

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**PROPOSTA DE UM ÍNDICE PREDITIVO ONLINE UTILIZANDO MEDIÇÃO SINCRONIZADA DE FASORES PARA MITIGAÇÃO DO PROBLEMA DE FALHA DE COMUTAÇÃO NO CENÁRIO HVDC MULTI-INFEED NO BRASIL****RAFAEL DE OLIVEIRA FERNANDES(1)*; MARIA CRISTINA DIAS TAVARES(1); JAVIER ARTURO SANTIAGO ORTEGA(1)
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS(1)****RESUMO**

O objetivo deste trabalho é trazer uma contribuição para a estimativa de um índice preditivo *online* para a mitigação do problema de Falha de Comutação (FC) no cenário HVDC-LCC (*High Voltage Direct Current – Line-Commutated Converter*) no Brasil, através do monitoramento de índices de Relação de Curto-Circuito (RCC), de FC e uso de informação sincrofásorial. A ideia central deste índice preditivo é a sua utilização como suporte à tomada de decisão pela área de operação dos Agentes e do ONS (Operador Nacional do Sistema), a fim de evitar as possíveis FC e/ou poder mitigá-las, via ações preditivas em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE

Falha de Comutação, HVDC, Redes Neurais Artificiais, Medição Sincrofásorial, Índice Preditivo.

1.0 INTRODUÇÃO

Considerando um Elo HVDC-LCC para a transmissão de grandes blocos de potência em longas distâncias, para uma configuração do tipo “*single infeed*” adota-se, por exemplo, a avaliação de um índice denominado ESCR (*Effective Short-Circuit Ratio*) para as subestações de corrente alternada (CA) com a presença de “*infeed*”, com o intuito de se verificar a relação de curto-circuito efetiva. Entretanto, atualmente, temos no Brasil um cenário “*Multi-Infeed CC*”, onde múltiplos “*infeed CC*” se encontram eletricamente próximos, o que significa operar com múltiplas estações inversoras conectadas a barramentos próximos no sistema de Corrente Alternada (CA.) No Sistema Interligado Nacional (SIN) a operação elétrica conta com 6 bipolos HVDC instalados em quatro estações inversoras em uma mesma área geoeletrica, no sudeste do país, totalizando cerca de 20 GW de injeção de potência. A configuração com os seis bipolos no SIN compreende: 2 bipolos do Madeira interligando Porto Velho (RO) até Araraquara (SP), 2 bipolos de Belo Monte interligando Xingu (PA) até Estreito (MG) e Xingu (PA) até Terminal Rio (RJ) e, por fim, 2 bipolos de Itaipu interligando Foz do Iguaçu (PR) até Ibiúna (SP).

Ao levar-se em conta um cenário de *infeed* único ou *links* múltiplos eletricamente distantes uns dos outros, as FC em um *link* HVDC são restritas, ou seja, não influenciam os inversores remotos. Contudo, considerando-se agora que múltiplos “*infeed CC*” compartilham o mesmo sistema de corrente alternada, pode-se ter o problema de Falhas de Comutação Simultâneas (FCS) nos múltiplos *links* CC. Dado um cenário pessimista de operação, onde múltiplos *links* experimentam FCS, a injeção de potência dos sistemas HVDC no terminal receptor de corrente alternada poderá ser interrompida em todos os sistemas HVDC ao mesmo tempo, podendo causar, na rede CA, instabilidade transitória, falhas entre as interações dos controles (mestre e escravo), dentre outros problemas. Além disso, as FCS podem causar a interrupção de grandes blocos de potência em quantidades de Gigawatts (GW) no SIN e, devido às interações “*multi-infeed*” com outros elos HVDC, podem gerar oscilação dinâmica ou mesmo instabilidade transitória na rede CA. Uma FC local pode acontecer devido a uma falha elétrica no sistema CA, com início após poucos milissegundos em relação ao instante do defeito, já as FCS ocorrem quando há mais de uma FC nos *links* HVDC, também com início após poucos milissegundos após o início da falta. As FC subsequentes se caracterizam quando uma FC em um conversor provocar a FC em um outro conversor e, neste caso, o início entre as FC será dado numa faixa de dezenas de milissegundos até algumas dezenas de segundos.

No presente informe é proposto o uso de um índice preditivo em tempo real para a mitigação do problema de FCS no cenário *multi-infeed*.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 serão apresentados os Fundamentos Teóricos, na Seção 3 a Metodologia, na Seção 4 as Simulações e Resultados e na Seção 5 a Conclusão.

2.0 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 O SISTEMA DE MEDIÇÃO SINCROFASORIAL

Um sistema de medição sincrofasorial consiste, basicamente, de equipamentos PMU instalados em terminais de LT da rede elétrica, concentradores de dados, sincronismo de tempo, armazenamento de dados e simuladores em tempo real e offline [1], conforme pode ser verificado na Figura 1.

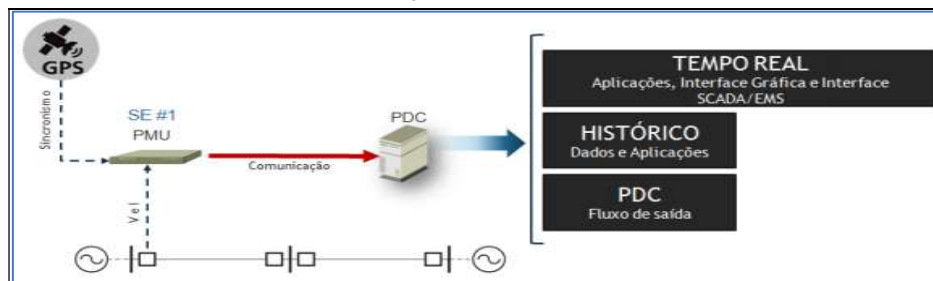


Figura 1 – Arquitetura Básica de um SMSF – Fonte [1]

Através de um sistema de comunicação de dados, via uma infraestrutura de canal de telecomunicação adequada e que garanta a latência mínima estipulada em projeto, as grandezas sincrofasoriais de tensão, corrente, frequência e derivada da frequência são enviadas em taxas de transmissão, por exemplo, 60 fps (amostras por segundo), via o protocolo IEEE C37.118 [2] e [3]. O papel principal do PDC (*phasor data concentrator*) é de realizar o alinhamento e o armazenamento dos dados sincrofasoriais, assim como executar os programas em tempo real e offline. As medições sincrofasoriais precisam estar sincronizadas e apresentar uma qualidade de tempo adequada (estampa de tempo), conforme estipulado na norma IEEE, mantendo-se os erros de *Total Vector Error* (TVE), *Frequency Error* (FE) e *Rate of Frequency* (RFE) dentro das faixas de erro aceitáveis. Nesse sentido, é vital ter-se um monitoramento do sinal de sincronismo de tempo, adquirido por meio dos sistemas *Global Navigation Sattelite System* (GNSS), como o sistema *Global Positionning System* (GPS), por exemplo, assim como o correto dimensionamento do oscilador do relógio a ser empregado no equipamento receptor do sinal do satélite na subestação, para que se tenha um resultado esperado dos algoritmos e dos programas [1]. Neste trabalho, devido à dificuldade de obtenção das medições sincrofasoriais por parte dos Agentes envolvidos com as análises, utilizou-se as grandezas elétricas simuladas via a ferramenta Anatem, do CEPEL, cujos resultados serão apresentados nas Seções 4.3.2 e 4.3.3 deste trabalho.

2.2 O FENÔMENO DE FALHA DE COMUTAÇÃO

A FC pode ocorrer devido a uma má operação durante o processo de comutação das válvulas tiristorizadas, sendo que na maioria das vezes isto resulta das distorções ou afundamentos mais severos das tensões de referência para o controle de disparo, inerentes aos defeitos no sistema CA [4]. Neste caso, durante a FC não haverá a correta transferência da corrente para a próxima válvula que foi disparada caso o intervalo de tempo entre o instante do zero de corrente na válvula que está em processo de bloqueio, e o instante em que esta válvula passa a ter em seu anodo uma polarização direta, seja menor que o tempo mínimo necessário para a recomposição da camada de junção dos tiristores. De um modo geral, a recuperação do elo HVDC após uma FC ocorrerá com o inversor operando com um ângulo de extinção acima do valor mínimo ($\gamma > \gamma_{\min}$), pois as ações de controle avançam momentaneamente o ângulo de disparo α . Na prática, isto se reflete em um aumento da potência reativa absorvida pelas estações conversoras, com duração de poucos ciclos, até que a tensão CA se recupere, onde a velocidade de recuperação é dada em função do comportamento da rede CA. Durante uma falta na rede elétrica o tempo de eliminação da falta é primordial para que o PLL (*Phase Locked Loop*) possa ressincronizar, contudo, é necessário que a tensão de restabelecimento tenha um formato senoidal. Quando a FC ocorrer, o detector de FC, o qual compara se a corrente das válvulas é maior do que a Corrente Contínua (CC), irá limitar o ângulo de disparo α das válvulas para dar margem ao ângulo de extinção γ . Como forma de caracterizar o fenômeno de FC através de uma simulação eletromagnética, utilizou-se a ferramenta PSCAD e o modelo disponibilizado no estudo R2 da EPE, de acordo com [5]. Aplicou-se um curto-circuito monofásico na LT 500 kV Araraquara-Taubaté, com duração de 100 ms e observou-se a FC no sistema HVDC-LCC do Madeira.

Na Figura 2, tem-se a tensão trifásica do primário do transformador conversor – que é a tensão de referência utilizada pelo sistema de controle de disparo dos tiristores, e as correntes do lado das válvulas, no secundário do transformador YY, durante um processo de FC. Em função das tensões de fase e de linha é possível calcular a área sob a curva das grandezas de tensão e ela deverá ser igual ou superior ao tempo de recuperação da camada de junção do tiristor para que o mesmo suporte a tensão direta em seu anodo quando a próxima válvula estiver em processo de condução, e quando isto não for possível, terá início o processo de FC.

A variável “VLWY” corresponde à tensão no primário (*line winding*) do transformador conversor, em kV, lado do inversor. Já as variáveis “IVWSAY”, “IVWSBY” e “IVWSCY” correspondem às correntes do lado das válvulas (*valve winding*), em kA, dos transformadores ligado em YY do lado inversor, Polo P3.

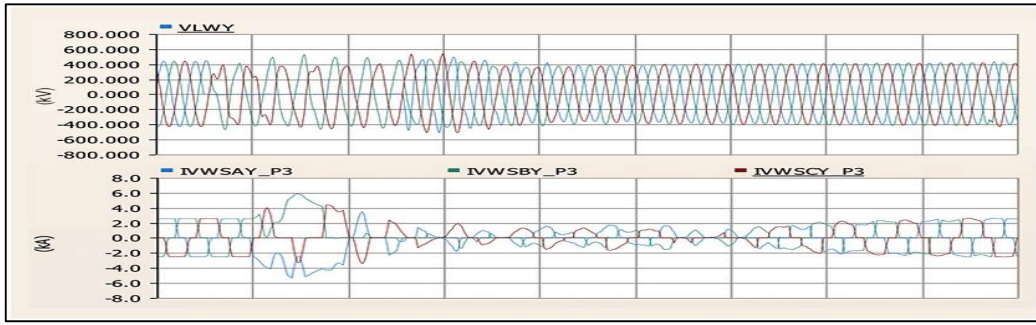


Figura 2 – Falha de Comutação - Tensões dos Transformadores e Correntes das Válvulas

2.2.1 ÍNDICES DE FALHA DE COMUTAÇÃO

Em relação ao problema de multi-infeed CC, são calculados índices preditivos para a seleção dos casos críticos relacionados à estabilidade dinâmica. A metodologia de cálculo foi elaborada inicialmente pelo Cigre [6] e atualmente é adotada pelo CEPEL [7]. Neste trabalho foram utilizados quatro índices de FC, como descrito a seguir.

- ✓ *SCR (Short Circuit Ratio)* é calculado como sendo:

$$SCR_i = \frac{S_{cc_i}}{P_{dc_i}} \quad (1)$$

Onde: S_{cc_i} é a potência de curto-circuito trifásica na barra inversora do conversor i , e P_{dc_i} é a potência injetada pelo conversor i .

- ✓ O *MIIF (Multi-infeed Interaction Factor)* é determinado como sendo uma relação entre as variações de tensão nas barras de interesse:

$$MIIF_{j,i} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} \quad (2)$$

Onde: ΔV representa a variação de tensão nas barras i e j , respectivamente.

- ✓ O Potencial de Interação (*PI*) é calculado como sendo uma relação entre as potências injetadas pelos conversores multiplicando-se pelo índice *MIIF*.

$$PI = MIIF_{j,i} \frac{P_{dc_j}}{P_{dc_i}} \quad (3)$$

- ✓ O *MISCR (Multi-infeed Interaction SCR)* é calculado como sendo:

$$MISCR_i = \frac{S_{cc_i}}{P_{dc_i} + \sum_j (MIIF_{j,i} P_{dc_j})} \quad (4)$$

Em [8], é apresentada uma proposta de monitoramento online do índice MISCR como forma preditiva de modo a fornecer aos operadores dos centros de controle dos sistemas de potência mais uma ferramenta de suporte à tomada de decisão em tempo real, quando de situações de interação da rede híbrida CA com os múltiplos sistemas HVDC-LCC *infeed*.

2.3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As Redes Neurais Artificiais (RNA) podem ser interpretadas como sendo modelos computacionais inspirados no sistema nervoso de seres vivos [9]. Elas possuem a capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento, com base em informações, sendo caracterizadas por um conjunto de neurônios artificiais que são interligados por um grande número de interconexões (sinapses artificiais), representadas por vetores e/ou matrizes de pesos sinápticos. Ainda em [9], as RNA possuem como características principais a adaptação por experiência, através de exemplos, a capacidade de aprendizado via um método de treinamento, habilidade de generalização após o treinamento da rede, organização de dados, tolerância a falhas, armazenamento distribuído e facilidade de prototipagem. Elas podem ser aplicadas em diversas áreas do conhecimento, como: aproximador universal de funções, controle de processos, reconhecimento/classificação de padrões, agrupamento de dados (clusterização), sistema de previsão, otimização de sistemas e memórias associativas, por exemplo. Neste trabalho, a RNA foi utilizada com o foco em reconhecimento de padrão e a rede escolhida foi a *Radial Basis Function* (RBF). A rede RBF extrai as características (*Features*) na primeira camada neural e prepara para o uso na camada de saída, ela usa uma quantidade menor de neurônios que o *Perceptron Multicamadas* (PMC), no caso de amostras agrupadas. Diferentemente das redes PMC, as quais podem ser compostas por diversas camadas intermediárias, a estrutura típica de uma rede RBF é composta por apenas uma camada intermediária, com função de ativação gaussiana. A rede RBF também pertence à arquitetura *feed-forward* de camadas múltiplas, e o treinamento é realizado de forma supervisionada, ou seja, conhecendo-se as saídas. Ao comparar-se uma rede PMC com uma RBF, a topologia das redes é diferente, sendo fixa para a RBF, com uma única camada oculta e variável. As funções de ativação da camada intermediária são diferentes nas duas redes, gaussiana para a RBF e sigmóides para o PMC – as quais por serem funções do tipo anti-simétrica, aceleram muito o treinamento das camadas intermediárias, e o algoritmo de treinamento também é diferente, algoritmo K-Means e uma variante da regra delta para RBF e *back-propagation* para o PMC. Em relação à estratégia de treinamento, diferentemente do PMC, a RBF é constituída de duas fases ou estágios bem distintos entre si. O primeiro estágio, associado com os ajustes dos pesos dos neurônios da camada intermediária, adota um

método de aprendizagem auto-organizado (não-supervisionado), que é dependente apenas das características dos dados de entrada – cujo ajuste está diretamente ligado com a alocação das funções de base radial.

Já o segundo estágio, associado aos ajustes dos pesos dos neurônios da camada de saída, utiliza um critério de aprendizagem similar ao utilizado pelo PMC, ou seja, a regra delta generalizada. Por fim, diferentemente das redes PMC, o processo de treinamento se inicia pelos neurônios da camada intermediária, encerrando-se nos neurônios da camada de saída. Na Figura 3, tem a ilustração de uma rede PMC e de uma rede RBF, respectivamente.

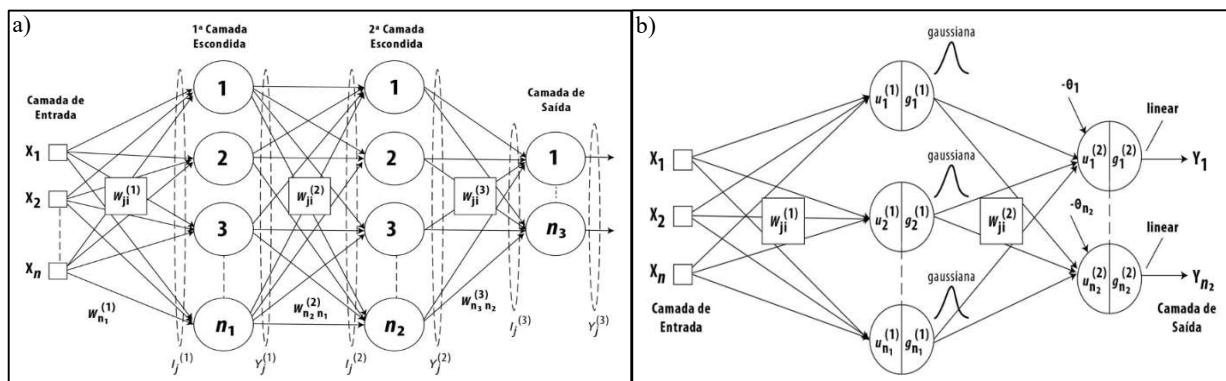


Figura 3 – a) Rede PMC, b) Rede RBF. Fonte: Adaptado de [9]

2.4 FUNÇÃO ENERGIA DE LYAPUNOV

De acordo com [10], o segundo método Lyapunov permite que o estudo da estabilidade global de um sistema em análise possa ser realizado de forma direta, sem a solução explícita das suas equações diferenciais não-lineares, via simulações computacionais no domínio do tempo. Este método é uma tentativa de se determinar a estabilidade global diretamente através do uso de uma função de Lyapunov, definida em um espaço de estados.

2.4.1 FUNÇÃO ENERGIA TRANSITÓRIA DE LYAPUNOV

Considerando-se um sistema elétrico de potência real é possível a construção da Função Energia de Lyapunov (FEL) assumindo-se algumas simplificações, como desconsiderar as condutâncias de transferência nas equações da rede, por exemplo. Desta forma, é possível obter a Função Energia Transitória (FET) de Lyapunov, ao invés da FEL e, com isso, a Energia de Potencial (EP) e a Energia Cinética (EC) podem ser numericamente obtidas. A FET não satisfaz diretamente as condições de Lyapunov, pois parte da EP é numericamente computada ao longo da trajetória do sistema e, por definição, é necessário ter-se o ângulo de equilíbrio pós-falta para a computação da EP [10], [11].

2.4.2 POTÊNCIA TRANSFERIDA EM CORREDORES DE TRANSMISSÃO

De acordo com a Figura 4, tem-se a representação da transferência de potência entre duas áreas geoeletricas, representadas pelas barras de Colinas (TO) e Serra da Mesa (GO), simbolizando-se um corredor de transmissão interconectado por uma reatância equivalente denominada por x_e . Assim, como apresentado em [9], o Corredor Norte-Sul (CNS) apresenta uma forte correlação entre a potência ativa e a diferença angular entre as barras de Colinas e de Serra da Mesa, com um valor de coeficiente de determinação de: $R^2 = 0,9919$, durante o período de análise de 1 ano, entre 01/02/2016 e 01/01/2017, com dados obtidos via estimador de estados no SIN, indicando-se que os dados de diferença angular e de potência ativa estão muito próximos em relação à linha de regressão ajustada. Vale observar que há um reforço previsto para entrada em operação de duas LT entre Miracema e Serra Pelada e de duas LT entre Serra Pelada e Xingu, assim como a entrada de mais uma LT entre Serra Pelada e Itacaiúnas, portanto, deverá ser analisado novamente a correlação entre a potência ativa e a diferença angular no CNS após a entrada em operação destes reforços sistêmicos.

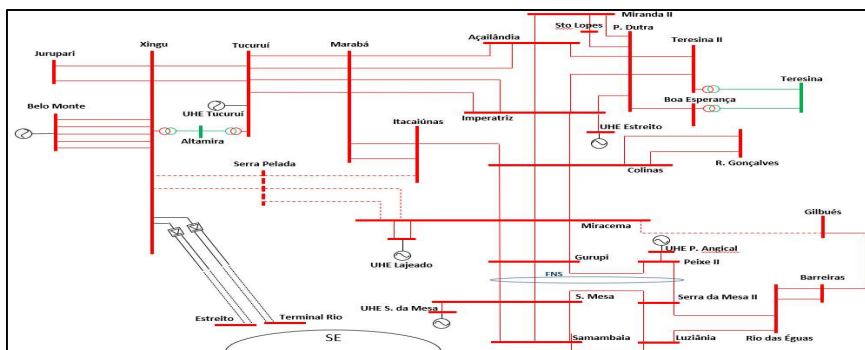


Figura 4 – Área Geoeletrica Norte-Sul/Sudeste. Fonte: ONS

2.4.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA FET

De acordo com [10], [11], a EP e a EC podem ser obtidas por:

$$V_{PE} = \frac{E_1 E_2}{x'_e} (\cos(\delta_0) - \cos(\delta) + \text{sen}(\delta_{op})x(\delta_{op} - \delta)) \quad (5)$$

$$V_{KE} = \frac{1}{2}(2H)\Omega\omega^2 = H\Omega\omega^2 \quad (6)$$

Onde: $\delta = \delta_1 - \delta_2$, δ_1 , e δ_2 são os ângulos internos dos geradores e E_1 e E_2 são as tensões internas dos geradores, em p.u., $\Omega = 2\pi f$, onde f é a frequência nominal do sistema, em Hertz, e $\omega = \omega_1 - \omega_2$ (velocidades angulares dos geradores 1 e 2) em p.u. Já a inércia equivalente é dada em p.u., por $H = H_1 H_2 / (H_1 + H_2)$, e a reatância equivalente x'_e , dada em p.u., inclui também a reatância dos transformadores e da impedância transitória dos geradores.

De posse das medidas fasoriais desses barramentos e/ou circuitos, pode-se aproximar: $V_1 \approx E_1$, $V_2 \approx E_2$, $\theta \approx \delta$, $\omega_b \approx \omega$ e $x'_e \approx x_e$, onde: $\omega_b = \omega_{b1} - \omega_{b2}$, sendo ω_{b1} e ω_{b2} as frequências angulares, em rad/s, respectivamente. As tensões nas barras/circuitos não são constantes e variam com o tempo, contendo componentes de oscilação de baixa frequência. Estas componentes precisam ser filtradas, neste caso, as grandezas filtradas V_1 e V_2 fasoriais, são chamadas de tensões grandezas fasoriais “quasi-steady state”.

A Função Energia será: $V_E(t) = V_{KE}(t) + V_{PE}(t)$, sendo:

$$V_{PE} = \frac{V_1 V_2}{x'_e} (\cos(\theta_{qss}) - \cos(\theta) + \text{sen}(\theta_{qss})x(\theta_{qss} - \theta)) \quad (7)$$

$$V_{KE} = H\Omega\omega^2 \quad (8)$$

Onde: θ_{qss} é obtido, na prática, pelo filtro passa faixa no ângulo de medição θ .

3.0 METODOLOGIA

A simulação eletromecânica foi realizada através da ferramenta Anatem do CEPEL, considerando-se os casos do mensal do ONS, de todo o ano de 2020 (12 meses), com os patamares de carga leve, média e pesada. Com isto, foram obtidas 36 simulações, sendo que cada simulação correspondeu à uma FC, conforme será apresentado na Seção 4. Para cada simulação adotou-se como critério de seleção o maior valor de MIIF, PI, SCR e MISCR, conforme pode ser observado em cada linha da Tabela 1 e com os valores finais sendo apresentados na Tabela 2, e utilizados para a rede RBF.

Tabela 1 – Dados Obtidos via Simulação com Anatem – Janeiro de 2020

Nome da Barra	MIIF				PI				Pdc[MW]	Sc[MVA]	SCR	MISCR
	IBIUNA-SP345	ARARQ2-SP500	ESTREI-MG500	T.RIO--RJ500	IBIUNA-SP345	ARARQ2-SP500	ESTREI-MG500	T.RIO--RJ500				
IBIUNA-SP345	1	0.29949	0.186337	0.222245	1	0.179983	0.09371	0.111439	2934.07	20724.85	7.0635	5.0987
ARARQ2-SP500	0.467039	1	0.325522	0.301712	0.777149	1	0.272408	0.251738	1763.27	25883.72	14.6794	6.3723
ESTREI-MG500	0.266009	0.284602	1	0.207294	0.528944	0.340095	1	0.206683	1475.56	21113.37	14.3087	6.8826
T.RIO--RJ500	0.229857	0.203227	0.154708	1	0.458409	0.243571	0.155165	1	1471.21	20172.07	13.7112	7.3817
Nome da Barra	IBIUNA-SP345	ARARQ2-SP500	ESTREI-MG500	T.RIO--RJ500	IBIUNA-SP345	ARARQ2-SP500	ESTREI-MG500	T.RIO--RJ500	Pdc[MW]	Sc[MVA]	SCR	MISCR
IBIUNA-SP345	1	0.298893	0.177896	0.20774	1	0.168649	0.083998	0.097801	3125.02	20790.72	6.653	4.9254
ARARQ2-SP500	0.471673	1	0.313734	0.284229	0.835938	1	0.262539	0.237151	1763.28	25932.43	14.707	6.2894
ESTREI-MG500	0.27018	0.286785	1	0.194722	0.572208	0.342708	1	0.194151	1475.55	21188.51	14.3598	6.7963
T.RIO--RJ500	0.234757	0.206817	0.150781	1	0.498647	0.247873	0.151224	1	1471.22	20625.24	14.0191	7.3851
Nome da Barra	IBIUNA-SP345	ARARQ2-SP500	ESTREI-MG500	T.RIO--RJ500	IBIUNA-SP345	ARARQ2-SP500	ESTREI-MG500	T.RIO--RJ500	Pdc[MW]	Sc[MVA]	SCR	MISCR
IBIUNA-SP345	1	0.307583	0.187114	0.217586	1	0.289462	0.098771	0.114813	1873.55	20176.38	10.769	7.1582
ARARQ2-SP500	0.363653	1	0.259951	0.213078	0.386418	1	0.145809	0.119473	1763.18	22012.64	12.4847	7.5372
ESTREI-MG500	0.184835	0.214325	1	0.165687	0.350156	0.382101	1	0.165625	988.99	17580.68	17.7765	9.3295
T.RIO--RJ500	0.20311	0.167418	0.157768	1	0.384919	0.298588	0.157827	1	988.61	18722.53	18.9381	10.2744

Tabela 2 – Dados de Entrada e Saída (Classe) para a RBF – Janeiro de 2020

Nome da Barra	MIIF	PI	SCR	MISCR	Classe
IBIUNA-SP345	0.29949	0.179983	7.0635	5.0987	NaoFalha
ARARQ2-SP500	0.467039	0.777149	14.6794	6.3723	Falha
ESTREI-MG500	0.284602	0.528944	14.3087	6.8826	Falha
T.RIO--RJ500	0.229857	0.458409	13.7112	7.3817	Falha
IBIUNA-SP345	0.298893	0.168649	6.653	4.9254	NaoFalha
ARARQ2-SP500	0.471673	0.835938	14.707	6.2894	Falha
ESTREI-MG500	0.286785	0.572208	14.3598	6.7963	Falha
T.RIO--RJ500	0.234757	0.498647	14.0191	7.3851	Falha
IBIUNA-SP345	0.307583	0.289462	10.769	7.1582	NaoFalha
ARARQ2-SP500	0.363653	0.386418	12.4847	7.5372	NaoFalha
ESTREI-MG500	0.214325	0.382101	17.7765	9.3295	NaoFalha
T.RIO--RJ500	0.20311	0.384919	18.9381	10.2744	NaoFalha

Assim, para cada mês foram obtidas 12 amostras, num total de 144 amostras para treinamento da RBF, considerando-se todo o ano de 2020. O critério adotado para a classe de saída foi “Falha” se $PI > 0,4$, caso contrário, “NaoFalha” para $PI \leq 0,4$. Com isso, a RBF foi treinada com os dados de janeiro a junho de 2020 e para a etapa de operação foram utilizados os dados de julho a dezembro de 2020.

Como forma de avaliar o impacto de uma FC no SIN, particularmente no CNS, computou-se a FET de Lyapunov, com o propósito principal de avaliar o comportamento dinâmico da rede elétrica CA logo após a FC. A FET não foi

utilizada para realizar o treinamento/operação da RBF, mas sim para fornecer mais uma medida de segurança aos operadores dos centros de operação do sistema elétrico, de forma preditiva.

4.0 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 FALHA DE COMUTAÇÃO NO ANATEM

Para a simulação da FC no *software* Anatem, via o comando “APFC”, adotou-se a seguinte sequência de simulação para a produção de FC *multi-infeed*, sendo:

1) Aplicação de um curto-circuito na barra de Ibiúna 525 kV, no instante de tempo $t = 200$ ms, com uma queda de tensão de 35%; **2)** Aplicação da FC em Ibiúna em $t = 200$ ms, com duração da FC de $t = 72$ ms; **3)** Aplicação da FC em Estreito em $t = 209$ ms, com duração da FC de $t = 8$ ms; **4)** Aplicação da FC no bipolo 2 do Madeira em $t = 210$ ms, com duração da FC de 48 ms; **5)** Aplicação da FC no bipolo do Terminal Rio em $t = 211$ ms, com duração da FC de 8 ms; **6)** Aplicação da FC no bipolo 1 do Madeira em $t = 211$ ms, com duração da FC de 8 ms; **7)** Remoção da FC em Estreito em $t = 217$ ms; **8)** Remoção da FC no Terminal Rio em $t = 219$ ms; **9)** Remoção da FC no bipolo 1 do Madeira em $t = 219$ ms; **10)** Remoção da FC no bipolo 2 do Madeira em $t = 258$ ms; **11)** Remoção da FC em Ibiúna em $t = 272$ ms; **12)** Abertura da LT 525kV Ibiúna – Bateias C1 e C2 e **13)** remoção do curto-circuito em $t = 300$ ms.

4.2 DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS REALIZADAS NA ETAPA DE TREINAMENTO E DE OPERAÇÃO DA RBF

Na Figura 5, apresenta-se a distribuição das amostras utilizadas na rede RBF considerando um total de 144 amostras. Para a etapa de treinamento utilizaram-se 72 amostras - disponibilizadas entre janeiro a junho de 2020, e para a etapa de operação utilizaram-se 72 amostras - disponibilizadas entre julho a dezembro de 2020. As amostras utilizadas foram: MIIF, PI, SCR e MISCR, como já descritas no item 2.1.1 deste trabalho. Vale notar que o processamento de uma RNA é paralelo, mas o conhecimento é distribuído, por isso deve-se procurar eliminar os dados chamados pontos discrepantes (*outliers*), garantindo-se a robustez da rede a ser treinada. Há várias técnicas utilizadas para este propósito, como distribuição estatística, perda de monotonicidade e, em alguns casos, utiliza-se agentes externos às RNA para a eliminação destes *outliers*. Neste trabalho, utilizou-se o filtro de análise de qualidade de dados da ferramenta *Weka* [12], denominado *InfoGain*, que consiste em eliminar atributos redundantes, determinar um subconjunto de atributos mais relevantes para a representação do problema e melhorar o desempenho da RBF.

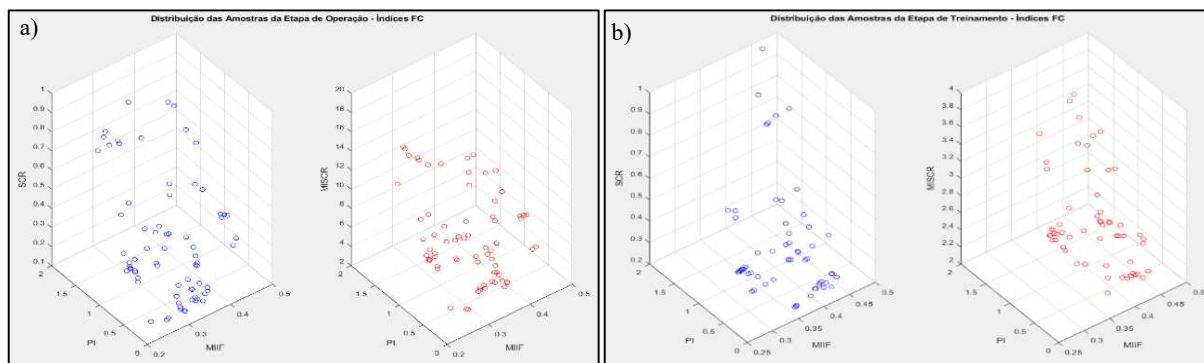


Figura 5 – Amostras de Entrada na RBF: MIIF, PI, SCR e MISCR. a) Treinamento, b) Operação

4.2.1 RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO REDE RBF

A rede RBF foi desenvolvida e implementada em ambiente *Matlab*, sem o uso de *toolbox*. Foram utilizadas 4 entradas de dados: MIIF, PI, SCR e MISCR, e foram utilizados 10 neurônios para a camada intermediária (10 *clusters*). O tempo de processamento da rede na etapa de operação foi de $t = 425$ ms. Os *clusters* da camada neural intermediária, as variâncias bem como os pesos sinápticos da segunda camada neural são apresentados na Tabela 3. O Erro Quadrático Médio (EQM) pode ser observado na Figura 6, com o número de épocas de 1095 após a convergência da rede neural. A taxa de acerto na etapa de operação foi de 98%. Quando se consideraram 8 neurônios na camada intermediária, a taxa de acerto foi de 88%, o que ainda consiste numa taxa de acerto muito significativa.

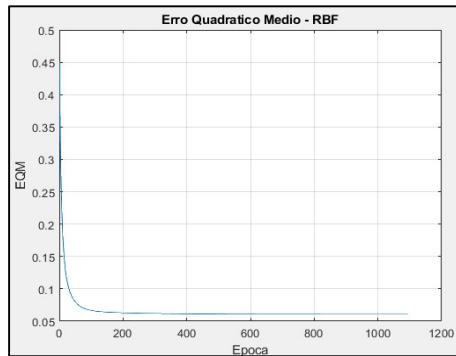


Figura 6 – Erro Quadrático Médio

Centróides W 1					Variâncias
0.4614	1.4881	0.7655	3.1038	0.0655	
0.4074	0.5964	0.3167	2.4615	0.1422	
0.4336	1.6488	0.955	3.5873	0.2385	
0.3925	0.6431	0.3682	2.7337	0.0929	
0.408	0.2448	0.2207	2.2079	0.0882	
0.4152	1.3176	0.7941	3.4061	0.168	
0.4216	0.9239	0.5105	3.112	0.1101	
0.3342	0.9245	0.5554	3.5854	0.1916	
0.3675	0.2983	0.2715	2.6245	0.1687	
0.3136	0.5805	0.3909	2.921	0.1145	
Pesos Sinápticos da Rede Treinada W 2					
0.446	-0.691	-0.719	-0.809	-0.73	1.859
-0.575	-0.819	-0.668	2.368	-0.817	

Tabela 3 – Centróides, Variâncias e Pesos

4.3 FUNÇÃO ENERGIA TRANSITÓRIA DE LYAPUNOV

4.3.1 INÉRCIA EQUIVALENTE SIN

Com os dados de inércia por área geoeletrica, em unidade dimensional de MW.s, obtidos através do estimador de estados no SIN, foi possível encontrar a inércia equivalente entre as áreas, em p.u. de MW.s, na base de potência de 100 MVA. Este trabalho considerou somente o CNS para a obtenção dos resultados, assim, na Figura 7, apresenta-se a inércia equivalente do CNS durante o período de 1 ano, compreendido entre 01/01/2020 e 31/12/2020, discretizado a cada 30 minutos. É interessante notar que em [10] foi obtida a estimativa da inércia equivalente do CNS, em p.u. de MW.s, também na base de 100 MVA, com somente o uso de medições sincrofasoriais das barras de Colinas e de Serra da Mesa durante um evento real no SIN, de 21/03/2018, com um valor estimado de $H_{eqCNS} = 62300 [MW.s]$ ou $H_{eqCNS} = 623 [pu]$.

Na Figura 7, considerando-se a data de 21/03/2020 (2 anos posteriores em relação à data de 21/03/18), o valor médio encontrado foi de, aproximadamente, $H_{eqCNS} = 68000 [MW.s]$ ou $H_{eqCNS} = 680 [pu]$.

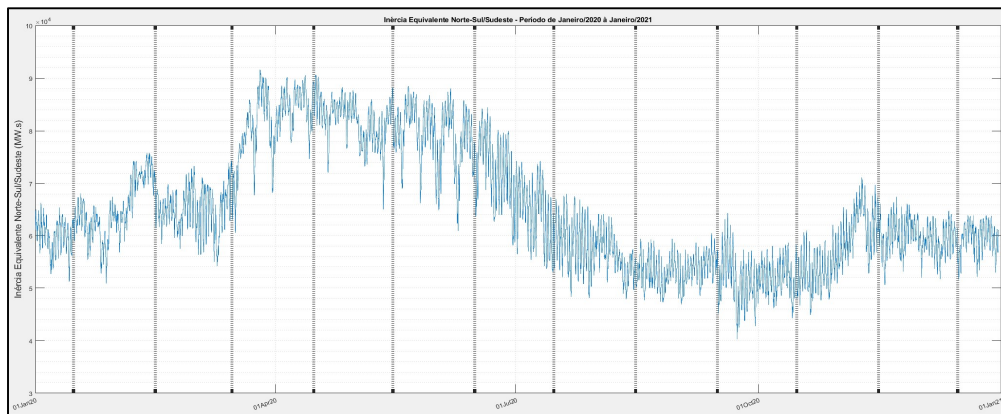


Figura 7 – Inércia Equivalente Norte-Sul

4.3.2 DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA E ANGULAR NO CNS

Na Figura 8, apresenta-se a diferença de frequência e angular no CNS para o ano de 2020, cenário de carga leve. Observam-se as variações das grandezas no instante do início da FC, bem como os valores máximos alcançados.

a)

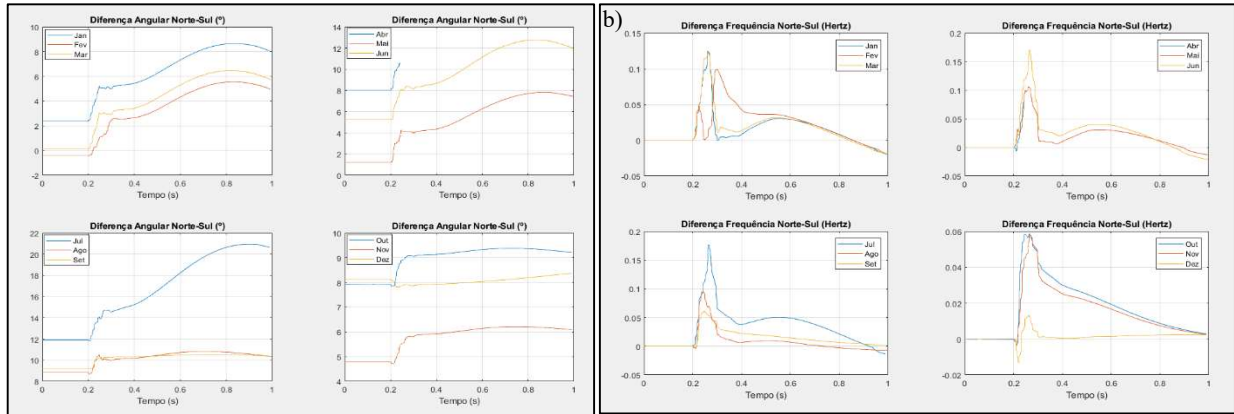


Figura 8 – a) Diferença de Frequência no CNS, b) Diferença Angular no CNS

Devido aos diversos cenários a serem analisados, será mostrado no item 4.2.3 a seguir, somente a FET do ano de 2020, com os três patamares de carga: leve, média e pesada.

4.3.3 FUNÇÃO ENERGIA TRANSITÓRIA DE LYAPUNOV

De acordo com [10], uma condição para a avaliação da instabilidade transitória baseando-se na FET de *Lyapunov* é:

$$V_{PE}(\delta^u) - V_{PE}(\delta^{cl}) > V_{KE}^{cl} \quad (9)$$

Onde: $V_{PE}(\delta^u)$ representa a EP de um ponto instável de operação, $V_{PE}(\delta^{cl})$ a EP no instante de eliminação da falta e V_{KE}^{cl} representa a EC no instante de eliminação da falta.

Na Figura 9, tem-se a FET de *Lyapunov* considerando-se os patamares de carga leve e média de 2020. Já na Figura 10, tem-se a FET de *Lyapunov* do patamar de carga pesada de 2020, assim como a criticidade da FET de *Lyapunov* quando da ocorrência de FC no SIN, indicando-se possíveis condições de instabilidade transitória no CNS, de acordo com o exposto na condição de desigualdade da inequação (9). O valor crítico adotado para a EP no CNS foi: $V_{PE}(\delta^u) = 2.5 \text{ pu} - \text{MW} - \text{rad/s}$, e este valor foi adotado levando-se em conta a análise de perturbação de um caso real no SIN, particularmente a perturbação de 21/03/2018, após transcorridos $t = 100 \text{ ms}$ do início do evento, conforme exposto em [10].

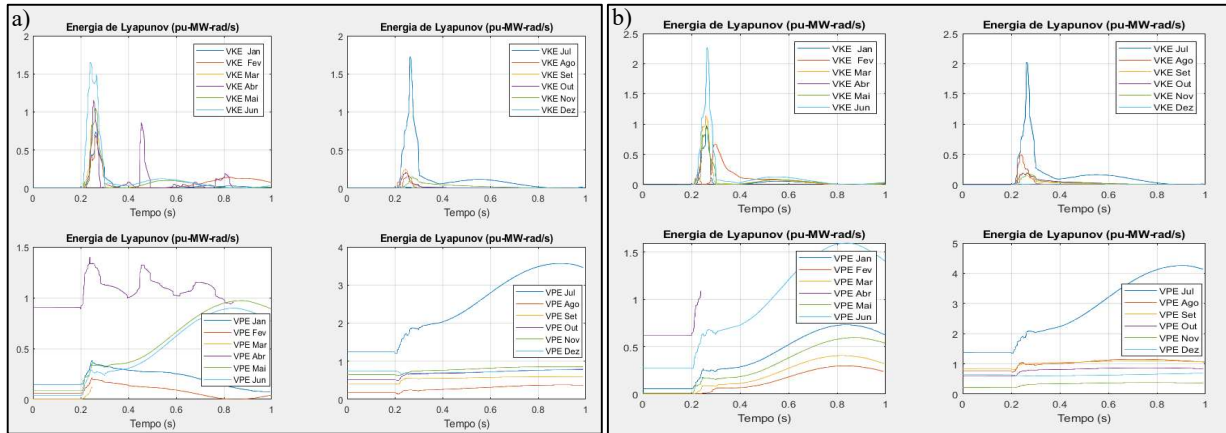


Figura 9 – FET *Lyapunov* a) Patamar de Carga Leve, b) Patamar de Carga Média

a)

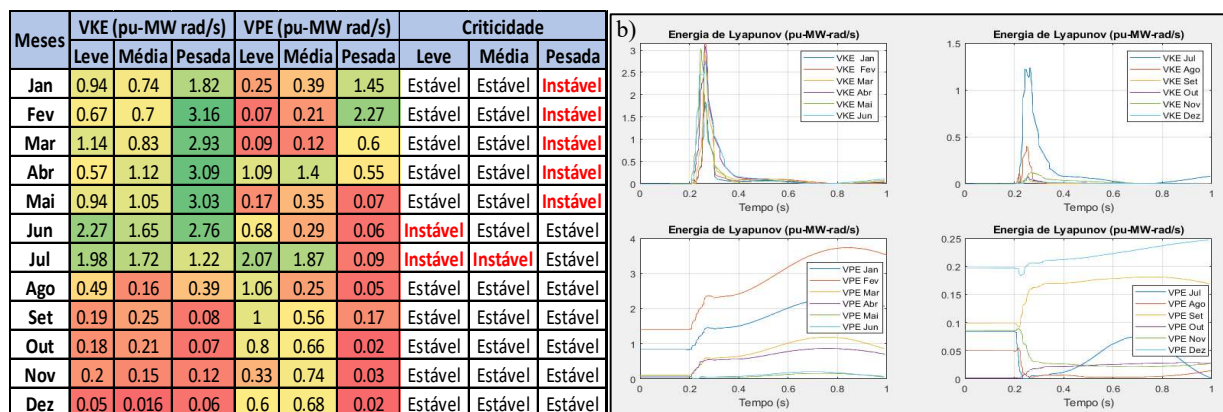


Figura 10 – FET *Lyapunov*, a) Condição de Operação no CNS - Críticidade, b) Patamar de Carga Pesada

5.0 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma nova proposta para a análise preditiva de falhas de comutação em elos HVDC-LCC no cenário de *multi-infeed* no SIN com o uso de redes neurais artificiais. A RNA RBF demonstrou ter uma boa robustez e uma taxa de acerto muito significativa, provando ser adequada para este tipo de aplicação de reconhecimento de padrão de falha de comutação no SIN, apresentando também um tempo de convergência muito baixo, com um erro quadrático médio, praticamente, nulo. O critério adotado para o treinamento da RNA RBF considerou os índices de falha de comutação disponibilizados pela ferramenta Anatem, do CEPEL, sendo que os dados da rede estavam em uma região convexa compacta (fechada e limitada) após a clusterização realizada na primeira etapa de treinamento. Dado que é possível obter o fluxo de potência e, portanto, realizar a simulação eletromecânica em tempo real, é possível, então, obter os índices de falha de comutação também em tempo real, realimentando as entradas da RNA RBF já treinada, para a etapa de operação.

O trabalho também abordou a FET de *Lyapunov* avaliando o critério de instabilidade transitória no corredor de transmissão norte-sul, logo após o início da falha de comutação simultânea. Com esta verificação, é possível determinar, de modo aproximado, se a falha de comutação causará um ponto de operação instável no corredor norte-sul. Dado que há o monitoramento *online* da inércia equivalente entre regiões geoeletricas no SIN, seria suficiente monitorar as diferenças de frequência e de ângulo nos principais corredores de transmissão para ter-se o cômputo da FET, também em tempo real. O uso de informação sincrofasorial pode, facilmente, ser utilizado nas barras e/ou circuitos das linhas de transmissão para o cômputo da FET. Neste trabalho não foi possível utilizar tais dados por serem de propriedade dos Agentes e pelo fato de que o espaço amostral de dados utilizado foi de 12 meses, ao longo do ano de 2020 e, portanto, seria necessário o acesso a todo esse banco de dados. De toda forma, o Anatem disponibilizou os dados no formato RMS, e a taxa de exteriorização ajustada no *software* foi de 1 por ciclo (16 ms). Por fim, com os resultados promissores deste trabalho identifica-se um possível uso dos índices de falha de comutação para o treinamento de uma rede neural artificial para a análise online de possíveis interações entre os elos de corrente contínua, bem como a análise da FET em um corredor de transmissão, de modo a fornecer subsídios aos operadores dos centros de controle para a tomada de decisão em tempo real.

6.0 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelos órgãos CNPq (307237 2020 6) e CAPES (Código de Financiamento 001).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.Fernandes, D.N.Gonçalves, M.Muniz, H.Volskis, “O Projeto SMSF do ONS e os Resultados Práticos do Uso da Tecnologia Sincrofasorial pelas Equipes de Operação e de Análise de Eventos Considerando os Aplicativos Offline e de Tempo Real Instalados nos seus Concentradores de Dados”, XVIII ERIAC, 2019.
- [2] Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Standard C37.118.1, Dec. 2011.
- [3] Synchrophasor Measurements for Power Systems – Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements, IEEE Standard C37.118a, Apr. 2014.
- [4] I. Oketch, “Commutation Failure Prevention for HVDC”, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden 2016.
- [5] EPE, “Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste, Elo de Corrente Contínua +/- 800 kV Xingu – Terminal Rio”, Detalhamento da Alternativa de Referência: Relatório R2, nº EPE-RE-136/2014-rev0, 30/10/2014.

- [6] CIGRE Working Group B4.41. Systems with Multiple DC Infeed. Disponível em: <https://e-cigre.org/publication/364-systems-with-multiple-dc-infeed> (acessado em 13/12/2021).
- [7] CEPEL, "Investigação dos efeitos do DC Multi-Infeed no SIN - Cálculo dos índices preditivos de desempenho e seleção dos casos críticos, Relatório Técnico DRE-15024/2017," ed. 2017.
- [8] S.R.Lígia, "Automatic Computing of Multi-Infeed Predictive Indexes Providing Situational Awareness in Real-Time Operation of Hybrid AC-HVDC Systems", Cigre e-Session August, 28th, 2020.
- [9] I.N.da Silva, D.H. Spatti, R.A. Flauzino, "Redes Neurais Artificiais Para Engenharia e Ciências Aplicadas", Fundamentos Teóricos e Práticos, 2 Edição.
- [10] R.O.Fernandes, D.Dotta, "Comparação do Comportamento da Função Energia de Lyapunov Através de PMU e o Software Organon com Casos Reais de Perturbações no SIN", XVIII Eriac, 19 a 23 de maio de 2019.
- [11] J. H. Chow, A. Chakraborty, M. Arcak, B. Bhargava, and A. Salazar, "Synchronized phasor data-based energy function analysis of dominant power transfer paths in large power systems" IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 2, pp. 727-734, 2007.
- [12] Ferramenta Weka "Waikato Environment for Knowledge Analysis". Disponível em <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> (acessado em 13/12/2021).

DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael de Oliveira Fernandes, engenheiro eletricitista graduado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2001, com mestrado na área de Estabilidade Transitória com PMU pela Unicamp. Atualmente é doutorando na Unicamp na área de Transitórios Eletromagnéticos. É Engenheiro de Proteção e Controle na Argo Energia. Membro Individual do Cigré-B5 e Membro Correspondente do WGB5.62, WGC2.18 e WGC4.62 do Cigre. É Coordenador no Brasil do Cobei junto à IEC – CE03.TC95-MT04 (Funções de Proteção e Guias de Aplicação).

(2) Maria Cristina Dias Tavares, possui graduação (1984) e mestrado (1991) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1984), e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1998). Atualmente é Professora MS5 (Livre Docente) na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP. Membro Senior no IEEE. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em transmissão da energia elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: estudos de transitórios eletromagnéticos, linha de transmissão, modelagem de arco secundário, proteção adaptativa monopolar e tripolar, simuladores ATP, PSCAD e RTDS, e transmissão a muito longa distância, especificamente transmissão em meio comprimento de onda.

(3) Javier Arturo Santiago Ortega é graduado em Engenharia Elétrica na Universidade Nacional de Engenharia de Lima-Perú no 2001, recebeu o grau de Mestre (2015) e Doutor (2019) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente trabalha na empresa VASMOL na área de Fiscalização de Sistemas de Transmissão para a Agência Osinergmin em Lima-Perú. As áreas de interesse em pesquisa são análise de transitorios eletromagneticos, sistemas de proteção e confiabilidade de sistemas de transmissão de energia.