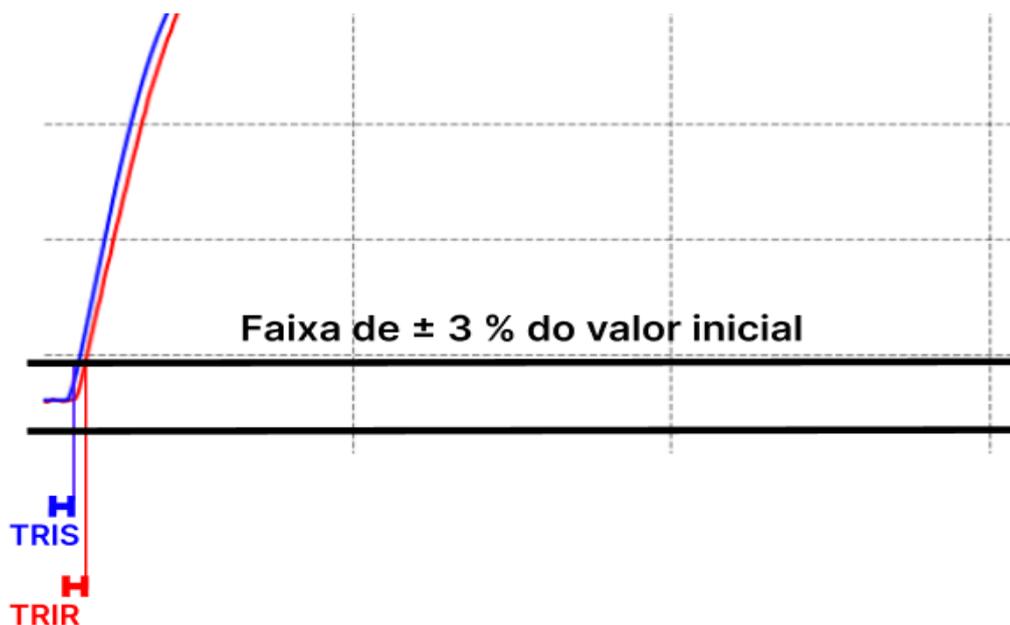
TRIR: Tempo de resposta inicial da curva do registro tomado em ensaio de campo;

TRIS: Tempo de resposta inicial da curva simulada tomada do modelo.

Essa métrica quantifica a diferença absoluta relativa entre os tempos de resposta iniciais do registro de campo e da simulação. O tempo de resposta inicial é definido como o tempo necessário para a curva sair da faixa de $\pm 3\%$ do valor inicial em relação à aplicação do degrau. Em vista disso, o ETRI é uma métrica essencial para a análise da capacidade do modelo em representar a velocidade com a qual o sistema de excitação em campo responde a perturbações. Esta métrica, possui uma grande sensibilidade a diferenças temporais no início do degrau.

Destaca-se que a métrica ETRI, apesar de ser apresentada no Anexo 3 do *Acuerdo* 1825 CNO (2024), não consta nas tabelas do anexo e não é utilizada como métrica decisiva para aprovação ou não do modelo. No entanto, o ETRI será utilizado na avaliação experimental do presente trabalho. Na Figura 44 é ilustrado um exemplo gráfico da obtenção de valores para quantificação da métrica ETRI.

Figura 44 – Ilustração gráfica da obtenção de ETRI.



Fonte: Autor (2024)

Nota-se que há uma faixa de valor inicial para os valores simulados e outra para os valores de registro de campo. No entanto, como os valores iniciais estão muito próximos, a figura acima simplifica a visualização, apresentando apenas uma faixa para os dois sinais.

4.2.2.5. *Error relativo del valor final (EVF)*

É a diferença absoluta entre os valores finais no registro e na simulação, relativo à diferença entre o valor final e inicial do registro, em porcentagem:

$$EVF = \left| \frac{VFR - VFS}{VFR - VIR} \right| \times 100$$

onde:

VFR: Valor final da curva do registro tomado em ensaio de campo;

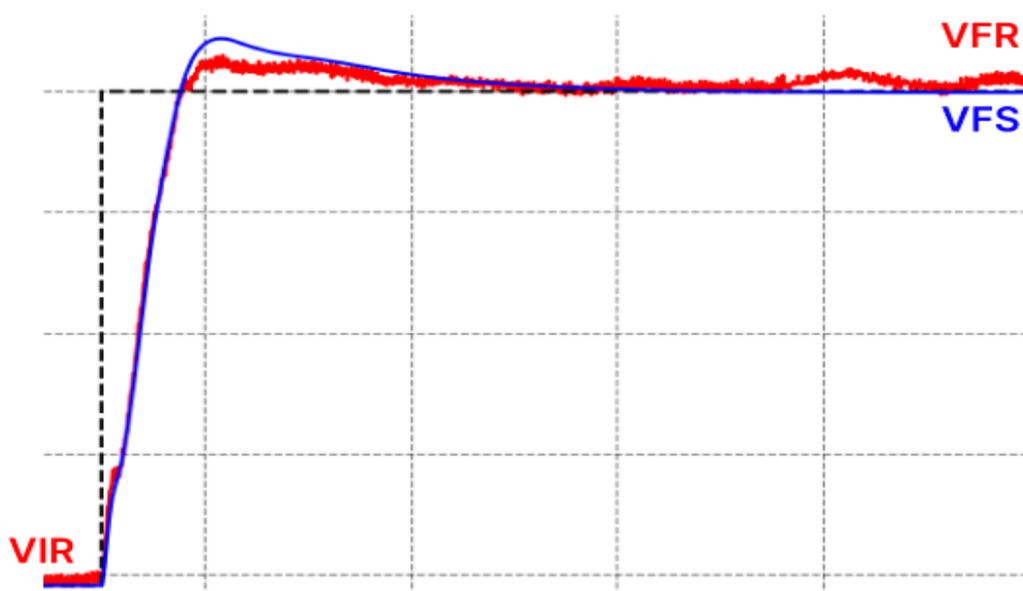
VIR: Valor inicial da curva do registro tomado em ensaio de campo;

VFS: Valor final da curva simulada tomada do modelo.

O EVF quantifica a diferença absoluta entre os valores finais da curva de campo e simulada relativas à diferença entre o valor final e inicial da curva de campo. Diante disso, a métrica fornece informações sobre a capacidade do modelo reproduzir com precisão o valor final da variável em questão, dando enfoque para o desempenho em regime permanente pós-perturbação.

O EVF está relacionado com o critério de verificação das condições de regime dos ensaios. Abrange, também, o critério de verificação das bases das grandezas de campo e simuladas, ambos referentes ao item 5.9.3 da referência técnica (ONS, 2024b). Na Figura 45 é ilustrado um exemplo gráfico da obtenção de valores para quantificação da métrica EVF.

Figura 45 – Ilustração gráfica da obtenção de EVF



Fonte: Autor (2024)

4.2.2.6. *Coefficiente de correlación lineal (CCL):*

Este erro é uma medida da relação linear entre o registro de campo e o sinal simulado.

$$CCL = \frac{\sum_{i=1}^n (Ri - R)(Si - S)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Ri - R)^2 \sum_{i=1}^n (Si - S)^2}}$$

onde:

Ri: É o i-ésimo valor do sinal proveniente do registro tomado em ensaio de campo;

Si: É o i-ésimo valor do sinal simulado proveniente da simulação tomado do modelo;

R: É o valor médio do sinal proveniente do registro tomado em ensaio de campo;

S: É o valor médio do sinal simulado proveniente da simulação tomado do modelo;

n: É o número de amostras dos sinais.

O CCL é uma métrica capaz de fornecer uma visão global da similaridade entre as curvas, abrangendo a correlação entre as variações dos sinais ao longo do tempo. Logo, no caso das curvas de campo e simuladas apresentarem uma relação linear forte, o CCL será próximo de 1, indicando uma correlação positiva.

Nesta perspectiva, o CCL, pela sua característica abrangente, engloba os critérios avaliativos de reprodução de respostas dinâmicas, de chaveamentos na atuação e saída de limitadores, e também na reprodução das oscilações eletromecânicas, avaliando os comportamentos de amortecimento e frequência da potência ativa em ensaios para a validação do PSS.

4.2.2.7. *Error absoluto medio normalizado (EAMN):*

É uma medida da média do valor absoluto das diferenças calculadas amostra a amostra, onde o valor correspondente a cada amostra deve ser normalizado pelo menor valor entre o aporte do registro e do sinal simulado. Define-se o aporte do registro como a máxima diferença entre o registro e o valor inicial, e o aporte do sinal simulado como a máxima diferença entre o sinal simulado e o valor inicial. O erro é reportado em porcentagem.

$$EAMN = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(Ri - Si)|.$$

onde:

Ri: É o i-ésimo valor do sinal proveniente do registro tomado em ensaio de campo, normalizado pelo menor valor entre o aporte do sinal de campo e o simulado;

Si: É o i-ésimo valor do sinal simulado proveniente da simulação tomado do modelo, normalizado pelo menor valor entre o aporte do sinal de campo e o simulado;

n: É o número de amostras dos sinais.

Na formulação do EAMN, o uso da média das diferenças normalizadas torna a métrica mais robusta a picos ou ruídos isolados nas curvas. A normalização pelo aporte mais baixo torna a métrica mais justa, ao comparar curvas que podem ter amplitudes diferentes. Dessa forma, evita-se que curvas com grandes variações dominem a análise do erro absoluto. Por fim, o EAMN é eficaz para capturar e quantificar erros que ocorrem em toda a extensão do sinal, considerando cada ponto de amostra.

Esta característica é especialmente útil em cenários onde o comportamento dinâmico completo das curvas é importante, como é o caso da avaliação feita pelo ONS. A métrica leva em conta aspectos relativos a condições de regime dos ensaios, às bases das grandezas de campo e simuladas, à reprodução das respostas dinâmicas, a chaveamentos na atuação e saída de limitadores, e também à reprodução das oscilações eletromecânicas, sendo todos estes critérios pertencentes ao item 5.9.3 da referência técnica (ONS, 2024b).

4.2.3. Tabelas de utilização de métricas por ensaios

As tabelas abaixo contêm informações das métricas utilizadas na avaliação dos resultados de validação deste trabalho. Cada tabela contempla um conjunto de ensaios, informando quais métricas são usadas, quais os respectivos valores de referência, e em quais variáveis são aplicadas. As tabelas apresentadas constam do Anexo 3 do Acuerdo 1825 (CNO, 2024), e foram apresentadas mantendo a configuração original de métricas, variáveis, ensaios, e valores de referência. Foram realizadas algumas adaptações para a avaliação experimental no presente trabalho, como a inclusão da métrica ETRI, adotando a mesma configuração da métrica ETR, e a retirada da métrica *error combinado* (EC).

Nota-se que, os ensaios com exceção daqueles relativos à atuação de limitadores, consideram a aplicação e a retirada do degrau. Neste sentido, ambas as mudanças de referência são avaliadas por métricas. A Tabela 15 é relativa aos ensaios com a UG em vazio e em carga,

sem PSS. Conforme comentado anteriormente, os resultados do ensaio 3 (relativo à atuação do limitador V/Hz) não serão objeto de quantificação por métricas.

Tabela 15 – Métricas aplicadas nos ensaios 1, 2, 4, e 5.

Variável analisada	Métrica	Valor de referência
Tensão terminal (VT)	ES	<10%
	EVF	<5%
	ETR	<20%
	ETRI	<20%
	ETE	<25%
	CCL	≥ 0.93
	EAMN	$\leq 10\%$
Tensão de campo (EFD) ou Corrente de campo (IFD)	CCL	≥ 0.93
	EAMN	$\leq 10\%$
Potência Reativa (Q) *	ES	<15%
	EVF	<10%
	ETR	<20%
	ETRI	<20%
	CCL	≥ 0.93
	EAMN	$\leq 10\%$

Fonte: Autor (2024)

*As métricas relativas a potência reativa não são aplicadas nos ensaios a vazio.

A Tabela 16 é relativa aos ensaios com a UG em carga, com PSS.

Tabela 16 – Métricas aplicadas nos ensaios 6 e 7.

Variável analisada	Métrica	Valor de referência
Tensão terminal (VT)	ES	<10%
	EVF	<5%
	ETR	<20%
	ETRI	<20%
	ETE	<25%
	CCL	≥ 0.93
	EAMN	$\leq 10\%$
Potência Reativa (Q)	ES	<15%
	EVF	<10%
	CCL	≥ 0.93
	EAMN	$\leq 10\%$
Potência ativa (P)	CCL	≥ 0.93
	EAMN	$\leq 15\%$

Fonte: Autor (2024)

A Tabela 17 é relativa aos ensaios de atuação de limitadores, com a UG em carga.

Tabela 17 – Métricas aplicadas nos ensaios de 8 a 13

Variável analisada	Métrica	Valor de referência
Tensão terminal (VT)	EVF	<5%
	CCL	≥ 0.93
	EAMN	$\leq 10\%$
Potência reativa (Q)	EVF	<10%
	CCL	≥ 0.93
	EAMN	$\leq 10\%$

Fonte: Autor (2024)

5. USO DE MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO

A avaliação dos resultados do processo de validação de modelos de simulação realizado pelos operadores de sistemas, conforme sua metodologia de avaliação, é primordial para a constituição e o aprimoramento da base de dados de modelos utilizada nos estudos elétricos. Em face de sua relevância, a avaliação dos resultados da validação é um procedimento que deve ser, sempre que possível, transparente e auditável pelo agente interessado e demais agentes do setor.

Nessa perspectiva, o subitem 5.9.3, “Ensaio da validação dinâmica – Critérios de avaliação dos resultados”, da referência técnica ONS (2024b) apresenta os aspectos avaliados para aprovação do modelo de simulação. Os principais aspectos relacionados à condição de regime permanente avaliados são a coerência entre as bases usadas na simulação e nos ensaios de campo, e a coerência das condições de regime do ensaio, sendo elas iniciais, intermediárias e finais. As curvas simuladas de tensão terminal, potência ativa e potência reativa devem apresentar o mesmo valor que a média dos patamares em regime das curvas de campo, permitindo como erro máximo os valores de tolerância do fluxo de potência do ANAREDE.

Por outro lado, no regime transitório, os principais pontos avaliados são a reprodução dinâmica das grandezas tensão terminal, potência reativa, sinal de controle, tensão e corrente de excitação, a reprodução das oscilações eletromecânicas, com atenção ao amortecimento e frequência de oscilação da potência ativa, além do comportamento de chaveamentos na atuação dos limitadores.

Os critérios descritos anteriormente são fundamentais no processo de avaliação, pelo ONS, dos resultados da validação realizada pelo agente. Acrescenta-se que, atualmente, esses critérios não consideram o uso de métricas quantitativas de discrepâncias.

Sob outro ângulo, o CNO, no Anexo 3 do *Acuerdo 1825* (CNO, 2024), conforme descrito no Capítulo 4, considera a utilização de métricas de discrepância na avaliação. O Anexo 3 estabelece que o modelo passa com êxito na etapa de validação se os valores de todas as métricas de discrepância usadas na avaliação respeitarem os valores de referência estabelecidos. Caso contrário, o agente deverá fazer os reajustes necessários no modelo, caracterizando assim o respeito às métricas de precisão como um requisito obrigatório para a aprovação do modelo de simulação.

5.1. METODOLOGIA ADOTADA PARA APLICAÇÃO DAS MÉTRICAS

Nas próximas seções, os resultados dos ensaios apresentados no Capítulo 3 são avaliados com o uso das métricas estabelecidas pelo CNO. A avaliação é feita por meio da quantificação dos valores das métricas, realizada por um algoritmo computacional, desenvolvido no âmbito deste trabalho de conclusão de curso.

Antes da apresentação dos resultados da avaliação, será resumido o funcionamento do algoritmo computacional desenvolvido, visando o entendimento de como a quantificação das métricas é realizada. Após isso, as tabelas de resultados quantitativos das métricas são apresentadas. Em seguida, os resultados são organizados e comentados.

Destaca-se, ainda, que o objetivo principal deste trabalho, é o de estudar os efeitos e os aspectos pertinentes que o uso de métricas implica no processo avaliativo de modelos de componentes, focando em um estudo de caso. Portanto, não é escopo deste trabalho avaliar a qualidade do trâmite avaliativo estabelecido pelo CNO ou pelo ONS.

5.2. ALGORITMO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO

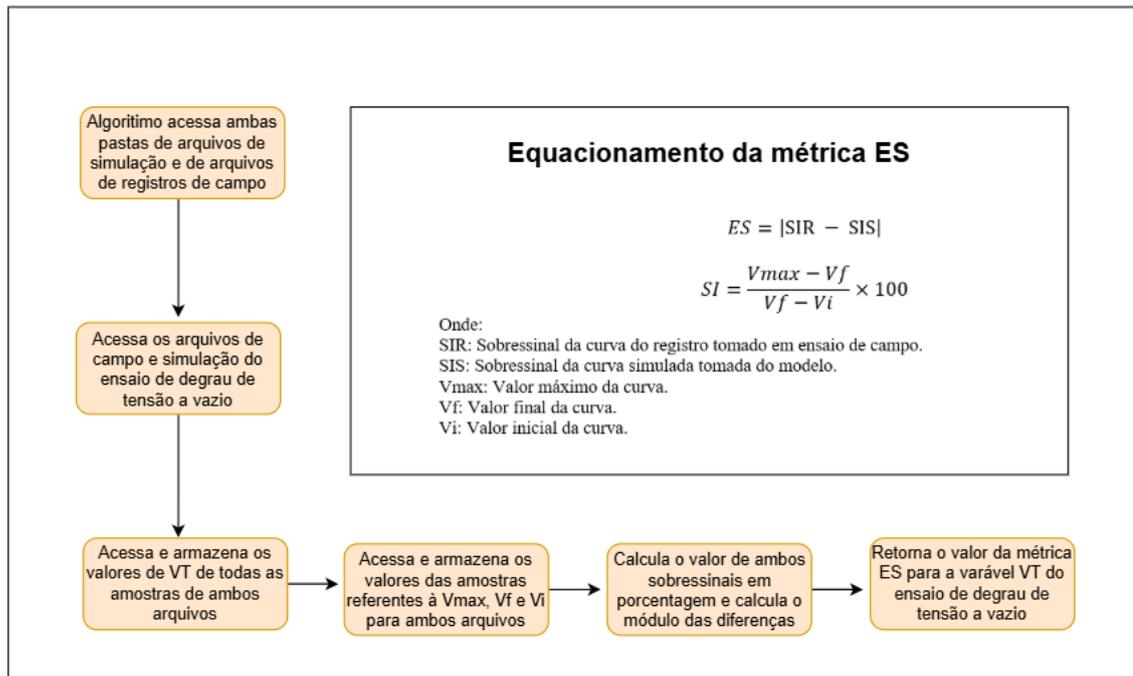
A fim de quantificar os valores das métricas selecionadas foi desenvolvido um algoritmo computacional em linguagem *Python*.

Primeiramente, organizou-se em dois repositórios virtuais distintos, os arquivos de entrada da validação, que são os registros dos ensaios adquiridos em campo e os arquivos de simulação provenientes do modelo do sistema de excitação. Cada arquivo é nomeado de acordo com o respectivo ensaio e contém os valores das variáveis elétricas de interesse para cada instante de tempo.

Destaca-se que os registros de campo foram obtidos à taxa de 100 Hz e as simulações foram realizadas com passo de integração de 1ms. Neste sentido, para viabilizar o cálculo das métricas CCL e EAMN, a resolução dos dados de simulação e dos registros foi compatibilizada para permitir a comparação amostra a amostra. Para a aplicação das métricas, nos ensaios com degraus de subida e descida, a janela de análise para a subida foi definida de 200 ms antes do início do degrau de subida até 200 ms antes do degrau de descida. Para a descida, a janela iniciou 200 ms antes do degrau de descida e se estendeu até o final do registro. Já nos ensaios dos limitadores, a janela abrangeu toda a duração do registro.

Para cada variável de interesse em determinado ensaio, são quantificadas as métricas pertinentes. Na Figura 46 são ilustradas as etapas do processo de cálculo de métricas, por meio de um exemplo de cálculo da métrica ES aplicada à variável de tensão terminal (VT).

Figura 46 – Ilustração das etapas para cálculo de métricas pelo algoritmo.



Fonte: Autor (2024)

5.3. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para avaliação dos resultados, foram considerados os limiares de referência estabelecidos no Anexo 3 do *Acuerdo 1825* (CNO, 2024). Para a métrica ETRI foi considerado o mesmo limiar indicado para o ETR, uma vez que o citado documento não apresenta um valor de referência para esta métrica.

Os valores das métricas que violaram os respectivos valores de referência foram destacados na cor vermelha. Para esta primeira análise, será adotado o padrão estabelecido pelo *Acuerdo 1825* onde um ensaio passa com êxito pela etapa de avaliação da validação se for aprovado em todas as métricas (CNO, 2024). Posteriormente, na seção 5.4 o uso deste padrão será discutido.

5.3.1. Resultados para os ensaios com UG a vazio e em carga, sem PSS

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados da aplicação das métricas aos dados correspondentes aos ensaios 1, 2, 4 e 5.

Tabela 18 – Avaliação dos ensaios com UG a vazio e em carga sem PSS

Ensaio (índice + nome)	Variável	Métrica						
		*ES <10%	*EVF <5%	ETR <20%	ETRI <20%	ETE <25%	CCL >=0.93	EAMN <=10%
1-Vazio. Degrau com variação +	VT	0,00	1,18	17,99	45,45	11,03	0,99	1,12
	EFD	-	-	-	-	-	0,73	17,79
1-Vazio. Degrau com variação -	VT	0,15	1,41	20,69	57,14	18,49	0,99	1,95
	EFD	-	-	-	-	-	0,71	18,92
2-Teto. Degrau com variação -	VT	0,30	0,27	14,67	35,48	11,53	0,99	0,59
	EFD	-	-	-	-	-	0,83	4,50
2-Teto. Degrau com variação +	VT	0,26	0,28	11,17	3,57	15,32	0,99	0,39
	EFD	-	-	-	-	-	0,91	6,78
4-Em carga sem PSS Pmax. Degrau com variação +	VT	1,12	0,15	6,82	21,21	45,37	0,99	1,11
	EFD	-	-	-	-	-	0,84	9,28
	Q	0,24	0,71	14,17	43,48	-	0,99	1,06
4-Em carga sem PSS Pmax. Degrau com variação -	VT	0,34	0,13	2,91	24,24	11,49	0,99	0,76
	EFD	-	-	-	-	-	0,85	4,93
	Q	0,05	0,31	9,39	47,82	-	0,99	0,73
5-Em carga sem PSS Pmin. Degrau com variação +	VT	0,35	2,02	2,51	14,29	22,30	0,99	1,46
	EFD	-	-	-	-	-	0,84	14,09
	Q	0,40	0,26	10,76	41,46	-	0,99	0,70
5-Em carga sem PSS Pmin. Degrau com variação -	VT	0,13	2,63	9,44	41,17	26,23	0,99	2,99
	EFD	-	-	-	-	-	0,92	7,65
	Q	0,31	0,21	1,58	8,00	-	0,99	0,94

Fonte: Autor (2024)

*Para avaliação da variável Q, as métricas ES e EVF possuem limiar 15% e 10% respectivamente.

5.3.2. Resultados para os ensaios com UG em carga, com PSS

Na Tabela 19 estão apresentados os resultados da aplicação das métricas aos dados correspondentes aos ensaios 6 e 7.

Tabela 19 – Avaliação dos ensaios em carga com PSS

Ensaio (índice + nome)	Variável	Métrica						
		*ES <10%	*EVF <5%	ETR <20%	ETRI <20%	ETE <25%	CCL >=0.93	*EAMN <10%
6-Em carga com PSS Pmax. Degrau com variação +	VT	4,39	0,97	3,37	12,50	63,37	0,99	1,74
	Q	5,71	1,37	-	-	-	0,99	1,65
	P	-	-	-	-	-	0,92	2,66
6-Em carga com PSS Pmax. Degrau com variação -	VT	1,66	2,34	3,15	21,88	28,90	0,99	3,21
	Q	3,03	2,00	-	-	-	0,99	3,14
	P	-	-	-	-	-	0,93	3,07
7-Em carga com PSS Pmin. Degrau com variação +	VT	1,37	0,54	1,52	9,09	17,96	0,99	1,10
	Q	0,26	0,42	-	-	-	0,99	0,69
	P	-	-	-	-	-	0,76	12,82
7-Em carga com PSS Pmin. Degrau com variação -	VT	1,54	0,45	2,96	27,27	54,61	0,99	0,82
	Q	0,48	0,89	-	-	-	0,99	0,91
	P	-	-	-	-	-	0,64	14,87

Fonte: Autor (2024)

*Para avaliação da variável Q, as métricas ES e EVF possuem limiar 15% e 10% respectivamente. E para a avaliação da variável P, a métrica EAMN possui o limiar de 15%.

5.3.3. Resultados para os ensaios de atuação de limitadores com UG em carga

Na Tabela 20 estão apresentados os resultados da aplicação das métricas aos dados correspondentes aos ensaios 8 a 13.

Tabela 20 – Avaliação dos ensaios de limitadores em carga.

Ensaio (índice + nome)	Variável	Métrica		
		EVF VT<5% Q<10%	CCL >=0.93	EAMN <=10%
8-Limitador V/Hz	VT	8,07	0,98	5,69
	Q	6,66	0,98	11,08
9-Limitador UEL	VT	6,75	0,99	4,48
	Q	0,34	0,99	2,12
10-Limitador OEL	VT	7,34	0,99	3,28
	Q	5,93	0,99	2,26
11-Limitador SCL Sobreexcitado	VT	9,66	0,99	4,37
	Q	6,21	0,99	3,14
12-Limitador SCL Subexcitado	VT	0,26	0,99	2,28
	Q	0,78	0,99	1,98
13-Limitador MEL	VT	1,51	0,99	2,38
	Q	0,01	0,99	1,38

Fonte: Autor (2024)

*Para avaliação da variável Q, a métrica EVF possui limiar de 10%

5.3.4. Análise dos resultados numéricos

Os valores obtidos destacam a eficácia das métricas em identificar discrepâncias entre as curvas de registros de campo e as simuladas, que também são perceptíveis visualmente. No ensaio com a UG em carga, com PSS e potência mínima, durante a variação negativa do degrau, por exemplo, a métrica CCL apontou uma baixa correlação linear (0,64) na análise da potência ativa, como pode ser visualmente verificado na Figura 27. Em contraste, para a tensão terminal

no mesmo ensaio e variação de degrau, a métrica CCL indicou uma forte correlação linear (0,99), conforme ilustrado na Figura 26.

Para análise dos resultados numéricos, considera-se que para aprovação é necessário que os valores de todas as métricas respeitem o valor de referência estabelecido. Diante disso, constata-se que somente dois ensaios foram aprovados (SCL subexcitado, e MEL).

Por outra perspectiva, ao focar na análise da quantidade de índices que respeitem a referência, sem distinguir por ensaios, conforme explicitado na Tabela 21, tem-se que 80% das métricas aplicadas resultaram em valores que respeitam os limites de referência estabelecidos. A fim de aprofundar a análise sobre quais métricas obtiveram mais valores aprovados e reprovados, organizou-se estas informações na Tabela 22.

Tabela 21 – Análise da taxa de aprovação dos índices.

Tabela avaliativa	Total de índices	Aprovados	Reprovados	Aprovação (%)
A vazio e sem PSS	96	73	23	76,0
Com PSS	52	44	8	84,6
Limitadores	36	31	5	86,1
Total	184	148	36	80,4

Fonte: Autor (2024)

Tabela 22 – Análise da taxa de aprovação dos índices por métrica.

Métrica	Total de índices	Aprovados	Reprovados	Aprovação (%)
ES	20	20	0	100
ETR	16	15	1	93,8
EAMN	44	40	4	90,9
EVF	32	28	4	87,5
CCL	44	33	11	75,0
ETE	12	7	5	58,3
ETRI	16	5	11	31,3

Fonte: Autor (2024)

Analisando os dados Tabela 22, destaca-se primeiramente que as métricas ES, EVF, ETR e EAMN obtiveram aproveitamentos acima de 85%, com destaque para a métrica ES, a qual obteve 100% de aprovação em suas aplicações.

A métrica de correlação CCL por sua vez, apresentou um desempenho inferior às métricas citadas acima, mas superior às métricas ETRI e ETE, que apresentaram um baixo percentual de aprovação dos índices se comparados às demais métricas.

A métrica ETRI e ETE tem em comum a característica de quantificar tempos relativos à permanência dos sinais em faixas relativamente estreitas ($\pm 3\%$), estando sujeitas a efeitos de ruídos ou pequenas perturbações.

Na próxima subseção, alguns aspectos que podem refletir em altos ou baixos aproveitamentos das métricas são examinados.

5.4. ASPECTOS PERTINENTES AO USO DE MÉTRICAS COMO RECURSO AVALIATIVO

Nesta seção são apresentados aspectos pertinentes ao uso de métricas como recurso no processo de avaliação de resultados da validação de modelos de componentes. Tais aspectos foram formulados a partir da análise dos resultados do estudo de caso deste trabalho envolvendo a validação do modelo do sistema de excitação e sua respectiva avaliação por meio do uso de métricas. As questões referem-se a fatores intrínsecos à utilização de métricas no processo avaliativo, os quais impactam diretamente na sua aplicabilidade. Considerar a influência desses aspectos é essencial para compreender a usabilidade, o potencial, a versatilidade e os cuidados necessários no uso de métricas, garantindo que sua implementação na rotina avaliativa seja proveitosa e resulte em efeitos positivos.

5.4.1. Comportamentos e características de interesse na avaliação

O primeiro aspecto pertinente ao uso de métricas no processo avaliativo refere-se aos comportamentos e características de interesse na avaliação, que estão diretamente relacionados ao objetivo de assegurar que o modelo reproduza adequadamente os comportamentos observados em campo. Este aspecto envolve a identificação e descrição dos comportamentos relevantes, bem como suas características físicas associadas, permitindo uma avaliação objetiva do grau de representatividade do modelo em relação à realidade.

A definição clara desses comportamentos de interesse é essencial para uma avaliação quantitativa eficaz com métricas, pois ela delimita as áreas de análise e facilita a tomada de decisões subsequentes, como a escolha dos ensaios, variáveis a serem monitoradas, e as

métricas adequadas para cada situação. Por exemplo, ao determinar os comportamentos a serem avaliados, como a resposta em regime permanente ou a dinâmica de atuação dos limitadores, torna-se possível selecionar métricas específicas para quantificar cada um desses comportamentos de forma mais precisa. Essa definição contribui para que a análise não seja genérica, direcionando-a para áreas específicas e evitando o uso de métricas inadequadas ou superficiais.

Um exemplo desse aspecto pode ser encontrado no critério de avaliação de condições de regime dos ensaios (final, inicial e patamares intermediários) do item 5.9.3 Ensaios da validação dinâmica – Critérios de avaliação dos resultados, da referência técnica (ONS, 2024b). Ao dividir o objetivo de validação do modelo em comportamentos específicos, como as condições de regime, é possível escolher métricas que abordem adequadamente esses comportamentos, evitando a necessidade de uma única métrica de alta complexidade capaz de avaliar múltiplos comportamentos de naturezas distintas.

Essa abordagem organizada facilita a construção de uma análise quantitativa por métricas, pois direciona a seleção de ferramentas adequadas para cada tipo de comportamento, simplificando o processo avaliativo e assegurando uma melhor correspondência entre o modelo e o comportamento observado em campo. Como consequência, as decisões baseadas em métricas tornam-se mais precisas e fundamentadas, o que é essencial para garantir a confiabilidade do modelo em cenários operacionais reais.

5.4.2. Ensaios e variáveis a serem avaliados

O segundo aspecto remete aos ensaios e variáveis a serem avaliados, e é um desdobramento do primeiro aspecto apresentado. Ao estabelecer os comportamentos e características de interesse a serem avaliados em termos de sua correta representação, torna-se necessário detalhar quais são os ensaios e variáveis que, ao serem avaliados por métricas, permitirão tirar conclusões sólidas sobre a representatividade daquele comportamento de interesse. A escolha de variáveis e ensaios adequados assegura que a análise seja direcionada aos pontos relevantes, evitando avaliações superficiais ou que não captam pontos importantes.

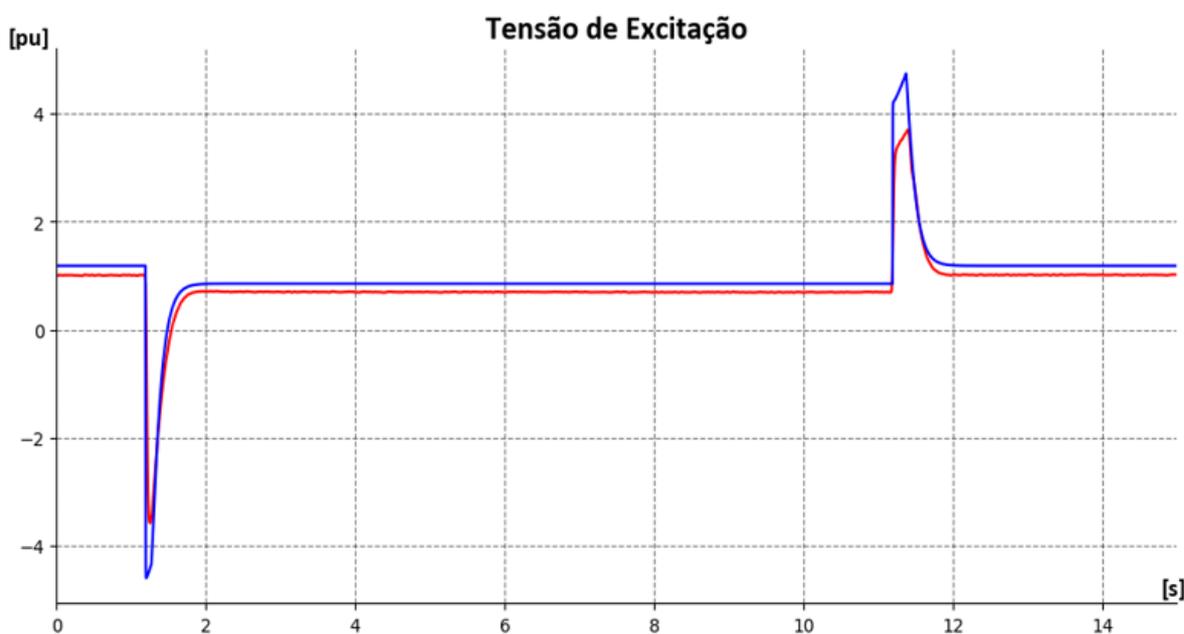
Os ensaios e variáveis a serem avaliados por métricas dependem do comportamento de interesse e do componente modelado em questão. No caso deste trabalho, que apresenta a validação de um sistema de excitação, pode-se explicitar a importância do monitoramento da tensão terminal e da potência reativa, considerando a função que o sistema de excitação exerce.

Um exemplo da importância desse aspecto no impacto do uso de métricas é na escolha de variáveis onde a representação fidedigna da variável pelo modelo é dificultada por complexidades relacionadas à modelagem da MS, como ocorre no caso da representação das variáveis corrente de campo (IFD) e tensão de campo (EFD). Enfatiza-se que a análise dessas variáveis é de extrema valia, pois são variáveis diretamente relacionadas ao controle da tensão; no entanto, é necessário levar em conta a dificuldade adicional imposta pela própria modelagem da MS. Nota-se que a maior parte das reprovações relativas às métricas EAMN e CCL referem-se à variável EFD sendo três das quatro reprovações de EAMN, correspondendo a 75% das suas reprovações, e oito das onze reprovações de CCL, totalizando 72,7% das suas reprovações.

A aplicação do degrau com variação negativa no ensaio de tensão de teto a vazio, por exemplo, registrou sua única reprovação na métrica CCL aplicada na variável EFD. Com isso, o ensaio foi reprovado, mesmo que a tensão, que é a variável controlada, estivesse dentro dos limites das demais métricas e apresentasse indícios qualitativos de boa representatividade. Na Figura 47 é ilustrada a variável EFD reprovada na métrica CCL, na aplicação do degrau com variação negativa, no ensaio de teto a vazio.

Em função do exposto, considera-se que este aspecto é fundamental para não reprovar ensaios que poderiam ser aprovados se não fosse pela escolha de avaliar uma variável que possui uma alta complexidade de representação.

Figura 47 – Varável de tensão de excitação do ensaio de verificação de tensão de teto.



5.4.3. Adequação dos dados a serem avaliados

A adequação dos dados a serem avaliados é fundamental no uso de métricas como recurso de avaliação, pois, se os dados provenientes do modelo ou dos ensaios de campo não estiverem corretamente tratados, e não forem equivalentes em termos de informação, a avaliação resultará em um índice não representativo da qualidade do modelo de simulação.

Entre os fatores principais para garantir a adequação dos dados estão: o número de amostras, que deve ser igual nos conjuntos de dados de simulação e registros de campo, e a utilização das mesmas bases para a normalização dos valores das variáveis elétricas. A equivalência de bases também está descrita como um critério avaliativo do item 5.9.3 da referência técnica (ONS, 2024b).

5.4.4. Seleção das métricas

As métricas selecionadas, ao serem aplicadas, devem fornecer um índice numérico que se traduz em uma informação valiosa para o avaliador sobre a capacidade do modelo em representar corretamente um determinado comportamento físico. Por isso, a interpretação do valor assumido pela métrica deve ser claro e diretamente relacionado à variável e ao ensaio aos quais estão sendo aplicadas, bem como ao comportamento que está sendo avaliado. Essa escolha deve garantir que as métricas tragam informações objetivas e úteis, capazes de guiar o avaliador na tomada de decisões.

Um exemplo pode ser dado a partir da necessidade de avaliar a representatividade das curvas simuladas, em termos da aderência com os registros, em toda a janela de tempo do ensaio, e não apenas em pontos específicos. As métricas CCL e EAMN, por exemplo, permitem que o ensaio seja avaliado de uma forma global. Neste contexto, são métricas que possuem destacada capacidade de apontar a qualidade do modelo de simulação.

Portanto, a escolha adequada das métricas é indispensável para garantir que os índices numéricos obtidos favoreçam o processo de avaliação, tornando-o claro e objetivo.

5.4.5. Robustez e sensibilidade das métricas

A robustez e sensibilidade das métricas são elementos essenciais a serem considerados durante o processo de escolha de uma métrica, pois se referem à capacidade das métricas de

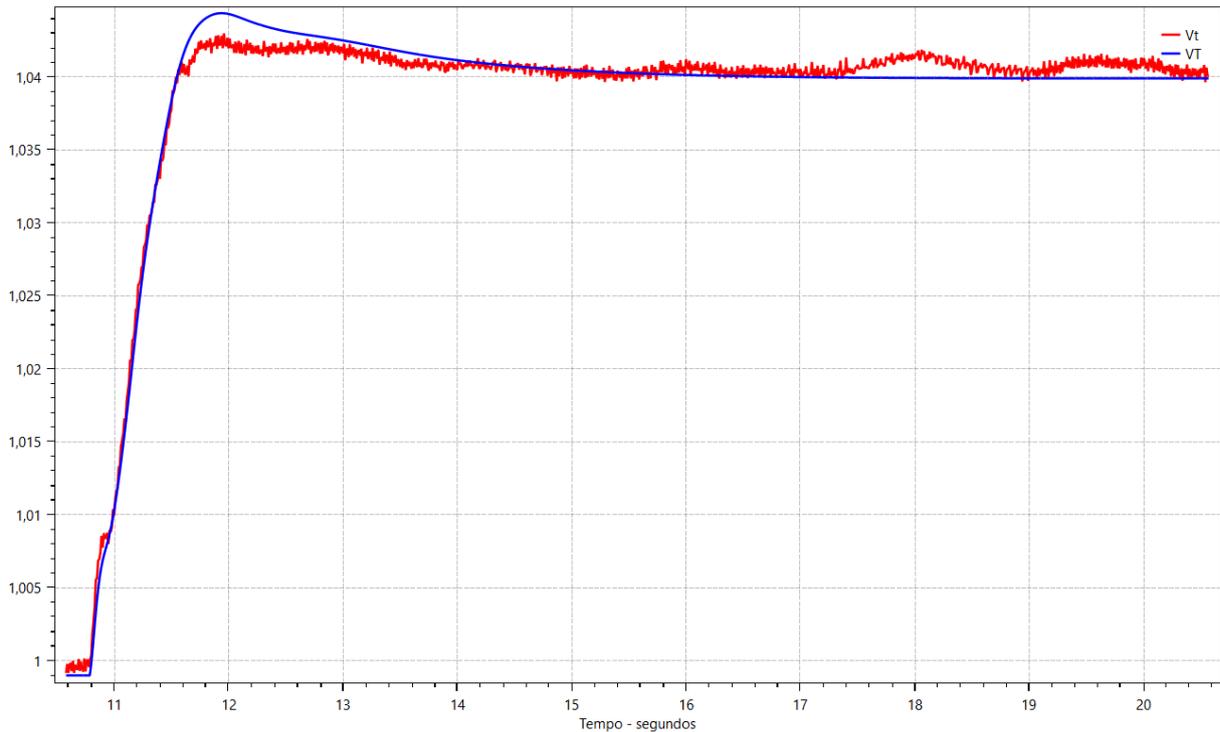
serem imunes a pequenas variações nos dados, ao mesmo tempo que capturam os comportamentos significativos. Garantir que as métricas adotadas sejam robustas e sensíveis, viabiliza uma análise confiável e precisa.

Exemplos onde este aspecto pode ser explorado são encontrados nas aplicações das métricas ETE e ETRI, que são ideais para avaliar janelas específicas de um ensaio, relacionadas ao tempo de estabelecimento e ao tempo de resposta inicial, respectivamente. No entanto, a formulação estabelecida para o cálculo de tais métricas pode levar à reprovação de ensaios, e conseqüentemente do modelo, devido a fatores como ruídos, pequenas perturbações ou pequenas diferenças nos tempos avaliados. Destaca-se que os mesmos ensaios poderiam vir a ser aprovados em uma avaliação visual, ou em um processo onde a aprovação de todas as métricas não fosse um requisito, por fornecerem evidências qualitativas de sua qualidade de representação.

Para explicitar a importância desse aspecto, observa-se a aplicação da *error relativo en el tiempo de establecimiento* (ETE), que quantifica a diferença absoluta relativa dos tempos de estabelecimento da curva de campo e simulada em porcentagem. O tempo de estabelecimento é definido como o tempo necessário para a curva entrar e permanecer em uma faixa de $\pm 3\%$ do valor final relativa ao degrau.

Considera-se um exemplo de aplicação do índice ETE à variável tensão terminal, na aplicação do degrau de tensão, com PSS, em potência máxima, o qual apresentou o valor de 63,37%. O ensaio foi reprovado em função da violação do limite de 25%. Na Figura 48 observa-se que, a discrepância de 63,37% não é perceptível visualmente.

Figura 48 – Tensão terminal do ensaio de degrau tensão, com PSS em potência máxima.



Fonte: Autor (2024)

Pode-se confirmar o valor obtido para o índice por meio da investigação dos tempos calculados pelo algoritmo computacional. Para este ensaio, o degrau foi dado no instante de 10,777 segundos. A faixa de estabelecimento de um sinal é igual ao seu valor final $\pm 3\%$ do valor do degrau dado, sendo o degrau igual a 4% nesse caso. Os dados para o cálculo de ETE são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Variáveis envolvidas no cálculo do índice de ETE.

Variável	Registro	Simulação
Valor final (p.u)	1,0403	1,0398
Faixa de estabelecimento (p.u)	$1,0403 \pm 0,0012$	$1,0398 \pm 0,0012$
Limite superior (p.u)	1,0415	1,0410
Limite inferior (p.u)	1,0391	1,0386
TER (s)	19,633	-
TES (s)	-	14,021

Fonte: Autor (2024)

Nota-se que o tempo de estabelecimento só é definido a partir instante em que o sinal não mais viola a faixa de estabelecimento. Para a curva referente aos registros de campo, tal condição só se estabelece no instante 19,633s. Como o cálculo é realizado em relação ao instante da aplicação do degrau, deve-se subtrair os tempos de estabelecimento pelo instante da aplicação do degrau (10,777s). Com os valores estabelecidos, calcula-se o valor de ETE, conforme a equação a seguir:

$$ETE = \left| \frac{TER - TES}{TER} \right| \times 100$$

$$ETE = \left| \frac{(19,633 - 10,777) - (14,021 - 10,777)}{(19,633 - 10,777)} \right| \times 100$$

$$ETE = 63,37\%$$

Logo, o aspecto da sensibilidade deve ser considerado nas escolhas e formulações das métricas. Enfatiza-se, no entanto, que a métrica ETE viabiliza a avaliação de um comportamento vital do sistema de excitação, que é o tempo de estabelecimento de suas respostas. Neste sentido, podem ser examinadas estratégias para a redução de sensibilidade, tais como o aumento de limiares, ou abordagens avaliativas nas quais a aprovação de todos índices não é um requisito para a aprovação do modelo.

5.4.6. Escolha dos limiares de referência das métricas para a avaliação

A escolha dos limiares de referência das métricas é um aspecto fundamental e decisivo no processo de avaliação de modelos por meio de métricas. Os limiares de referência funcionam como parâmetros de decisão, estabelecendo valores máximos ou mínimos aceitáveis para o índice de uma métrica atingir, e determinando se o modelo está suficientemente próximo dos dados reais para ser considerado representativo. Esses valores precisam ser escolhidos com cuidado, levando em conta a natureza do comportamento a ser avaliado, as variáveis avaliadas e a métrica escolhida com sua respectiva sensibilidade associada.

No entanto, a escolha dos limiares não é trivial e é dependente do tipo de ensaio e da importância relativa do comportamento que está sendo analisado. A definição de limiares também está diretamente ligada à robustez e sensibilidade das métricas, conforme discutido

anteriormente. Se o limiar for muito rígido, ele pode reprovar ensaios que apresentam uma diferença mínima, mesmo que tal diferença não comprometa a validade do modelo, se for muito permissivo, pode aprovar modelos que não representam adequadamente os comportamentos de interesse.

Ao definir corretamente os limiares de referência, o avaliador permite que as métricas operem dentro de parâmetros que respeitam a complexidade dos sistemas envolvidos e as particularidades dos comportamentos a serem analisados, conduzindo a um julgamento mais preciso sobre a qualidade do modelo. Assim, a escolha dos limiares é crucial para garantir que a validação tenha equilíbrio, resultando em uma avaliação justa e tecnicamente consistente.

5.4.7. Dependência da aprovação frente aos resultados

A dependência da aprovação frente aos resultados das métricas é uma questão central em avaliações quantitativas de modelos, pois envolve a escolha entre adotar as métricas como critério absoluto de aprovação ou usá-las como indicadores que sinalizam possíveis inconsistências. Este aspecto trata da decisão entre basear a aprovação estritamente nos resultados das métricas, ou utilizá-las como alarmes para uma análise mais detalhada, onde a reprovação em métricas específicas poderia, por exemplo, acionar uma revisão aprofundada, em vez de uma reprovação automática.

Quando as métricas são usadas como critério definitivo para aprovação, a avaliação é objetiva e rápida, já que os valores numéricos determinam diretamente se o modelo está ou não dentro dos parâmetros aceitáveis. Essa abordagem traz clareza e eficiência, permitindo decisões rápidas e padronizadas. No entanto, pode gerar tanto falsos negativos quanto falsos positivos. Falsos negativos ocorrem quando pequenas discrepâncias nos resultados das métricas, que não comprometem a qualidade física do modelo, resultam em reprovações injustificadas.

Já os falsos positivos ocorrem quando métricas aprovam ensaios que, apesar de tecnicamente passarem pelos critérios numéricos, apresentam inconsistências físicas importantes, mas que não foram capturadas adequadamente pelos números. Em ambos os casos, há o risco de enviesamento técnico, onde se confia excessivamente nos valores gerados pelas métricas, negligenciando uma análise mais contextual e qualitativa dos resultados.

Por outro lado, quando as métricas são utilizadas como indicadores de inconsistências, os resultados ganham maior flexibilidade. Protocolos específicos podem ser criados para lidar com valores próximos aos limites de aprovação, aplicando margens que permitem uma análise

mais contextual. Por exemplo, se uma métrica estiver fora do limiar, pode-se adotar medidas como uma revisão detalhada antes de reprovar o modelo diretamente. Além disso, há também a possibilidade de, independentemente da extrapolação do limite, ainda considerar o modelo para aprovação.

Nesse caso, mesmo que a métrica ultrapasse o valor estipulado, uma análise mais abrangente pode indicar que a diferença não compromete a representatividade do modelo, permitindo que o ensaio seja aprovado. Esse uso permite a avaliação mais refinada de casos limite, evitando reprovações automáticas e assegurando que pequenas variações não invalidem o modelo. No entanto, essa abordagem, embora mais detalhada, pode aumentar o tempo de avaliação e introduzir subjetividade no processo, o que dificulta a padronização.

Independentemente da abordagem adotada, seja ela direta ou com margens de tolerância, é crucial que haja sempre uma revisão final por parte do operador. Isso garante que a decisão sobre a aprovação do modelo seja bem informada, levando em conta não só os valores das métricas, mas também a realidade física e operacional. A revisão cuidadosa dos resultados ajuda a prevenir tanto aprovações equivocadas quanto reprovações indevidas, promovendo uma análise equilibrada que priorize a confiabilidade do modelo validado.

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo abordou a utilização de métricas como recurso para a avaliação de resultados de validação de modelos de componentes do sistema elétrico, com foco específico no sistema de excitação de uma unidade geradora de uma usina hidrelétrica. Em sua motivação, o trabalho demonstrou a importância da validação dos modelos utilizados em estudos elétricos e sua respectiva avaliação, especialmente em um contexto onde os estudos são utilizados em atividades de operação, planejamento e expansão do sistema elétrico. Conseqüentemente, sua confiabilidade e precisão são cruciais para a operação segura do sistema elétrico, em particular do Sistema Interligado Nacional (SIN), que se mostra notoriamente complexo e em expansão.

Neste trabalho, realizou-se a validação do modelo do sistema de excitação no software ANATEM, seguida do estabelecimento de uma metodologia para avaliar os resultados da validação, baseada na padronização estabelecida pelo CNO para a avaliação de modelos, com base em métricas de discrepância.

Os resultados obtidos, representados pelos valores numéricos das métricas e pelos aspectos observados no uso do recurso, evidenciam que o uso de métricas oferece vantagens claras em termos de objetividade, agilidade e padronização. A aplicação de diferentes métricas possibilitou a análise de comportamentos e características específicas, bem como permitiu destacar discrepâncias entre as curvas analisadas. Contudo, o uso de métricas também apresenta desafios significativos. A escolha das variáveis a serem analisadas e a sensibilidade de algumas métricas mostraram-se pontos críticos, levando à reprovação de ensaios que, sob uma perspectiva qualitativa, poderiam vir a ser aprovados.

Outro aspecto relevante é o risco de enviesamento na análise, decorrente da dependência exclusiva dos valores numéricos das métricas para a aprovação do modelo, podendo vir a desconsiderar nuances qualitativas fundamentais. Assim, a forma como os resultados numéricos são utilizados revela-se central no processo avaliativo, destacando uma dualidade entre objetividade e flexibilidade. Esse equilíbrio é essencial para garantir que as métricas sejam usadas de forma eficiente. Enfatiza-se que, a incorporação de métricas de discrepância como recurso no processo avaliativo de modelos de simulação no SIN, é de grande valia.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a continuidade da investigação sobre a aplicação de métricas, explorando de forma mais aprofundada alguns pontos-chave, tais como;

- O estudo de métricas a serem usadas levando em conta os critérios avaliativos do ONS;

- O desenvolvimento de um protocolo avaliativo com o uso de métricas, que implemente diretrizes que integrem a análise quantitativa e qualitativa;
- A escolha de outras métricas ou a adaptação dos limiares de referência das métricas, levando em conta as especificidades de cada componente e as condições operativas;
- A implementação de um sistema de feedback que permita a atualização contínua das métricas e dos critérios de avaliação, com base em experiências práticas e resultados obtidos.
- Análise dos potenciais benefícios da incorporação da Simulação Dinâmica Híbrida (SDH) no processo de validação de modelos de componentes, por meio da injeção de registros de medição sincronizada de fasores (PMU) nas simulações dinâmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, E.; KOSTEREV, D.; POURBEIK, P. **Validation of Power System Models**. IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 2010.

BRASIL. **Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19648compilada.htm. Acesso em: 19 out. 2024.

CEPEL. ANAREDE: **Análise de Sistemas Elétricos de Potência em Regime Permanente**. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/anared-2/>. Acesso em: 30 Junho 2024.

CEPEL. ANATEM: **Análise de Transitórios Eletromecânicos**. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/anatem-2/>. Acesso em: 30 Junho 2024.

CNO. *Acuerdo 1825: anexo 1-4*. 2024.

DECKER, I. C.; SILVA, A. S.; DA SILVA, R. G. J.; AGOSTINI, M. N.; MARTINS, N.; PRIOSTE, F. B. **System wide model validation of the Brazilian interconnected power system**. IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 2010.

GÓMEZ, J. E.; DECKER, I. C. A novel model validation methodology using synchrophasor measurements. *Electric Power Systems Research*, v. 119, p. 207–217, 2015

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc, 1994.

LOBO, Lucas Borré. **Identificação dos parâmetros do modelo de máquina síncrona utilizando ensaios e métodos numéricos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Florianópolis, 2021.

Ministério de Minas e Energia - MME, E. de P. E.-E. 2031 - **Plano Decenal de Expansão de Energia**. 2024.

ONS. **Análise da Perturbação do Dia 15/08/2023 às 08H30min**. 2023.

ONS. **Evolução da Capacidade Instalada no SIN – julho 2024/ dezembro 2028**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 30 de Junho de 2024a.

ONS. **Referência Técnica para Elaboração dos Relatórios de Comissionamento e de Validação do Sistema de Excitação**. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br/sites/5/29/Paginas/servicos/produtos-outros.aspx>. Acesso em: 14 Novembro 2024b.

ONS. **Referência Técnica para Elaboração da Topologia do Sistema de Excitação**. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br/sites/5/29/Paginas/servicos/produtos-outros.aspx>. Acesso em: 14 Novembro 2024c.

ONS. **Submódulo 2.3 Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos**. 2022

ONS. **Submódulo 3.9. Validação de dados e modelos de componentes para estudos elétricos**. 2020.

REIVAX. **Sistemas de Regulação para Hidrelétricas**. Florianópolis: REIVAX, 2022. 10 p. Disponível em: https://www.reivax.com/wp-content/uploads/2022/03/Sistemas-de-Excitacao-e-Reguladores-de-Tensao_AJG-CB_FINAL-1.pdf. Acesso em: 3 nov. 2024. Figura X: [SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICO].

ZYMLER, R. **Validação de Simulações Dinâmicas Sistêmicas Utilizando Registros Sincrofasoriais**. 2020