



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

PROPOSIÇÃO PARA REPRESENTAÇÃO DE EQUIVALENTE DA REDE ELÉTRICA PARA ESTUDOS DO TRONCO DE 765 KV EM AMBIENTE ATP-EMTP E RSCAD

**VINICIUS MONTEIRO VIOLA(1); VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA(1); MARCELO MENDONÇA GONÇALVES(1); MARCOS VINÍCIUS PIMENTEL TEIXEIRA(2); PAULO CÉSAR PELLANDA(2); RODRIGO ESCORCIO GOMES(1)
JORDÃO ENERGIA(1); INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA(2)**

RESUMO

Na análise de transitórios eletromagnéticos, torna-se importante a modelagem de uma rede elétrica equivalente a partir de uma região geoeletrica reduzida em virtude das limitações dos programas computacionais. Este trabalho tem como objetivo propor uma rede elétrica equivalente para estudos de transitórios eletromagnéticos que ocorram no lado brasileiro da UHE Itaipu e no tronco de transmissão de 765 kV de Furnas, que abrange desde a subestação de Foz do Iguaçu até a subestação de Tijuco Preto. A representação equivalente foi obtida a partir do programa computacional ANAFAS, e posteriormente modelada e validada nos programas computacionais ATP/ATPDraw e RSCAD.

PALAVRAS-CHAVE

Rede Equivalente, Tronco 765 kV, UHE Itaipu, ATP, RTDS.

1.0 INTRODUÇÃO

Para a análise de fenômenos de transitórios eletromagnéticos em determinada região do sistema elétrico brasileiro, é importante a delimitação de uma região geoeletrica para a construção de uma rede equivalente que possua comportamento semelhante ao do sistema completo, cuja modelagem nem sempre é necessária ou possível. Podem ser citados como empecilhos as limitações de processamento do programa ATP (do inglês, *Alternative Transient Program*), cuja interface gráfica é feita pelo programa ATPDraw, e a limitação do número de nós e relação custo-benefício na utilização do simulador *Hardware-in-the-Loop* RTDS (do inglês, *Real Time Digital Simulator*), que tem a interface gráfica elaborada no programa RSCAD [1].

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) estabelece critérios para a construção de redes equivalentes, dispostos nos Procedimentos de Rede, submódulo 2.3 - Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos", seção 2.5.5, Representação equivalente da rede elétrica [2]. Desses critérios pode-se destacar:

- Na definição das barras de fronteira, deve-se escolher pontos da rede nos quais o circuito equivalente tenha uma influência mínima sobre o comportamento transitório do restante do sistema, representado em detalhes, que é o foco do estudo.
- Na conexão entre as barras focalizadas no estudo (barras zero) e as barras de fronteira devem existir, pelo menos, duas outras barras.
- A validação dos equivalentes e da própria rede representada com base na frequência fundamental deve ser realizada por comparação dos valores de correntes de curto-circuitos monofásico e trifásico obtidos no programa de transitórios com os resultados do programa de cálculo de curto-circuito.

Ao definir as barras de fronteira, os elementos eliminados são reduzidos a equivalentes de modo a garantir as características do sistema original. Esses equivalentes aparecem nas barras de fronteira, sob a forma de equivalentes próprios ou conexões de transferências. Os equivalentes próprios, alimentados por uma fonte de tensão com o mesmo nível de tensão ao qual foi originado, permitem reproduzir a contribuição de potência de curto-circuito do sistema naquele ponto. Já as conexões de transferências são representadas por impedâncias e representam as conexões que surgem entre as barras de fronteira devido à redução do sistema. Nas conexões entre barras de níveis de tensão diferentes, há, além da impedância, a presença de um transformador.

Neste trabalho, propõe-se uma rede equivalente para estudos de transitórios eletromagnéticos que ocorram no lado brasileiro da UHE Itaipu e no tronco de transmissão de 765 kV de Furnas, que abrange desde a subestação de Foz do Iguaçu até a subestação de Tijuco Preto. A representação equivalente foi obtida a partir do programa

computacional ANAFAS, e posteriormente modelada e validada nos programas computacionais ATP/ATPDraw e RSCAD.

2.0 MODELAGEM DA REDE EQUIVALENTE

2.1 Construção da rede no ANAFAS¹

A base de dados para o ANAFAS escolhida foi a mesma utilizada no Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão (PAR) 2021-2025, do ONS, referente ao horizonte de dezembro de 2025 [3]. Em seguida, foram definidas as barras zero: SE 500 kV Itaipu, SE 500 kV Foz do Iguaçu, SE 765 kV Foz do Iguaçu, SE 765 kV Ivaiporã, SE 765 kV Itaberá e SE 765 kV Tijuco Preto.

Das subestações de Foz do Iguaçu 500 kV e Ivaiporã 765 kV, a rede expande-se para a região Sul, a partir do estado do Paraná. Da subestação de Tijuco Preto 765 kV, a expansão se dá prioritariamente a partir de São Paulo em direção ao Sudeste. A partir das sete barras focalizadas, expandiu-se a rede até a obtenção de pelo menos duas barras até a fronteira. No entanto, devido à limitação de 200 nós trifásicos do RTDS² utilizado na simulação deste trabalho, a rede final teve de ser simplificada. Na FIGURA 1 apresenta-se a rede no ANAFAS, com destaque para as barras zero.

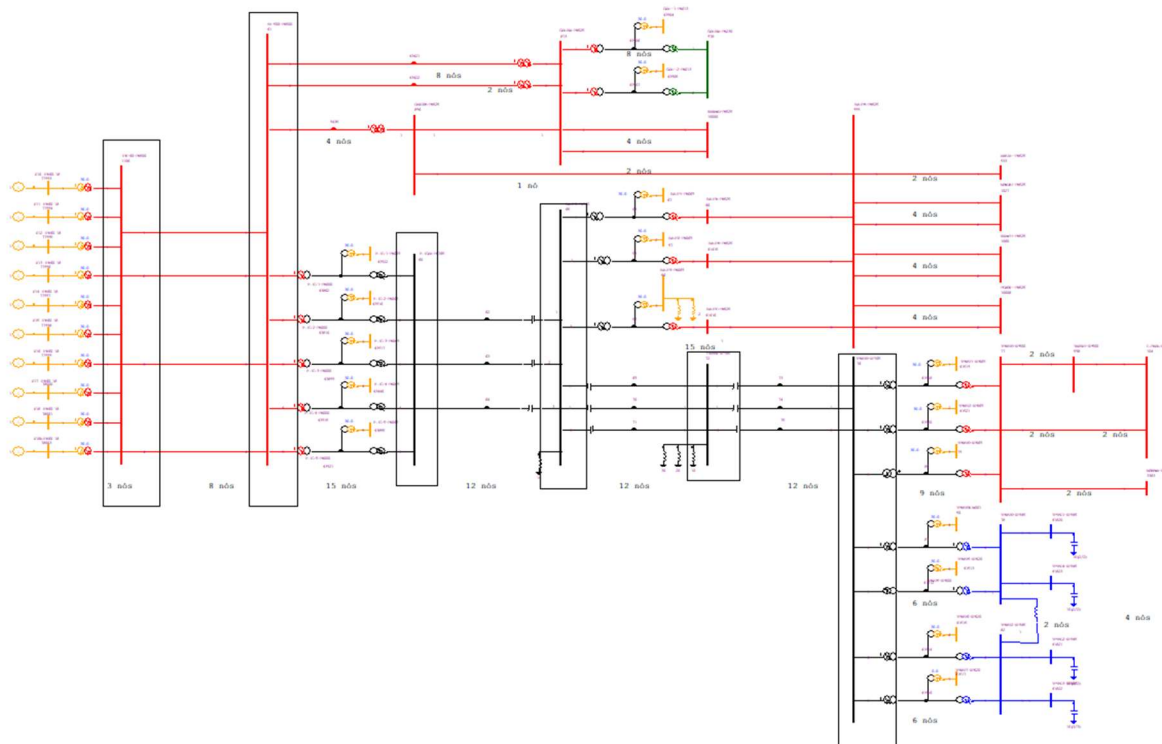


FIGURA 1 - Rede equivalente representada no ANAFAS.

Então, com as barras de fronteiras definidas, o equivalente foi gerado dentro do ANAFAS, e os dados da rede exportados para uma planilha externa, com os dados de Barras, Linhas de Transmissão, Geradores, Transformadores, Elementos *Shunt* e Elementos Série.

2.2 Tratamento de dados

A base de dados exportada pelo ANAFAS não contém todas as informações necessárias para a modelagem da rede em outros programas, sendo necessário realizar um tratamento desses dados. Para a obtenção dos comprimentos de linha faltantes, utilizou-se a base de dados do ONS presente no Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do Sistema Interligado Nacional (SINDAT). Já os dados de susceptância de sequência

¹ Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS). Versão 7.4.0. Cepel, Eletrobras. 2021.

² Simulações realizadas no Laboratório de Segurança Cibernética (LASC) do Instituto Militar de Engenharia. Simulador RTDS[®] com 1 chassi NovaCor 1.0 com 5 núcleos. RSCAD[®] FX. Versão 1.1. RTDS[®] Technologies, 2021.

positiva (B_1) foram obtidos no programa Análise de Redes Elétricas (ANAREDE), a partir do caso-base do PAR 2021-2025, referente ao verão 2024/2025 e patamar de carga pesada [4]. Em sequência, a componente zero da susceptância (B_0) foi estimada como sendo 60% da componente positiva, isto é: $B_0 = 0,6 B_1$.

De modo a eliminar elementos que possuem pouca influência no circuito, foram desprezados os circuitos de transferência de impedância por unidade maior que 100%. Os elementos de transferência estão apresentados no Anexo, nas Tabela 3A rede equivalente final foi composta por:

- 25 Barras;
- 34 Linhas de Transmissão;
- 7 Linhas de Transferência;
- 20 Transformadores de Potência;
- 7 Transformadores de Transferência;
- 24 Geradores (11 reais e 13 equivalentes);
- 32 Elementos *Shunt*;
- 10 Elementos Série.

2.3 Modelagem da rede no ATPDraw³ e no RSCAD

Os dados de geradores exportados do ANAFAS foram convertidos para os dados de entrada do ATP e do RSCAD conforme processo da FIGURA 2. Os geradores foram representados com uma fonte de tensão ideal em série com um elemento de linha.

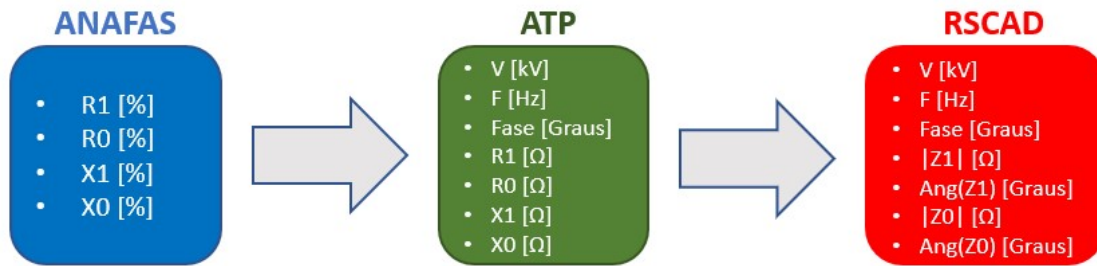


FIGURA 2 - Conversão de dados dos geradores do ANAFAS para ATP e RSCAD.

O fenômeno de propagação de ondas exige que a representação da linha de transmissão tenha um nível de detalhamento que depende do tipo de estudo a ser realizado. Visto isso, o modelo Pi Equivalente Simétrico, com parâmetros concentrados, foi adotado para linhas de comprimento menor ou igual a 20 km. Esse modelo consiste em um elemento RL série e de duas capacitâncias *shunt* de mesmo valor. Para as demais linhas, adotou-se o modelo de parâmetros distribuídos, conhecido como modelo de Bergeron, em que a tensão e a corrente variam em módulo e fase ao longo da linha.

Os modelos de impedâncias de transferência utilizados no ATP e no RSCAD apresentam grande diferença. O ATP admite um modelo de linha com parâmetros R_0 , R_1 , X_0 , X_1 em ohms, bastando apenas converter os dados do ANAFAS, exportados em p.u. (por unidade). No entanto, esse procedimento não é possível no RSCAD. Neste é necessário implementar o modelo de Bergeron, com a estimação dos parâmetros de B_0 e B_1 . Inicialmente, define-se o comprimento de linha L que corresponde ao que a luz percorreu em um passo de integração (*time step*) do programa RSCAD a partir da Equação (1).

$$L = V_{luz} \cdot t_{step} \quad (1)$$

A partir do valor de L , as capacitâncias C_i , de sequência zero ($i = 0$) e sequência positiva ($i = 1$) podem ser estimadas pela Equação 2.

$$C_i = \frac{(t_{step})^2 \cdot \omega^2}{X_{i,L}} \quad (2)$$

Então, foi possível obter B_0 e B_1 , em $\frac{M\Omega}{km}$ conforme a Equação (3).

³ ATPDraw. Versão 6.0 para Windows. NTNU/SINTEF, 2015.

$$B_i = \frac{L \cdot 10^{-6}}{C_i} \quad (3)$$

O processo de conversão dos dados de linha de transferência é apresentado na FIGURA 3 –

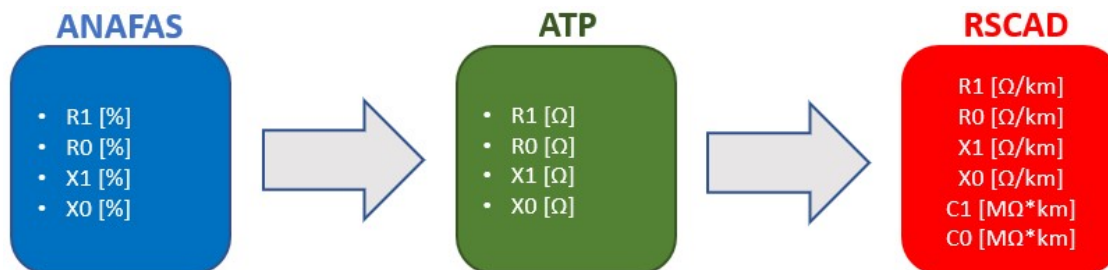


FIGURA 3 – Conversão de dados das linhas de transferência do ANAFAS para ATP e RSCAD.

3.0 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

3.1 Ajustes da rede no ATP/ATPDraw

A partir do ajuste dos ângulos dos geradores, buscou-se obter um fluxo de potência no ATP que apresentasse tensões dentro do limite operativo definidos pelo Submódulo 2.3, conforme a TABELA 1 [2]. Esse ajuste também é necessário para aproximar os resultados de curto-circuito do ANAFAS, pois como não houve importação de caso convergente do ANAREDE, as barras foram representadas com tensão 1 p.u. de kV e sem defasagem angular.

TABELA 1 – Tensões entre fases admissíveis a 60 Hz [2].

Tensão nominal de operação ⁽¹⁾	Condição operativa normal		Condição operativa sob contingências	
	(kV)	(pu) ⁽²⁾	(kV)	(pu) ⁽²⁾
< 230	–	0,95 a 1,05	–	0,90 a 1,05
230	218 a 242	0,95 a 1,05	207 a 242	0,90 a 1,05
345	328 a 362	0,95 a 1,05	311 a 362	0,90 a 1,05
440	418 a 460	0,95 a 1,046	396 a 460	0,90 a 1,046
500	500 a 550	1,00 a 1,10	475 a 550	0,95 a 1,10
525	500 a 550	0,95 a 1,048	475 a 550	0,90 a 1,048
765	690 a 800	0,90 a 1,046	690 a 800	0,90 a 1,046

3.2 Resultados

Os resultados dos curtos fase-terra e trifásico-terra são mostrados na TABELA 2.

TABELA 2 – Resultados dos níveis de curto-circuito no ANAFAS, ATP e RSCAD.

Subestação	Tensão (kV)	ANAFAS		ATP		RSCAD	
		3φ (kA)	1φ (kA)	3φ (kA)	1φ (kA)	3φ (kA)	1φ (kA)
Itaipu	500	39,18	46,87	38,75	46,75	40,03	45,67
				-1,11%	-0,26%	2,17%	-2,56%
Foz do Iguaçu	500	39,04	45,26	38,53	45,43	40,14	43,28
				-1,31%	0,37%	2,81%	-4,38%
Foz do Iguaçu	765	22,54	23,63	22,29	23,85	23,16	23,38
				-1,11%	0,94%	2,74%	-1,03%
Ivaiporã	765	25,51	20,52	24,29	20,61	26,94	19,26

				-4,80%	0,43%	5,61%	-6,12%
--	--	--	--	--------	-------	-------	--------

Em relação aos níveis de curto-circuito obtidos no ANAFAS, a rede equivalente no ATP apresentou o erro médio de -0,86% e o erro médio quadrático de 0,67%. Um erro máximo, de -4,80%, foi obtido no curto-circuito trifásico na SE 765 kV Ivaiporã e um mínimo, de -0,26%, foi encontrado na falta monofásica na SE 500 kV Itaipu. À exceção do curto trifásico supracitado, todos os outros curtos ficaram abaixo de 1,35%, em módulo. Os erros, ainda que mínimos, podem ser justificados pelas diferenças intrínsecas de cada programa em relação aos modelos dos elementos.

Por outro lado, para o modelo no RSCAD, em relação aos níveis de curto-circuito obtidos no ANAFAS, o erro médio encontrado foi de -0,10% e o erro médio quadrático foi de 1,35%. Um erro máximo, de -6,12%, foi encontrado no curto-circuito monofásico na SE 765 kV Ivaiporã, e um mínimo, de -1,03%, no curto monofásico na SE 765 kV Foz do Iguaçu. Os erros podem ser justificados da mesma forma que para os da rede equivalente do do ATP.

4.0 CONCLUSÕES

Em relação aos níveis de curto-circuito, a rede equivalente modelada apresentou resultados satisfatórios quando comparada à rede equivalente desenvolvida no ANAFAS.

A rede modelada pode servir de base para um modelo mais robusto, no qual serão incluídas as principais proteções do sistema, os modelos completos de máquina dos geradores da usina de Itaipu 60Hz, a modelagem física das linhas de transmissão de 765kV (modelo LCC), entre outros aperfeiçoamentos.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SILVA, J. L. J., CARVALHO, S.M., COLMAN L. R. S., JÚNIOR J. B. M., NYZNYK, E. Ensaio de modelo utilizando simulador RTDS para validação dos ajustes das proteções das LIs de 500kV entre a Usina Hidrelétrica de Itaipu e a Subestação Foz do Iguaçu devido a alteração de configuração na Subestação de Foz do Iguaçu; IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.
- (2) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Procedimentos de Rede, Módulo 2 – Critérios e Requisitos - Submódulo 23.3 - “Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos”, 2021.
- (3) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2025 = VERSÃO 03/06/2020 = BR2512PE.ANA – Ciclo do PAR ano 2021 / 2025 – Caso de Referência BR2512PD.ANA gerado a partir do caso de referência BR2412PD.ANA DE 03/06/2020, aplicando-se os arquivos de alteração NNE2512PD.ALT, SECO2512PD.ALT e SUL2512PD.ALT. (Arquivo ANAFAS).
- (4) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. ONS * PARPEL 2021-2025 * VERÃO 2024/2025 PESADA * (Arquivo ANAREDE).

6.0 ANEXO

Tabela 3 – Dados das Linhas de Transferência no ANAFAS.

Barra De	Nome Barra De	Barra Para	Nome Barra Para	Número Circuito	Resistência (R1%)	Reatância (X1%)	Resistência (R0%)	Reatância (X0%)
78	TPRETO-SP345	82	TPRET2-SP345	1	0.04333	0.38103	0.04036	0.94401
104	C.PAUL-SP500	598	TAUBAT-SP500	2	0.52289	4.9184	66.768	86.996
598	TAUBAT-SP500	3383	LORENA-SP500	1	0.35655	6.9513	10.54	37.894
896	CASCOE-PR525	1060	SSANTI-PR525	1	0.1721	2.1986	4.2247	10.372
933	AREIA--PR525	10008	PGROS--PR525	1	0.14965	1.7732	10.024	25.58
933	AREIA--PR525	1060	SSANTI-PR525	1	0.12404	1.3743	1.3962	6.0015
1027	LONDRI-PR525	10000	SARAND-PR525	3	0.49317	4.0228	5.421	20.673

Tabela 4 – Dados dos Transformadores de Transferência no ANAFAS.

Barra De	Nome Barra De	Barra Para	Nome Barra Para	Número Circuito	Resistência (R1%)	Reatância (X1%)	Resistência (R0%)	Reatância (X0%)
896	CASCOE-PR525	978	GUAIRA-PR230	1	2.4061	11.237	92.197	187.71
78	TPRETO-SP345	104	C.PAUL-SP500	1	0.99546	10.772	184.96	384.92
82	TPRET2-SP345	104	C.PAUL-SP500	1	0.7733	9.8528	340.65	578.68
78	TPRETO-SP345	10008	PGROS--PR525	1	1.066	9.0393	1426.87	1876.48
78	TPRETO-SP345	598	TAUBAT-SP500	1	0.87121	8.7129	56.724	119.29
82	TPRET2-SP345	598	TAUBAT-SP500	1	0.65621	8.4925	114.97	200.74
82	TPRET2-SP345	10008	PGROS--PR525	1	0.89605	8.0459	1541.53	2032.57

DADOS BIOGRÁFICOS



Vinicius Monteiro Viola possui graduação em Engenharia Elétrica (2019) no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (Cefet-RJ) e está cursando mestrado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência no Instituto Militar de Engenharia (IME). É engenheiro de sistemas de potência no departamento de Estudos Elétricos da Jordão Energia, com foco em análises de transitórios eletromagnéticos, curto-circuito e qualidade de energia. Foi estagiário no departamento de Planejamento Energético e Preços da Neoenergia de 2018 até 2019 e foi estagiário no departamento de Estudos Energéticos da Eletrobras de 2017 até 2018.

(2) VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA

Formado na UFF em 1992, Mestrado em Computação em 2009. Com grande experiência em estudos regime permanente, transitório eletromecânico, transitório eletromagnético, comissionamento, modelagem e ajuste de equipamento de controle, tais como: Reguladores de Tensão, Reguladores de Velocidade, PSS. Grande experiência na modelagem de SVC, HVDC, Usinas Solares e Eólica no ATP e ANATEM. Com participação nos estudos de HVDC no Brasil. Trabalhou em Furnas de 1993 à 2000 e no ONS de 2000 à 2008. Hoje é sócio da empresa Jordão Energia, empresa reconhecida pela Aneel com uma das 10 empresas que mais se envolvem em projetos de P&D.

(3) MARCELO MENDONÇA GONÇALVES

Marcelo Mendonça Gonçalves possui graduação em Engenharia Elétrica (2013) pela Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense. Trabalha como Engenheiro na Empresa Jordão Energia na área de estudos elétricos com foco em transitórios eletromagnético de 2011, onde iniciou na empresa como estagiário e permanece até os dias atuais. Como complemento na formação acadêmica, cursa atualmente o último semestre do Programa de Mestrado em Sistema Elétrico de Potência no Instituto Militar de Engenharia (IME).

(4) MARCOS VINÍCIUS PIMENTEL TEIXEIRA

Doutor e mestre em engenharia elétrica pela PUC-Rio, graduado em engenharia elétrica pela UFF e técnico em eletrônica pela FAETEC. Professor de magistério superior do departamento de engenharia elétrica do Instituto Militar de Engenharia - IME. Possui experiência como engenheiro de sistemas elétricos de potência do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e realiza pesquisa nas áreas de análise de redes elétricas em regime permanente, dinâmica e serviços ancilares à operação elétrica.

(5) PAULO CÉSAR PELLANDA

Paulo Pellanda received the B.Sc. degree from the Federal University of Technology-Paraná, Brazil (1985), the M.Sc. degree from the Military Institute of Engineering (IME), Rio de Janeiro, Brazil (1993), both in Electrical Engineering, and the Ph.D. degree in automatic control from École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, France (2001). He joined the Electrical Engineering Department of IME in 1994, where he was the Head of the Department and the Head of the Defense Engineering Graduate Program. His research interests include robust optimal control and linear parameter varying control with applications in aerospace and power system fields.

(6) RODRIGO ESCORCIO GOMES

Rodrigo Escorcio Gomes possui graduação em Engenharia Elétrica (2019) pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). Atualmente, cursa o mestrado em Engenharia Elétrica no IME, com previsão de conclusão para julho de 2022. Desde julho de 2021, é engenheiro de sistemas de potência na Jordão Energia.