

## GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

### MODELAGEM DE PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA COMO RETAGUARDA E SIMULAÇÃO ELETROMECAÂNICA EM LOTE PARA AVALIAÇÃO DO RISCO DE DESLIGAMENTOS EM CASCATA.

JONAS ROBERTO PESENTE(1); ESTEBAN FEDERICO VARGAS CORREA(1);  
PAULO HENRIQUE GALASSI(1); JHONATAN ANDRADE DOS SANTOS(1); PABLO E. VERA AGÜERO (1);  
ITAIPU BINACIONAL(1);

#### RESUMO

Este estudo propõe modelos de funções de distância fundamentados no levantamento dos dados dos relés dos fabricantes, considerando, por exemplo, a própria nomenclatura de ajuste dos fabricantes de forma que o trânsito da informação entre as equipes de estudos de proteção e de estudos de planejamento seja fluída. Estes modelos também foram expressos em um formato genérico que permite ao usuário entrar somente com os parâmetros de ajuste da função em específico, facilitando a representação para um número considerável de linhas de transmissão de interesse. Tais modelos de proteção foram incorporados à base de simulações dos estudos de planejamento da operação interligada de Itaipu 50Hz aos sistemas elétricos paraguaio e argentino, prevista para 2021, considerando as proteções da interligação Itaipu-ANDE (*Administracion Nacional De Eletricidad*) e também de forma genérica para um conjunto de linhas de transmissão principais da rede elétrica da ANDE. Nestes estudos foram simuladas baterias extensivas de casos, combinando distintas perturbações e diferentes condições de regime permanente totalizando 26.880 simulações, das quais se produziu um conjunto significativo de resultados, sob os quais se pode avaliar o risco existente de atuações das funções de retaguarda em distância do sistema elétrico paraguaio frente aos principais eventos que podem afetar a operação do sistema interligado. Desta forma, este informe descreve os modelos desenvolvidos, assim como os benefícios da sua utilização e os resultados principais de sua aplicação nos estudos de planejamento da operação considerando Itaipu 50Hz sincronizada aos sistemas elétricos paraguaio e argentino.

#### PALAVRAS-CHAVE

Proteção de Distância, Desligamentos em cascata.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A ocorrência de desligamentos sequenciais de linhas de transmissão é um dos principais vetores da propagação de grandes perturbações pela rede elétrica [1], [2], e também é frequentemente verificada em distúrbios com desligamentos de carga, como apurado na análise post-mortem, por exemplo, nos blecautes norte-americanos de 1965 [3], 1996 [4] e 2003 [5] e nos grandes desligamentos brasileiros de 2009 [6] e 2018 [7].

Sobretudo, estudos do *North American Electric Reliability Council* (NERC) produziram resultados indicando que cerca de setenta por cento das grandes perturbações envolvem a operação de relés, não necessariamente no evento inicial, mas contribuindo com o efeito de desligamentos em cascata no sistema de transmissão [8].

Dentre os relés que atuaram incorretamente ou de forma não esperada, destacam-se sua atuação por funções de proteção de distância, que ocorrem durante a degradação das condições operacionais do sistema, muitas vezes transitoriamente, em decorrência do evento inicial, que promove tensões baixas e elevação das correntes nas linhas de transmissão [9].

Em geral, o ajuste da proteção de distância é efetuado considerando condições estáticas através de estudos de curto-circuito, não tomando em conta a dinâmica dos sistemas elétricos após perturbações de grande magnitude. Este cenário implica na carência da determinação de riscos eventuais de atuações de proteções de distância por sobrealcance durante oscilações de potência, especialmente em perturbações de grande magnitude como citado nas condições dos casos acima.

Além disso, tal operação de relés, na maioria dos estudos de planejamento de sistemas elétricos atuais, considera simulações dinâmicas apenas parcialmente. E mesmo assim, com ênfase nos elementos principais como linhas de interligação entre subsistemas e, frequentemente realizada também através de modelos genéricos de funções de distância. Tal cenário motiva, atualmente, ao menos um grupo de trabalho do CIGRE (WG-72) e uma força tarefa do IEEE, que considera expandir a representação dos modelos de relés de distância para simulações dinâmicas, no intuito de contribuir com a possibilidade de efetuar avaliações de risco de atuações indesejadas e eventos em cascata na etapa do planejamento da operação dos sistemas elétricos. Dentre os estudos desenvolvidos, cita-se, por exemplo, a potencialidade do detalhamento da representação de simulação dinâmica empregando o método nó-disjuntor [10].

Neste contexto, este estudo propõe modelos de funções de distância para Anatem fundamentados no levantamento dos dados dos relés dos fabricantes, que foram incorporados à base de simulações dos estudos de planejamento da operação interligada de Itaipu 50Hz aos sistemas elétricos paraguaio e argentino, prevista para 2021, considerando as proteções da interligação Itaipu-ANDE e também de forma genérica para um conjunto de linhas de transmissão principais da rede elétrica da ANDE.

## 2.0 - MODELAGEM DE PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA

O escopo deste trabalho considera avaliar as proteções de distância em segunda e quarta zonas e os esquemas de teleproteção que empregam função de distância, considerando os laços fase-fase da proteção referente às linhas de interligação entre Itaipu 50Hz e a ANDE.

A Figura 1 ilustra o módulo da impedância aparente ao laço fase-terra ( $Z_a$ ), laço fase-fase ( $Z_{ab}$ ) e de sequência positiva ( $Z_{pos}$ ) calculadas de uma simulação de falta monofásica na fase “a” eliminada em 100ms pela abertura da linha em falta, executada em RTDS para o sistema interligado SIN-PY.

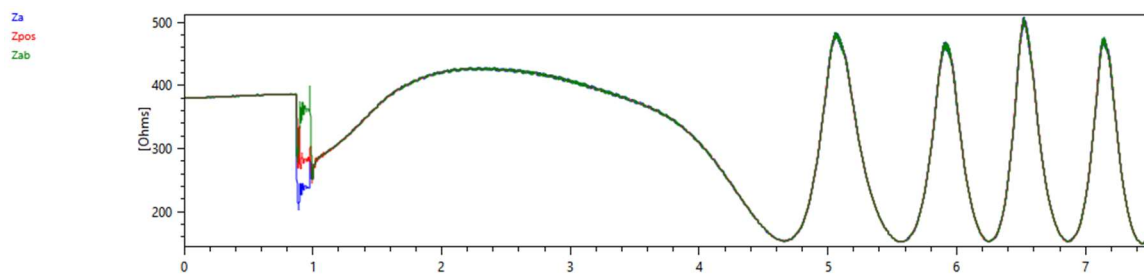


Figura 1 – Impedância aparente calculada para falta monofásica seguida de abertura de LT.

Percebe-se da Figura 1 que as impedâncias diferem entre si somente durante a permanência do curto-circuito, quando o sistema está desbalanceado, porém são idênticas durante oscilações de potência sem desbalanço entre as fases. Assim, a impedância aparente de sequência positiva resolvida pelo Anatem pode ser usada diretamente para avaliação dos laços fase-fase e fase-terra das proteções de distância. Porém embora iguais, em testes de RTDS de dois fabricantes, se verificou que os laços fase-fase das proteções permanecem bloqueados durante a existência de desbalanço de correntes no sistema elétrico, opondo-se aos laços fase-terra, que são habilitados exclusivamente durante a existência de desbalanço e são bloqueados quando o sistema encontra equilibrado.

Esse bloqueio é efetuado pelos seletores de fase. Os laços fase-terra são habilitados pela existência de corrente de sequência zero (3I0) e bloqueados na sua ausência. De forma análoga, os laços fase-fase são bloqueados na existência de corrente residual (3I0) e habilitados em sua ausência. Desta forma, foram modelados os laços fase-fase da proteção de distância, que permanecem ativos durante oscilações de potência. Tomando em conta essas informações, é ilustrada a proteções de impedância da linha de interligação de Itaipu com a ANDE LI 500kV MD-VHA 1, temporização de 400ms, fabricante F1.

Segundo o manual do fabricante F1, os IED possuem característica da proteção de distância como apresentado na Figura 2, onde também está apresentado o seletor de fase e o *load encroachment*, que também pode restringir a operação das zonas de proteção de distância.

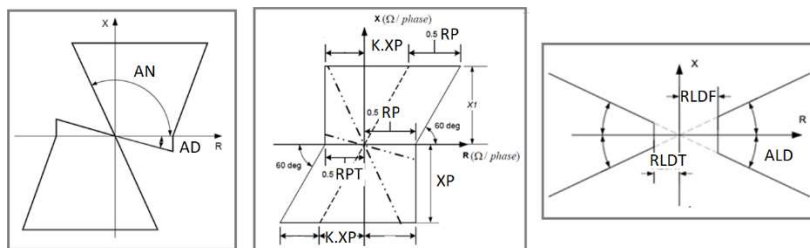


Figura 2 – Característica das zonas da proteção de distância, à frente e reversa e do seletor do laço fase-fase.

Estas características correspondem a polígonos que podem ser modelados por retas definidas entre seus vértices. Os parâmetros destas características para a zona 2 da função de distância, laço fase-fase, da proteção da LI 500kV MD-VHA 1 no terminal da SE-MD são apresentados na Tabela 1 ( $RP = RL + RF$ ,  $RPT = RF$ ), e que definem os vértices das características apresentadas na Figura 2, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros do laço fase-fase, proteção de distância em segunda zona, no terminal da SE-MD da linha LI 500kV MD-VHA 1

Parâmetros LI 500kV MD-VHA 1		Descrição
$XL = XP$	104,09 $\Omega$	Alcance reativo de sequência positiva à frente
RL	9,03 $\Omega$	Alcance resistivo de sequência positiva à frente
RF	70 $\Omega$	Resistência de falta, laço fase-fase
AD	15°	Ângulo do separador em segundo quadrante
AN	160°	Ângulo do separador em quarto quadrante
RF/2	35 $\Omega$	Parâmetro adicional referente ao seletor fase-fase

Tabela 2 – Pontos referentes aos vértices da segunda zona da proteção de distância da LI 500kV MD-VHA 1.

Loop fase-fase LI 500kV MD-VHA 1		
Pontos	R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]
P1	0,0	0,0
P2	35,0	-9,4
P3	35,0	0,0
P4	44,0	104,1
P5	-35,0	104,1
P6	-35,0	12,7
P7	0,0	0,0

As condições lógicas para simulação podem ser construídas das equações de reta " $X = m.R + b$ " que definem sua característica pelos acrônimos R1, R2 e R3 ilustrados na Figura 3, que têm os parâmetros apresentados na Tabela 3. Deve-se perceber que os demais condicionais podem ser implementados sem a inclinação e reta (e.g.  $X \leq X_{condição}$  e/ou  $R \leq R_{condição}$ ). Os parâmetros do *Load Encroachment*, caracterizado, para efeito de lógicas, em oito pontos (P1 a P8, como apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), duas retas (YE1 e YE2) e 8 regiões condicionais (C1 a C8), para a proteção de distância da LI 500kV MD-VHA 1 estão de acordo com a Tabela 4.

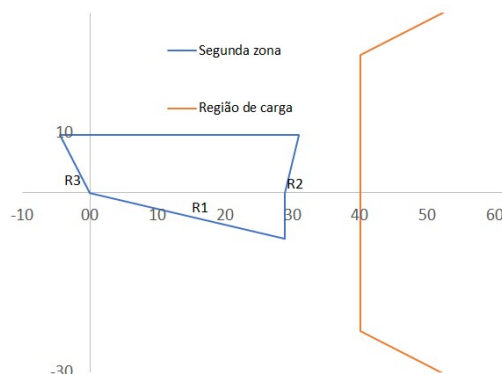


Figura 3 – Característica da segunda zona e do *Load Encroachment* da proteção da linha LI 500kV MD-VHA 1.

Tabela 3 – Coeficientes de reta definidos pelos pontos da Tabela 2.

Reta	m	B
R1	-0,36397	0
R2	-0,26795	0
R3	11,5	-403

Tabela 4 – Parametrização do *Load Encroachment* para a proteção de distância da linha.

PhaseSelection (PDIS,21) / <i>Load Encroachment</i>		Descrição
RLDF	126 [ $\Omega$ ]	Alcance resistivo à frente da região de carga
RLDT	126 [ $\Omega$ ]	Alcance resistivo reverso da região de carga
ALD	32°	Ângulo de carga que define a região de carga

A nomenclatura do modelo desenvolvido para Anatem mantém a parametrização com mesma nomenclatura do fabricante e também apresenta parâmetros internos com os nomes adotados nas respectivas tabelas. À exemplo do modelo descrito, as proteções dos demais fabricantes aplicadas às demais linhas foram também desenvolvidos e testados como discutido na próxima seção.

### 3.0 - VALIDAÇÃO DAS PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA MODELADAS

As validações dos modelos apresentados anteriormente foram realizadas em duas etapas - inicialmente empregando simulações sem oscilação de potência e posteriormente considerando a dinâmica do sistema. Os resultados obtidos em simulação foram comparados com a atuação esperada com o verificado da simulação.

#### a) Proteção 21Z2 da LI 500kV-MD-VHA 1

O resultados obtidos do teste estático é ilustrado na Tabela 5 e na Figura 4, onde  $R_{ma}$  e  $X_{ma}$  são a parte resistiva e reativa da impedância aparente medida pela proteção (valores primários), sem abertura de nenhum terminal da linha em falta. A condição ST significa que houve *start* da zona 2 e AT significa que e houve a *atuação* (após temporização).

Tabela 5 – Resultados dos testes do modelo de proteção.

$R_{ma} \Omega$	$X_{ma} \Omega$	Cor	Condição
207	37	-	
52	39	Azul	-
70,0	21,0	Laranja	-
1,5	51	Cinza	ST, AT
-23,8	16,3	Azul claro	ST, AT
-49,0	88,0	Verde	-

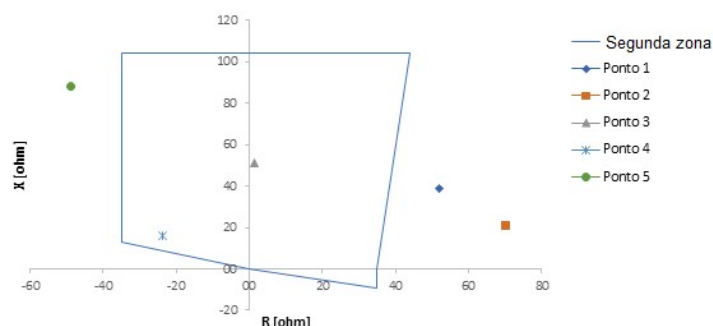


Figura 4 – Pontos estáticos testados nesta proteção.

Os resultados dos testes de modelo considerando a dinâmica do sistema foram efetuados sob um sistema equivalente dinâmico [12], e comparados aos resultados esperados das trajetórias elétricas analisadas sobre o modelo detalhado empregado Matlab.

Os resultados obtidos demonstram que os modelos implementados em Anatem responderam como desejado. A Figura 5 ilustra o resultado de uma simulação dinâmica mostrando à esquerda a análise efetuada em Matlab e à direita a saída indicada do modelo para a proteção desenvolvido.

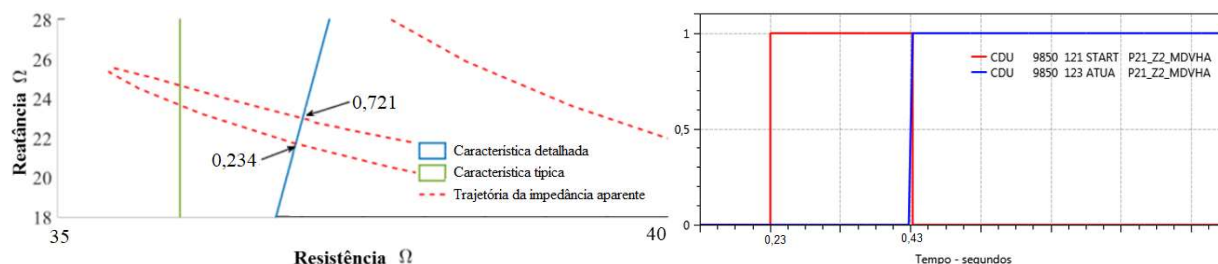


Figura 5 – Análise da cadeia de atuações de simulações dinâmicas comparadas em Matlab e Anatem.

#### 4.0 - CENÁRIOS CONSIDERADOS NA ANÁLISE DE RISCO

O estudo foi realizado sobre a base de dados de simulação dos sistemas paraguaio (SIN-PY) e argentino (SADI) interligados, considerando o sistema brasileiro representado por um equivalente dinâmico, com objeto as linhas de interligação LI 220kV MD-ACY 1 e 2, LI 220kV MD-IRY, LI 220kV MD-PIH e LI 500kV MD-VHA 1 no terminal da SE-MD. Foram considerados casos de risco aqueles onde há atuação de proteção em segunda zona antes da atuação de qualquer dos esquemas previstos para a operação interligada.

Os cenários consideram a operação de cinco a dez unidades geradoras sincronizadas em Itaipu 50Hz, gerando 500MW a 750MW, intercâmbio SIN-PY-SADI alto e baixo, e cargas máxima e mínima em ambos os sistemas. Para geração dos casos e realização das simulações foi empregada uma ferramenta de simulação em lote desenvolvida em Itaipu e apresentada em [11].

As simulações realizadas consideraram 18 perturbações e a representação do ECCANDE (Esquema de Controle de Contingências na ANDE, principal esquema para garantia da segurança operacional do sistema interligado), sua retaguarda por proteções contra perda de sincronismo, esquemas de corte de carga por subfrequência, subtensão e sobrecarga de transformadores, esquema de separação controlada entre o sistema paraguaio e o Elo de CC, e proteções de isolamento forçada de Itaipu dos sistemas paraguaio e do Elo de CC.

O método empregado para a avaliação pode ser sintetizado na leitura dos arquivos gráficos da base de dados, reamostragem eliminando tempos iguais gerados na simulação *timestep*, interpolação eliminação de passos variáveis, avaliação do tempo de permanência dentro da segunda zona, leitura dos tempos de acionamento dos esquemas nas tabelas geradas na simulação, e avaliação se a proteção atuou antes de todos os esquemas previstos.

#### 5.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Das simulações realizadas foram verificados os seguintes casos em que há risco de atuação da proteção de impedância em segunda zona das linhas de interligação no terminal de Itaipu, antes que ocorra a atuação de qualquer dos esquemas previstos de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Síntese dos resultados obtidos.

Equipamento	Número de atuações (% casos)	Atuações antes dos esquemas
LI 500kV MD-VHA 1 (sem <i>load encroachment</i> )	24 (0,09%)	0
LI 500kV MD-VHA 1 - Terminal ES-VHA	0	-
LI 220kV MD-IRY (com <i>load encroachment</i> )	0	-
LI 220kV MD-IRY - Terminal ES-IRY	0	-
LI 220kV MD-PIH (com <i>load encroachment</i> )	0	-
LI 220kV MD-PIH - Terminal ES-PIH	0	-
LI 220kV MD-ACY 1 e 2 (sem <i>load encroachment</i> )	0	-
LI 220kV MD-ACY 1 e 2 - Terminal ES-ACY	0	-
LI 220kV MD-ACY 1 e 2 Zona 4 (sem <i>load encroachment</i> )	9 (0,03%)	0
LI 220kV MD-ACY 1 e 2 Zona 4 - Terminal ES-ACY	9 (0,03%)	0

Da Tabela 6 se pode perceber que não existe risco significativo de que haja atuações de proteção de distância das linhas de interligação. Sobretudo, enfatiza-se que quando ocorrem, se trata de casos instáveis em que os esquemas atuam previamente.

Dentre os casos apresentados na Tabela 6 ilustra-se, por exemplo, um caso de atuação da segunda zona da proteção de distância da LI 500kV MD-VHA 1, simulando-se curto-circuito na SE-IPU 50Hz e desligamento de duas unidades geradoras, considerando 9 unidades sincronizadas, 750MW por unidade, 5 conversores no elo de CC, carga da ANDE igual a 3.829MW, intercâmbio Yacyretá-Ayolas igual a 1.321MW e carga NOCHE na Argentina.

Neste caso houve a indicação de atuação da segunda zona da proteção da LI 500kV MD-VHA 1 em 3,64s (entrada na zona 2 em 2,34s). A trajetória da impedância comparada aos tempos de entrada e atuação zona de impedância (referentes ao início da simulação) é ilustrada na Figura 6.

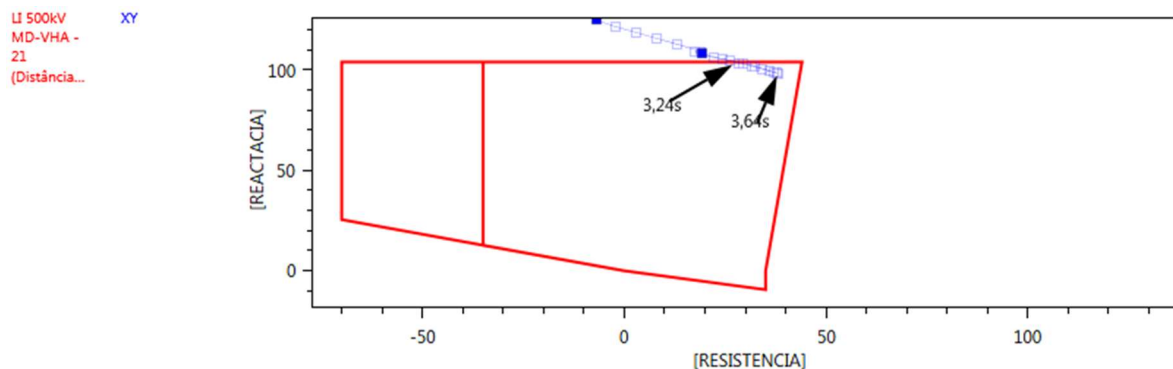


Figura 6 – Trajetória da impedância aparente à proteção comparada à zona de atuação.

A comparação dos tempos de atuação da proteção e dos esquemas é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Tempo de atuação da proteção e dos esquemas.

Proteção/Esquema	Tempo
Z2 LI 500kV MD-VHA 1	3,64 s
Lógica 1 (externa)	2,22
PPS YAC-AYO	6,55
ERIPU50	6,50

Onde:

- Lógica 1 (externa) é o esquema de abertura da interligação ANDE com o SADI por abertura angular medido entre as subestações SE-MD e ES-AYO;
- PPS YAC-AYO é a PPS de retaguarda do ECCANDE nas LT 500kV AYO-YAC 1 e 2;
- ERIPU50 é a PPS de retaguarda do ECCANDE com medidas na SE-MD.

A Figura 7 ilustra a geração de Itaipu 50Hz assim como os tempos da atuação da lógica de ângulo e da segunda zona da LI 500kV MD-VHA 1, e a Figura 8 ilustra as tensões do sistema elétrico para o sistema. Ambas as figuras mostram que o sistema está colapsando e a atuação da proteção ocorre em uma condição degradada do sistema.

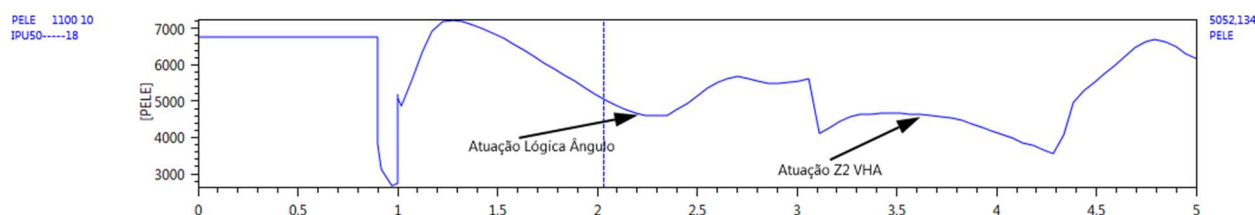


Figura 7 – Ilustração do tempo de atuação da proteção e dos esquemas com relação à dinâmica do sistema.

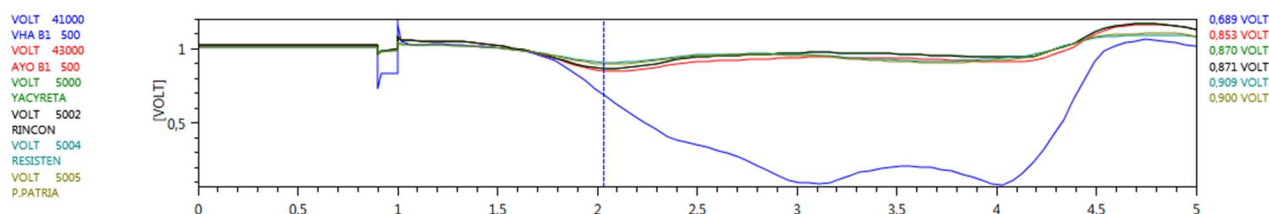


Figura 8 – Ilustração do tempo de atuação da proteção e dos esquemas com relação às tensões do sistema.

De forma análoga à avaliação da proteção de distância das linhas da interligação Itaipu-ANDE, foram também estimadas atuações de proteções de retaguarda em distância das linhas do sistema da ANDE. Esta avaliação teve por finalidade avaliar conceitualmente o risco de atuações de proteção em cascata, conduzindo pelo enfraquecimento gradual da rede, o sistema ao colapso. De forma geral, foram adotados os modelos desenvolvidos com sobrealcançe



de 120% com relação à impedância da linha protegida. As seguintes linhas foram consideradas nessa avaliação estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Linhas consideradas na avaliação de proteção de retaguarda da ANDE.

Linha	Linha
LT 220kV CYO-LIM	LT 220kV VHA-PSA 1
LT 220kV COV-GUA	LT 220kV SPA-AYO 1
LT 220kV LIM-LUQ-SLO	LT 220kV LAM-n1-PSA
LT 220kV GUA-LAV-SLO	LT 220kV GUA-SAN-PSA
LT 500kV AYO-VHA	LT 220kV COV-ELA-CAP-SLO
LT 500kV YAC-AYO C1	LT 220kV GUA-SJB-SPA
LT 220kV IRY-CYO	LT 220kV GUA-VAP-SPA
LT 220kV ACY-COV 1	LT 220kV PIH-IRY
LT 220kV COV-CYO	LT 220kV VHA-PBO 1
LT 220kV VHA-LIM	LT 220kV GUA-LAM

Referente a esta análise foram identificados 98 casos de atuação das proteções do sistema antes da atuação dos esquemas. A análise destes casos, no entanto, mostrou que o risco estimado da atuação das proteções de linha no sistema de transmissão da ANDE ocorre em condições já bastante degradadas do sistema, na qual o sistema seria instável sem a atuação dos esquemas de controle e emergência. A análise indica que, quando houver atuação de proteções de distância anteriormente à atuação dos esquemas, o sistema remanescente após a separação dos sistemas SS1 e SS2 pode ter sua rede de transmissão deteriorada.

Não obstante, embora numa condição com linhas de transmissão desligadas, nas análises realizadas não se perceberam desligamentos em cascata e colapsos promovidos pela atuação de proteção de retaguarda. Dentre os casos analisados ilustra-se, por exemplo, um caso de atuação da segunda zona da proteção de distância da LT 220kV GUA-SJB-PSA, simulando-se o bloqueio simultâneo de dois bipólos, considerando 5 unidades sincronizadas, 700MW por unidade, 5 conversores no elo de CC, carga da ANDE igual à 1.463MW, intercâmbio Yacretá-Ayolas igual à 724MW e carga NOCHE na Argentina.

Neste caso houve a indicação de atuação da segunda zona da proteção da LT 220kV GUA-SJB-PSA em 1,71s (entrada na zona 2 em 1,31s), seguida de atuação da Lógica externa 1 (lógica de ângulo), à 1,77s. O efeito deste desligamento é uma acomodação ligeiramente mais acentuada das grandezas no caso considerando o desligamento da linha, ilustrado em azul na Figura 9 pela tensão na ES-SPA, quando comparado ao caso sem o desligamento da linha, ilustrado em vermelho na Figura 9.

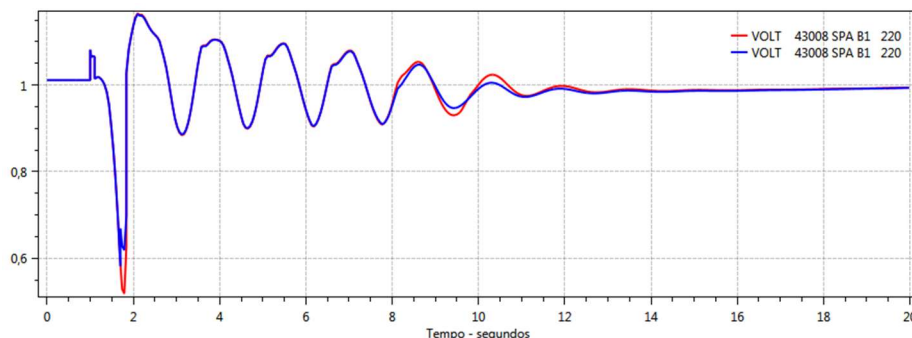


Figura 9 – Tensão na ES-SPA em um caso em que há atuação do ECCANDE, simulando ou omitindo a simulação da abertura da LT 220kV GUA-SJB-PSA.

Assim, tomando em consideração os modelos desenvolvidos, as simulações e análises realizadas, conclui-se que o risco de desligamentos em cascata promovidos por atuações indesejadas de proteções de retaguarda de distância no sistema da ANDE é baixo. Estas atuações ocorreriam em casos severos onde hoje é prevista atuação do ECCANDE e a separação dos sistemas, estabilizando os sistemas remanescentes e acomodando suas grandezas eletromecânicas.

Relativo ao risco de eventos em cascata, embora relatado que o risco de atuação de proteções não seja significativo devido ao bom desempenho dos esquemas planejados, é recorrente em eventos de grandes proporções o relato de falhas de esquemas, como no blecaute argentino de 16.6.2019 no blecaute norte-nordeste 21.3.2018, seguidos por cascatas de desligamentos de linhas pela atuação da proteção de distância. Assim, investigaram-se os equipamentos mais frequentes onde os desligamentos em retaguarda se iniciam e onde eles mais comumente se propagam.

Desta análise, se percebeu que em casos limítrofes, tais como aqueles produzidos em condições de alto carregamento do sistema e/ou esgotamento de reserva, podem ocorrer afundamentos de tensão e sensibilização de proteções de distância. Por exemplo, no caso de desligamento da LI 500kV MD-VHA 1 com fluxo próximo de zero, considerando 10 unidades sincronizadas, 8 conversores no elo de CC, carga da ANDE igual à 1494MW, intercâmbio Yacyretá-Ayolas igual à 1322MW e carga VALLE na Argentina, indica atuação das linhas LT 220kV CYO-LIM e LT 220kV COV-GUA de forma sequencial, em primeira zona, deteriorando o desempenho do sistema, como ilustrado na Figura 10 (em vermelho no caso original e em azul no caso considerando as atuações da proteção).

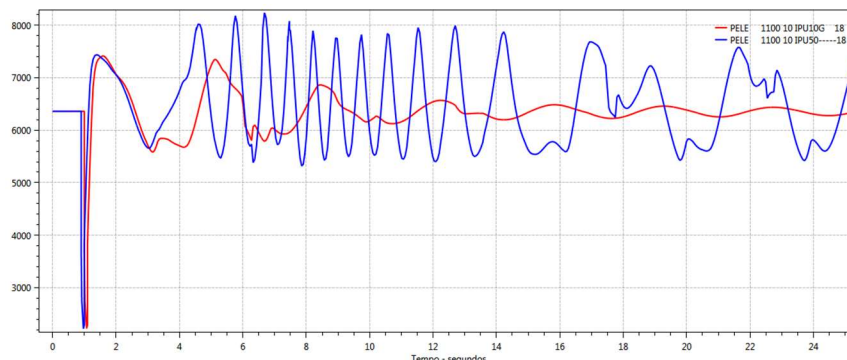


Figura 10 – Geração de Itaipu em caso de aberturas de linhas de transmissão em cascata.

De forma análoga, um caso de desligamento de duas unidades de Itaipu, considerando 9 unidades sincronizadas, 8 conversores no elo de CC, carga da ANDE igual à 2033MW, intercâmbio Yacyretá-Ayolas igual à 1322MW e carga NOCHE na Argentina, indica a possibilidade de atuação da proteção da LI 500kV MD-VHA 1, o que implicaria na atuação do ECCANDE.

Nos casos analisados, as simulações considerando a atuação dos esquemas e das proteções indicam que o ECCANDE atuará e garantirá o bom desempenho do sistema. As simulações realizadas ilustram também que existe certa regularidade das linhas que apresentam no risco de atuação das proteções de acordo com o evento inicial simulado. Percebeu-se, desta avaliação e se pode afirmar que, como esperado, os eventos dinâmicos tendem a apresentar início no centro de carga do sistema da ANDE e se propagar ao restante da rede.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Neste informe foi apresentado o desenvolvimento de modelos detalhados de proteção orientados aos dispositivos do fabricante, melhorando a precisão da estimativa por simulação de potencial atuação, facilitando a implementação de modelos realistas na simulação e provendo um espaço de diálogo entre as equipes de proteção e de estudos.

O estudo efetuado mostrou que o risco de atuação das proteções de impedância em segunda zona das linhas de interligação de Itaipu com a ANDE é baixo para as linhas de interligação Itaipu-ANDE, frente a perturbações que causem oscilações de potência possíveis após a interligação dos sistemas elétricos paraguaio e argentino.

De forma análoga, os modelos desenvolvidos foram utilizados para avaliar possíveis riscos de atuação na rede elétrica da ANDE usando a mesma base de estudos da interligação. Os casos pontuais de atuação verificados em simulações eletromecânicas estão associados à degradação severa do desempenho dinâmico e só implicariam em uma cascata em caso de falha de uma ou mais lógicas do ECCANDE frente a perturbações.

Assim, embora seja importante o melhoramento dos modelos da proteção para incorporação na base de modelos de simulação eletromecânica do sistema interligado, das análises efetuadas não são verificados riscos iminentes de atuação de cascata de desligamentos por proteção de retaguarda em distância para as principais perturbações vislumbradas.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Song, J., Cotilla-Sanchez, E., Ghanavati, G., & Hines, P. D. (2015). Dynamic modeling of cascading failure in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(3), 2085-2095.
- (2) Vaiman, M., Bell, K., Chen, Y., Chowdhury, B., Dobson, I., Hines, P., Zhang, P. (2012). Risk assessment of cascading outages: Methodologies and challenges. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(2), 631.
- (3) Gregory S. Vassell, Northeast Blackout of 1965, *Power Engineering Review*, IEEE, Volume 11, Issue 1, January 1991 Page(s):4



- (4) Andersson, G., Donalek, P., Farmer, R., Hatziaargyriou, N., Kamwa, I., Kundur, P. Vittal, V. (2005). Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance. *IEEE transactions on Power Systems*, 20(4), 1922-1928..
- (5) Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations, U.S.-Canada Power System Outage Task Force April 2004.
- (6) ONS. Relatório de Análise da Perturbação do dia 10/11/2009 às 22h13min envolvendo o desligamento dos três circuitos da LT 765kV Itaberá-Ivaiporã, 2009.
- (7) ONS. Relatório de Análise da Perturbação do dia 21/03/2018, 15h48min, envolvendo bipólo de Belo Monte, 2018.
- (8) Mozina, C. J. Coordinating generator protection with transmission protection and generator control NERC standards and pending requirements, in Protective Relay Engineers, 63rd Annual Conference for. IEEE, 2010.
- (9) Abdi-Khorsand, Mojdeh, and Vijay Vittal. Identification of critical protection functions for transient stability studies. *IEEE Transactions on Power Systems* 33.3 (2017): 2940-2948.
- (10) Taranto, Glauco N., Tatiana Assis, and Jose Mauro Teixeira Marinho. "Integrating Relay Models in Three-Phase RMS Dynamic Simulation." *IEEE Transactions on Power Systems* (2021).
- (11) Santos, J. A. Dos, Szostak, A. J. M., Tochetto, A. P., Oliveira, R. A. De. Revisão do Esquema de Separação Automática de Unidades Geradoras para a ANDE (ESAUPA), realizando simulações sequenciais de forma automática e adaptativa, por meio dos aplicativos ANAREDE e ANATEM. XXV SNPTEE, Belo Horizonte, 2019.
- (12) Galassi, P. H., Pesente, J. P., Santos, L., Mezger, A. J., Santos, F., Justino, G., Ramos, R. A., Almeida, A. Equivalente Dinâmico do Sistema Interligado Paraguaio-Argentino-Uruguiaio para Teste de Funcionalidades de Proteções e Controles no RTDS. XXVI SNPTEE, Rio de Janeiro, 2022.

#### 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Jonas Pesente é colaborador da divisão de Estudos Elétricos/Normas de Itaipu Binacional, e doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina (2018).