



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

### SISTEMAS ESPECIAIS DE PROTEÇÃO NO CONTEXTO DA OPERAÇÃO DE ITAIPU 50HZ ASSOCIADA AO SISTEMA ELÉTRICO INTERLIGADO PARAGUAIO-ARGENTINO-URUGUAIO

**JHONATAN ANDRADE DOS SANTOS(1); PAULO HENRIQUE GALASSI(1); ROBSON ALMIR DE OLIVEIRA(1); ALFREDO JAVIER MEZGER SZOSTAK(1); JONAS ROBERTO PESENTE(1); HILTON CARLOS MIRANDA LESSA(1); MANUEL LEONARDO SOSA RIOS(1); ANDRE PAGANI TOCHETTO(1); ESTEBAN FEDERICO VARGAS CORREA(1)  
ITAIPU (1)**

#### RESUMO

Este trabalho apresenta a análise do desempenho dinâmico da operação de Itaipu 50Hz associado ao sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio e dos ajustes dos sistemas especiais de proteção projetados, considerando um conjunto extenso de simulações em Anatem, com mais de 26 mil casos com diferentes cenários de fluxo de potência e perturbações. Este volume de dados foi avaliado com o auxílio de programação em Python e ferramentas de *Big Data*, a fim de permitir a definição de ajustes, bem como a identificação de regiões de operação com desempenho dinâmico adequado tanto do sistema elétrico em si quanto das lógicas projetadas.

#### PALAVRAS-CHAVE

Sistemas Especiais de Proteção, Análise de Desempenho Dinâmico, Interligação Internacional de Sistemas, Simulação em Lote, *Big Data*.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

O crescimento das interligações de sistemas de energia elétrica que ultrapassam as fronteiras nacionais tem sido uma tendência mundial, oferecendo diversas vantagens técnicas e econômicas aos países envolvidos.

Neste sentido, a expansão da malha de transmissão do Sistema Interligado Nacional Paraguai (SIN-PY), com a construção de linhas de transmissão em 500kV, tornou possível a operação interligada do SIN-PY e de Itaipu 50Hz com os sistemas elétricos argentino (SADI – Sistema Argentino de Interconexão) e uruguaio (SIN-UY). Esta operação configura um sistema interligado composto por quatro países, quando considerado o Elo de Corrente Contínua (Elo CC) de Furnas, que conecta os sistemas em 50Hz ao Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN-BR) em 60Hz.

A viabilidade técnica da operação do sistema interligado paraguaio-argentino-uruguaio depende do desenvolvimento de estudos elétricos específicos de regime permanente e de regime dinâmico, de forma a garantir a estabilidade e a segurança operacional. Destes estudos foi identificado o risco da perda de sincronismo entre Itaipu 50Hz e os geradores do SADI e SIN-UY. Como a inércia de Itaipu 50Hz é menor do que a inércia conjunta do SADI e SIN-UY, os efeitos da perda de sincronismo são mais perceptíveis, e presumivelmente mais danosos em Itaipu 50Hz.

Neste sentido, no intuito de mitigar os efeitos da perda de sincronismo, foram implantados sistemas especiais de proteção (SEPs) que visam separar os sistemas associados por meio de lógicas de estados de equipamentos e baseadas em medição fasorial sincronizada.

Dentre as lógicas implementadas, destacam-se pela metodologia de ajuste empregada: a lógica de subfrequência, a lógica de diferença angular e a lógica de fluxo reverso.

Para o ajuste das lógicas dos SEPs, bem como para a análise do desempenho dinâmico da operação de Itaipu 50Hz associada ao sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio, foi elaborado um conjunto extenso de simulações em Anatem, com mais de 26 mil casos com diferentes cenários de fluxo de potência e perturbações.

Foi adotada a metodologia de simulação sequencial, automática e adaptativa apresentada em (4), a partir da qual foram realizados os devidos ajustes para o sistema elétrico analisado no presente trabalho e para a programação em Python.

O artigo está estruturado como segue: a Seção 2.0 apresenta o sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio e os cenários de análise, as seções 3.0, 4.0 e 5.0 apresentam a metodologia de ajuste para as lógicas de subfrequência, diferença angular e de fluxo reverso, respectivamente. Por fim, a Seção 6.0 apresenta as conclusões deste trabalho.

## 2.0 SISTEMA INTERLIGADO PARAGUAIO-ARGENTINO-URUGUAIO E CENÁRIOS DE ANÁLISE

Atualmente, o SIN-PY opera de forma segregada em dois subsistemas distintos: o primeiro subsistema (SS1) é composto por cerca de 88% da carga do Paraguai a qual é atendida pelas centrais hidrelétricas de Acaray e de Itaipu 50Hz, este subsistema está interligado ao Brasil através do Elo CC de Furnas; o segundo subsistema (SS2), por sua vez, conta com aproximadamente 12% da carga do Paraguai a qual é atendida pela central hidrelétrica de Yacyretá, central que também é responsável pela interligação com o sistema elétrico interligado argentino-uruguaio. A Figura 1 ilustra a distribuição de ambos os subsistemas do SIN-PY.

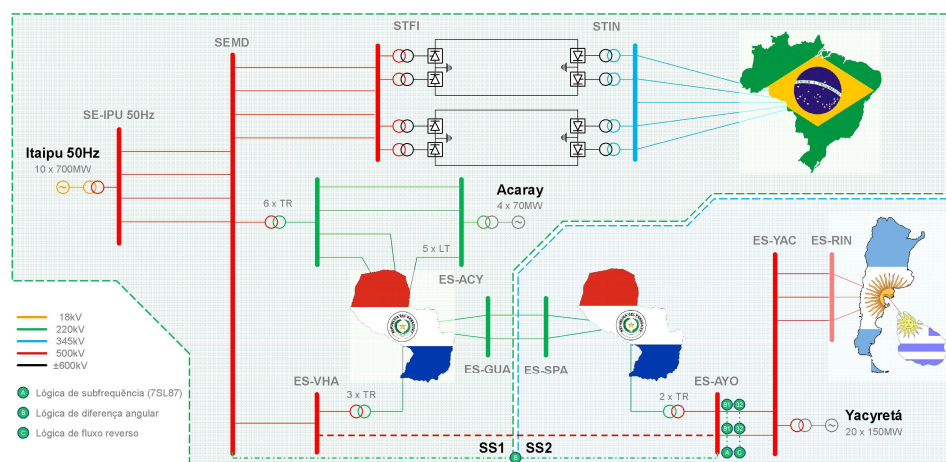


Figura 1- Sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio

Com a construção da linha de transmissão de 500kV entre as subestações de Ayolas (ES-AYO) e Villa Hayes (ES-VHA) tornou-se viável a operação interligada destes dois subsistemas do SIN-PY, conforme destacado através da linha pontilhada na Figura 1, formando assim o sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio.

Para fins de análise, no presente trabalho o sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio foi modelado nos aplicativos Anarede (1) e Anatem (2) contendo 292 geradores síncronos e 3.849 barras.

Em termos dos cenários de análise, foram avaliadas 64 condições de fluxo de potência variando a carga do SIN-PY (variando de 1.450MW até 3.850MW), a carga do SADI (dois patamares denominados NOCHE e VALLE com 27.450MW e 19.400MW, respectivamente) e o intercâmbio entre Yacyretá e o SIN-PY (variando de 0 até 1.350MW).

A partir destas 64 condições de fluxo de potência, foram ajustados casos derivados alterando-se o número de unidades (variando de 5 até 10 unidades) e a potência por unidade geradora sincronizada em Itaipu 50Hz (quatro patamares: 500MW, 600MW, 700MW e 750MW).

Com relação ao Elo CC de Furnas, foi adotada a relação entre a potência transmitida e o número de conversores em operação recomendado pelo ONS no Parecer ONS/DPL/PLC 0133/2020 (3) bem como a disposição dos conversores em operação.

Considerando todas as variáveis apresentadas acima, foram avaliados 1.536 casos de fluxo de potência. Para cada um destes casos de fluxo de potência foram analisadas 18 perturbações, contemplando o desligamento de linhas de transmissão do SIN-PY e do SADI/SIN-UY, de unidades geradoras de Itaipu 50Hz, Yacyretá e do SADI/SIN-UY e bloqueios de um polo, um bipolo e dois bipolos do Elo CC de Furnas. Ao todo foram simulados **26.680<sup>1</sup>** casos através do aplicativo Anatem.

Para a realização deste grande volume de simulações, bem como para os ajustes dos casos de fluxo de potência, foi empregada a metodologia para realização de simulações em lote de forma sequencial, automática e adaptativa apresentada em (4) e empregada em estudos já realizados para o ajuste de SEPs em Itaipu 50Hz (5).

<sup>1</sup> Uma das perturbações foi avaliada apenas para o patamar de carga NOCHE do SADI, por isso o conjunto de simulações não é de 27.648 casos

A metodologia simulações em lote apresentada em (4) e empregada em (5) é baseada na interação do MATLAB com os aplicativos Anarede e Anatem. No presente trabalho, o MATLAB foi substituído pela programação Python, utilizando as ferramentas de processamento paralelo disponíveis.

É importante destacar que o conjunto de 26.680 casos apenas puderam ser avaliadas em tempo hábil em função da utilização da referida metodologia. A realização desse volume de simulações diretamente por analistas seria impraticável, o que inevitavelmente exigiria simplificações do conjunto de condições analisadas para a execução da tarefa em tempo hábil.

### 3.0 METODOLOGIA DE AJUSTE DA LÓGICA DE SUBFREQUÊNCIA

Cada sistema associado ao sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio possui requisitos de desempenho de frequência distintos, dentre os quais se destaca o fato dos montantes de corte de carga para controle de frequência estarem distribuídos de maneiras distintas entre os sistemas associados. Os ajustes dos esquemas de alívio de carga para controle de frequência no SADI/SIN-UY e no SIN-PY são aqueles apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Ajuste dos esquemas de alívio de carga no SADI/SIN-UY e no SIN-PY

Estágio	SADI/SIN-UY		SIN-PY	
	<i>Pick-up</i> 81U [Hz]	Corte de Carga [%]	<i>Pick-up</i> 81U [Hz]	Corte de Carga [%]
1	49,00	3,5	49,00	13,0
2	48,90	4,0	48,55	13,0
3	48,80	6,0	48,15	4,0
4	48,70	6,5	47,70	2,0
5	48,60	9,0	47,30	2,0
6	48,50	8,0	46,85	2,0
7	48,40	5,0	46,45	1,0
8	-	-	46,00	3,0
Total	-	42,0	-	40,0

Conforme é possível observar na Tabela 1, embora o alívio de carga nos sistemas seja iniciado a partir do mesmo valor de frequência (49Hz), os montantes estão distribuídos de maneiras distintas. Além disso, a atuação do STAB50 (lógica do Elo CC de Furnas para controle de frequência do setor de 50Hz associado à Itaipu) pode contribuir para um alívio de carga desproporcional entre os sistemas interligados, dada a sua velocidade de atuação.

Neste contexto, a lógica de subfrequência foi projetada no sentido de separar os sistemas associados ao sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio, a fim de minimizar o risco de corte de carga na condição interligada.

A lógica de subfrequência foi implementada nos IED SIEMENS 7SL87 que realizam a proteção das duas linhas entre as subestações de Yacyretá (ES-YAC) e Ayolas (ES-AYO) em 500kV, conforme é possível observar na Figura 1. Na prática, caso uma condição de subfrequência provoque a desconexão destas linhas pela atuação da proteção de subfrequência, será promovida a abertura da interligação entre o SADI e o SIN-PY.

Para a avaliação do ajuste da lógica de subfrequência foram analisados apenas os casos nos quais a diferença angular entre a SE-MD e a ES-AYO permaneceu inferior a 150 graus durante toda a simulação.

Para valores de diferença angular entre a SE-MD e a ES-AYO superiores a 150 graus, entende-se que há risco de instabilidade angular no sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio. Na condição de instabilidade angular há uma grande dificuldade na avaliação da frequência do sistema e conseqüentemente na avaliação da lógica de subfrequência.

Do conjunto de 26.680 casos discutidos na Seção 2.0, em 20.841 casos (77,5%) a diferença angular permaneceu abaixo de 150 graus ao longo de toda a simulação. A análise da lógica de subfrequência se dará em torno deste conjunto 20.841 casos.

De forma complementar, foram registrados 6.039 casos (22,5%) nos quais a diferença angular superou o valor de 150 graus ao menos uma vez durante a simulação, os quais não serão analisados do ponto de vista da lógica de subfrequência.

Para a avaliação do ajuste da lógica de subfrequência foram considerados o tempo de disjuntor (100ms) e o tempo de processamento do IED SIEMENS 7SL87 (40ms) de modo que esta lógica atue antes da frequência no sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio alcance o valor de 49Hz, a partir do qual há risco de corte de carga na condição interligada.

As perturbações discutidas na Seção 2.0 foram segregadas em dois conjuntos de perturbações: aquelas nas quais não se deseja a atuação da lógica de subfrequência; e aquelas nas quais se deseja a atuação da lógica de subfrequência caso seja necessário.

O conjunto das perturbações para as quais não se deseja a atuação da lógica de subfrequência se referem a perturbações simples no sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio, com histórico de atuação em sua maioria. Para este conjunto de perturbações, aquela que atingiu o menor valor de frequência foi a desconexão de uma unidade geradora em Itaipu 50Hz, alcançando o valor de 49,37Hz. Portanto, para que a lógica de subfrequência não atue para este conjunto de perturbações, é necessário que o *pick-up* desta lógica seja ajustado com um valor inferior a 49,37Hz.

A Figura 2a apresenta análise do comportamento da frequência mínima para todos os casos avaliados em torno da desconexão de uma unidade geradora em Itaipu 50Hz. Este grande conjunto de dados foi analisado com o auxílio de programação em Python, processando todos os casos simulados em termos da menor frequência registrada e agregando os resultados para cada ponto de operação simulado.

Através da Figura 2a é possível observar ainda que a frequência tende a ser menor quanto maior o intercâmbio entre Yacyretá e o SIN-PY em relação ao intercâmbio entre Itaipu 50Hz e o SIN-PY, especialmente para o patamar de carga VALLE no SADI.

Por sua vez, o conjunto de perturbações para as quais se deseja a atuação da lógica de subfrequência caso seja necessário, reúne perturbações severas com potencial de degradação das condições operativas do sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio.

Para este conjunto de perturbações, as oscilações eletromecânicas possuem maior amplitude em geral, de modo que no período transitório a frequência não é a mesma em todas as partes do sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio.

Nesse sentido, essas diferenças de frequência (denominadas neste trabalho por “erro de frequência”) foram aferidas para todos os casos avaliados, de modo a avaliar com o valor mínimo do *pick-up* da lógica de subfrequência para evitar valores de frequência em todas as partes do sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio inferiores a 49Hz e, conseqüentemente os cortes de carga associados na condição interligada.

Nas avaliações realizadas, a pior condição de erro de frequência observada foi registrada para a atuação de alívio de geração no SADI, quando da ocorrência de eventos internos a este sistema. Conforme apresentado na Figura 2b, o maior erro de frequência observado foi inferior a 0,3Hz, de modo que ajustando um *pick-up* da lógica de frequência maior ou igual 49,3Hz seria suficiente deste ponto de vista para evitar os cortes de carga no sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio na condição interligada.

Desse modo, para atender ambas as condições discutidas acima, o *pick-up* da lógica de subfrequência foi ajustado em **49,3Hz**.

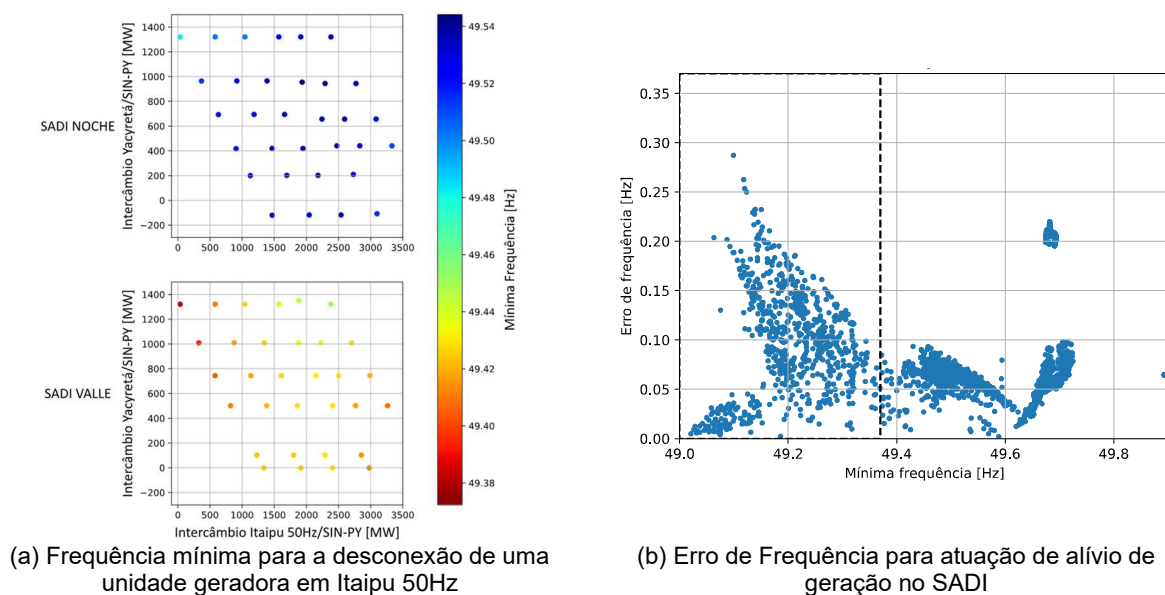


Figura 2 - Análise da lógica de subfrequência

Em termos da temporização da lógica da subfrequência, foi analisado o tempo entre a frequência superar o valor do *pick-up* proposto (49,3Hz) e alcançar a frequência de início dos cortes de carga (49Hz). Esta avaliação foi realizada sobre o conjunto de perturbações para as quais se deseja a atuação da lógica de subfrequência caso seja necessário, dado que apenas estas tem o potencial da superar o valor do *pick-up* proposto.

Esta avaliação também foi realizada com auxílio de programação em Python, a partir da qual foi identificado que o menor tempo registrado entre o *pick-up* e o início dos cortes de carga foi de 510ms.

Portanto, considerando os tempos de disjuntor e de processamento do IED 7SL87 discutidos anteriormente, propõe-se o ajuste da temporização da lógica de subfrequência em **350ms**.

É importante destacar que a lógica de subfrequência ajustada em 49,3Hz @ 350ms atuará para casos nos quais não haveria corte carga na condição interligada, notadamente para as perturbações nas quais a superação do *pick-up* da lógica ocorre de forma lenta, porém sem alcançar o valor de 49Hz.

#### 4.0 METODOLOGIA DE AJUSTE DA LÓGICA DE DIFERENÇA ANGULAR

A lógica de diferença angular monitora o ângulo entre a SE-MD e a ES-AYO, com o objetivo de identificar condições de perda de sincronismo entre Itaipu 50Hz e o SADI. Em um cenário de perda de sincronismo este ângulo cresce de forma não controlada, fornecendo condições para que a lógica de diferença angular atue de forma a separar os sistemas associados ao sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio.

Quando da ocorrência de um fenômeno de perda de sincronismo, a tensão no centro elétrico do sistema tende a zero. No caso do sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio, o centro elétrico ocorre na região central do Paraguai, que corresponde ao principal centro de carga do SIN-PY.

Neste sentido, buscou-se ajustar a lógica de ângulo de modo a comandar a separação dos sistemas associados antes da ocorrência de tensões excessivamente baixas, através da abertura das LT 220kV GUA-SPA e da LT 500kV AYO-VHA (vide Figura 1), minimizando os riscos de corte de carga por subtensão na região central do Paraguai durante o processo de perda de sincronismo.

Nesse sentido, buscou-se identificar a correlação entre a mínima tensão na região central do SIN-PY e a máxima diferença angular observada entre a SE-MD e a ES-AYO. A Figura 3 apresenta esta avaliação para todos os casos discutidos na Seção 2.0 realizada com auxílio de programação em Python, a partir da qual observa-se que a tensão de 0,5p.u. se apresenta como um limiar entre os casos estáveis e instáveis do ponto de vista angular.

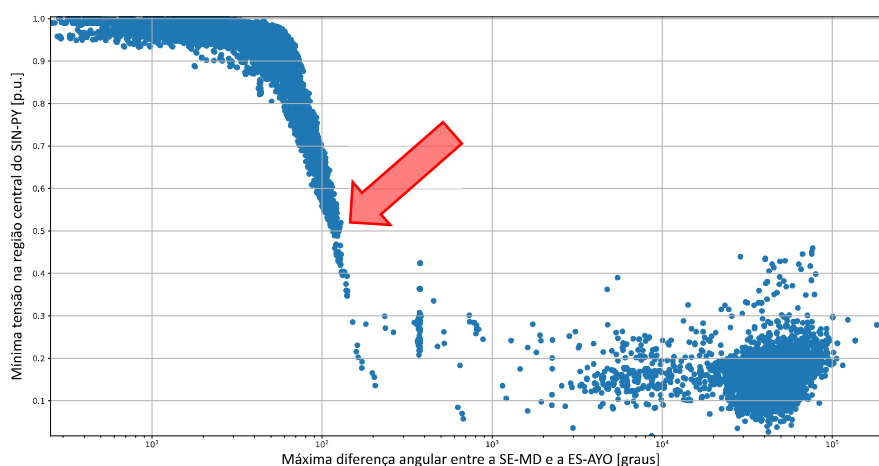


Figura 3 – Comportamento da tensão mínima na região central do SIN-PY em relação à máxima diferença angular entre a SE-MD e a ES-AYO

As perturbações discutidas na Seção 2.0 foram novamente segregadas em dois conjuntos de perturbações: aquelas nas quais não se deseja a atuação da lógica de diferença angular; e aquelas nas quais se deseja a atuação da lógica de diferença angular caso seja necessário.

Para o conjunto de perturbações para as quais não se deseja a atuação da lógica de diferença angular, a desconexão de uma unidade geradora em Itaipu 50Hz foi aquela que alcançou a maior abertura angular entre a SE-MD e a ES-AYO: 104,65 graus. A Figura 4 apresenta a análise de conjunto de dados realizada com auxílio de programação em Python, agregando os resultados para cada ponto de operação simulado para esta perturbação.

Conforme é possível observar na Figura 4, existem dois pontos de operação para cada período de carga no SADI que estão ilustrados na cor preta. Estes pontos indicam que ao menos um dos casos analisados para aquelas condições de fluxo de potência apresentou comportamento instável do ponto de vista angular.

De fato, é possível observar através da Figura 4 que a diferença angular tende a ser maior quanto maior o intercâmbio entre Yacyretá e o SIN-PY em relação ao intercâmbio entre Itaipu 50Hz e o SIN-PY, revelando uma importante região de baixo desempenho dinâmico frente a desconexão de uma unidade geradora em Itaipu 50Hz.

Por sua vez, com relação ao conjunto de perturbação para as quais se deseja atuação da lógica de diferença angular caso seja necessário, a lógica foi avaliada no sentido de minimizar o risco de ocorrência de tensões abaixo de 0,5p.u. na região central do Paraguai, conforme discutido através da Figura 3.

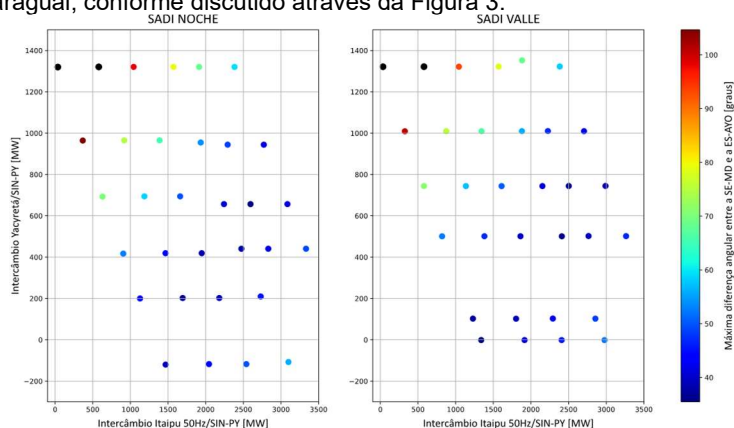


Figura 4 – Máxima abertura angular entre a SE-MD e a ES-AYO para a desconexão de 1 UG em Itaipu 50Hz

A partir da análise deste conjunto de perturbações, foi identificado que os requisitos de ajustes para a *pick-up* da lógica de diferença angular são muito restritivos e dependentes da perturbação analisada.

Neste contexto, no qual os requisitos de ajustes da lógica de diferença angular para ambos os conjuntos de perturbações analisados se sobrepõem, foram analisadas três propostas de ajustes no sentido de identificar a capacidade de evitar tensões abaixo de 0,5p.u. na região central do Paraguai: 80°, 90° e 100°.

A título de exemplo, a Figura 5 apresenta a porcentagem dos casos com tensão mínima na região central do Paraguai inferior ao critério de 0,5p.u., considerando as três propostas de ajuste da lógica de diferença angular, frente ao bloqueio de um bipolo do Elo CC de Furnas.

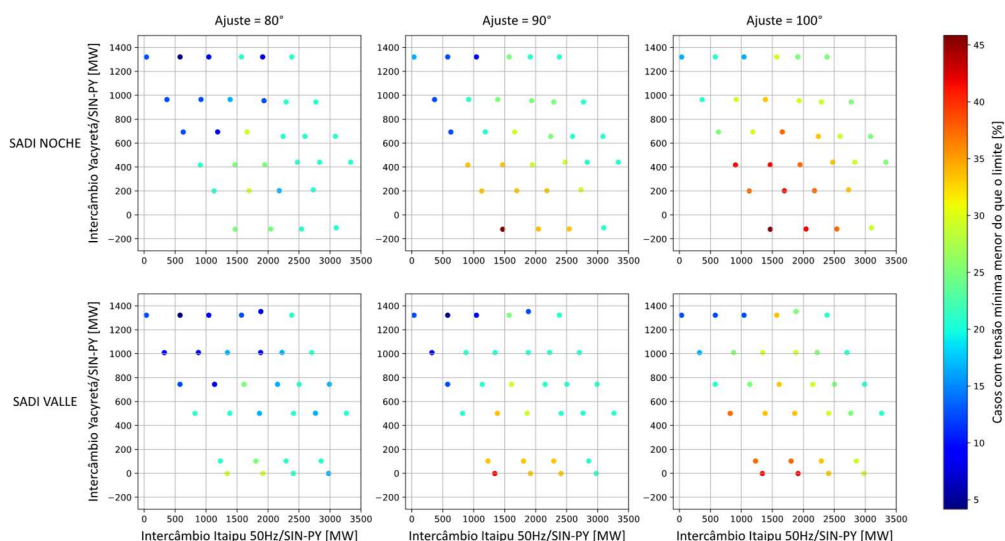


Figura 5 – Análise do bloqueio de um bipolo do Elo CC de Furnas – Lógica de ângulo

Por meio da análise da Figura 5, bem como para as demais perturbações analisadas, é possível observar que quanto menor o ajuste da lógica de diferença angular menos violações de tensão na região central do Paraguai são observadas, conforme esperado. Desse modo, o ajuste em 80° foi escolhido como uma solução de compromisso em



minimizar os riscos de tensão baixas no SIN-PY e atuação demasiada para perturbações para as quais não se desejava inicialmente a atuação da lógica de diferença angular.

Uma vez definido o ajuste da lógica de diferença angular, a Figura 4 pode ser revisitada no sentido de se definir uma região de segurança relacionando o intercâmbio entre Yacyretá e o SIN-PY e entre Itaipu 50Hz e o SIN-PY, a fim de evitar a atuação da lógica de diferença angular quando da desconexão de uma unidade geradora em Itaipu 50Hz. Esta proposta encontra-se atualmente sob avaliação.

#### 4.0 METODOLOGIA DE AJUSTE DA LÓGICA DE FLUXO REVERSO

Além das tensões baixas no SIN-PY quando da perda de sincronismo entre Itaipu 50Hz e o SADI analisadas na Seção 4.0, também são observadas tensões baixas no SADI em algumas condições, mesmo considerando a atuação da lógica de diferença angular ajustada em  $80^\circ$ . Estes cenários são verificados notadamente para eventos que envolvem perdas no Elo CC de Furnas que levem à injeção de potência no SADI através do SIN-PY.

Para efeitos de análise, a tensão no SADI é considerada adequada caso não sejam observados valores de tensão inferiores a 0,70p.u.

A título de exemplo, a Figura 6 apresenta a porcentagem dos casos com tensão mínima no SADI inferior a 0,70p.u., frente ao bloqueio de um bipolo do Elo CC de Furnas. Conforme é possível observar na Figura 6 mais violações são registradas quanto menor intercâmbio entre Itaipu 50Hz e o SIN-PY, para o quais o intercâmbio entre Itaipu 50Hz e o Elo CC de Furnas tende a ser maior, de modo que perdas no Elo CC de Furnas sejam mais severas do ponto de vista do sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio.

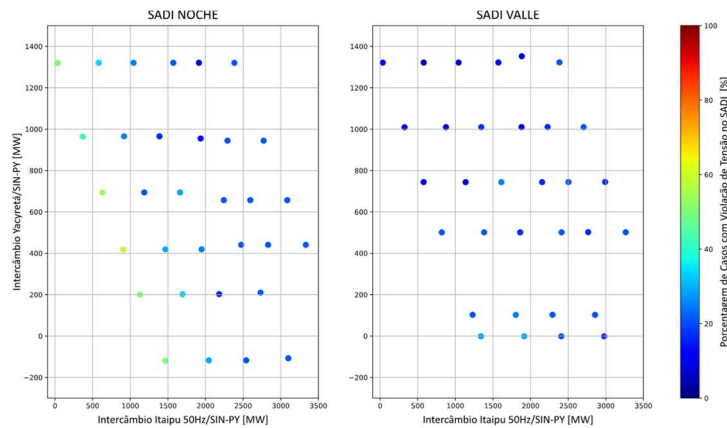


Figura 6 – Porcentagens de casos com violação de tensão no SADI frente ao bloqueio de um bipolo do Elo CC de Furnas – Lógica de fluxo reverso

O fenômeno elétrico associado a estas violações de tensão no SADI decorre da natureza da perturbação. Quando da ocorrência de perdas importantes no Elo CC de Furnas, o excesso de fluxo de potência tende a fluir para o SADI através do SIN-PY. Em condições específicas de carregamento, este fluxo de potência adicional leva à perda de sincronismo entre Itaipu 50Hz e o SADI de forma lenta, comprometendo a atuação da lógica de diferença angular.

Para estes casos, a lógica de fluxo reverso foi projetada tomando como base o somatório do fluxo de potência através das LT 500kV YAC-AYO (vide Figura 1). Esta lógica foi denominada de “fluxo reverso”, pois em condições normais de operação o fluxo de potência flui no sentido de Yacyretá para o SIN-PY. Portanto, a inversão de sentido desse fluxo indica que possivelmente tenha ocorrido alguma perda no Elo CC de Furnas.

Em termos da temporização da lógica de fluxo reverso, os estudos realizados indicaram que a temporização de **500ms** é a que indica a melhor solução de compromisso entre a capacidade de identificar eventuais problemas dinâmicos e a rapidez necessária para identificar a deterioração da tensão no SADI e no SIN-PY.

Para a avaliação dos ajustes, todos os casos discutidos na Seção 2.0 foram analisados, buscando uma solução de compromisso entre minimizar as atuações insuficientes (quando a atuação na lógica de fluxo reverso não foi capaz de evitar tensões no SADI abaixo de 0,70p.u.) e as atuações indesejadas (quando houve atuação desnecessária).

A título de exemplo, a Figura 7 apresenta a avaliação de desempenho da lógica de fluxo reverso frente ao bloqueio de um bipolo do Elo CC de Furnas em função de diferentes valores de *pick-up*. Por meio da Figura 7 é possível observar que a melhor solução de compromisso ocorre para ajustes entre 550MW e 450MW de fluxo reverso.

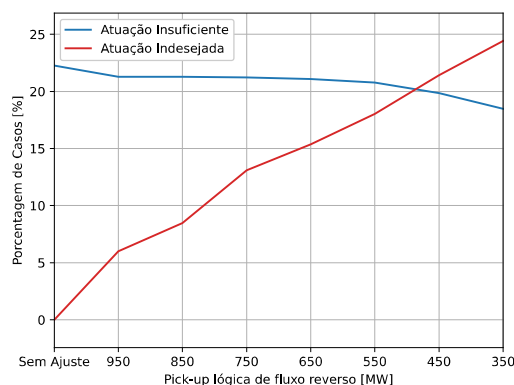


Figura 7 – Análise do bloqueio de um bipolo do Elo CC de Furnas – Lógica de fluxo reverso

Embora a redução no número de atuações insuficientes seja discreta e haja o risco de algumas atuações indesejadas, há algum benefício na utilização da lógica de fluxo reverso nos casos com perdas importantes no Elo CC de Furnas. Para tanto, o ajuste proposto para a lógica de fluxo reverso foi de **450MW @ 500ms**.

Por fim, a Figura 8 apresenta um caso no qual a lógica de fluxo reverso atuou corretamente antes da lógica de diferença angular, evitando tensões abaixo de 0,7p.u. no SADI (subestação de Rincon e Resistência), frente ao bloqueio de um bipolo do Elo CC de Furnas.

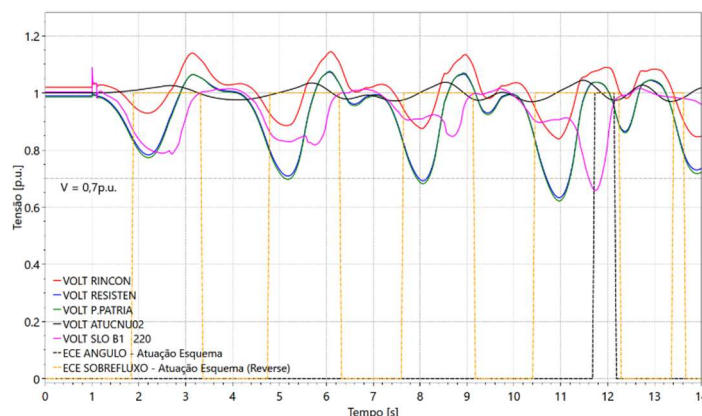


Figura 8 – Comportamento da tensão no SADI e no SIN-PY e atuação da lógica de fluxo reverso e diferença angular para um caso de bloqueio de um bipolo do Elo CC de Furnas

## 5.0 CONCLUSÕES

Para a análise do desempenho dinâmico do sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio, foi aplicada uma metodologia de simulações em lote para um grande conjunto de condições de fluxo de potência e de perturbações. Esta metodologia, já discutida e aplicada em outros trabalhos desenvolvidos no âmbito dos estudos elétricos de Itaipu, se mostrou novamente uma importante ferramenta de auxílio aos analistas em termos da produção de resultados.

Adicionalmente, através da programação em Python, foi possível analisar o grande conjunto de resultados produzidos pela metodologia empregada, utilizando ferramentas de *Big Data* como a agregação das piores condições operativas por condição de fluxo de potência analisada e o tratamento dos dados para análise de correlação.

Através deste arcabouço ferramental desenvolvido, foi possível ajustar três importantes lógicas do SEP associado ao sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio, analisando as mais diversas condições operativas do sistema, possibilitando a busca por ajustes ótimos ou a melhor solução de compromisso possível.

A formação do sistema elétrico interligado paraguaio-argentino-uruguaio é uma importante interligação para a América Latina, e as lógicas do SEP apresentadas neste trabalho desempenharão um importante papel na operação segura desta interligação.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- (1) CEPEL - Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. Programa ANAREDE – Análise de Redes – Manual do Usuário V11.05.05, 2021
- (2) CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. Programa ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos – Manual do Usuário V12.0, 2021
- (3) ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Operação do Elo CC de Furnas com número reduzido de conversores – ONS/DPL/PLC 0133/2020. Revisão 0. Maio, 2020
- (4) SANTOS, J. A., SZOSTAK, A. J. M., TOCHETO, A. P., OLIVEIRA, R. A. Desenvolvimento de uma metodologia para a realização de simulações em lote de forma sequencial, automática e adaptativa, utilizando o MATLAB para o gerenciamento integrado dos aplicativos ANAREDE e ANATEM. XVIII ERIAC. Maio, 2019.
- (5) SANTOS, J. A., SZOSTAK, A. J. M., TOCHETO, A. P., OLIVEIRA, R. A. 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. Novembro, 2019.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Formado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) em 2012 e doutor em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP) em 2019. Trabalhou na Celesc Distribuição em 2016 nas áreas de estudos elétricos e análise da conexão de geradores distribuídos. Em 2017 trabalhou no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) na análise de intervenções e desligamentos na Rede Básica. Atualmente trabalha na Itaipu Binacional na divisão de Estudos Elétricos e Normas.

## (2) PAULO HENRIQUE GALASSI

Nasceu em 1994 na cidade de Formosa do Oeste, estado do Paraná. Recebeu o diploma de graduação em engenharia elétrica e atualmente mestrando pela Universidade Estadual do Paraná (2016). Trabalha na Itaipu Binacional desde 2016, onde atualmente trabalha na área de estudos elétricos e normas, envolvido com análise de pós-operativa de perturbações e eventos, estudos elétricos em regime permanente, dinâmico e transitório e sistemas de proteção e controle.

## (3) ROBSON ALMIR DE OLIVEIRA

Natural de Conceição das Pedras, MG. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1997 e conclui o mestrado em sistemas elétricos de potência em 2001, ambos pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá). Trabalha na Itaipu Binacional desde 2000 na divisão de estudos elétricos e normas, envolvendo-se principalmente com a realização de estudos elétricos, incluindo a análise de sistemas elétricos em regime permanente, dinâmico e transitório, sistemas de proteção e controle (sistemas Scada/EMS, CAG, CAT, regulação primária de tensão e velocidade). Também é professor assistente da UNIOESTE desde 2002, ministrando aulas de Proteção, Operação e Estabilidade de SEP.

## (4) ALFREDO JAVIER MEZGER SZOSTAK

Integrante da divisão de Estudos Elétricos e Normas (OPSE.DT) da Itaipu Binacional. É formado em engenharia elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, com mestrado na Universidade Federal de Santa Catarina. Suas áreas de interesse incluem análise da operação de sistemas elétricos, estudos de estabilidade de frequência e tensão, e estudos de transitórios eletromagnéticos.

## (5) JONAS ROBERTO PESENTE

Doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina e colaborador de Itaipu Binacional na divisão de estudos elétricos e normas.

## (6) HILTON CARLOS MIRANDA LESSA

Nascido em 1992 na cidade de Vitória, Espírito Santo. Concluiu o curso de eletrotécnica pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) em 2010 e o curso de engenharia elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo em 2017. Participou ainda do programa de graduação Sanduíche do Ciências Sem Fronteiras, realizando parte da graduação na Macquarie University, em Sydney, na Austrália. Desde 2019 trabalha no setor de estudos elétricos e normas da Itaipu Binacional, realizando estudos elétricos, análises de perturbações e elaborando procedimentos operativos.

## (7) MANUEL LEONARDO SOSA RIOS

Atualmente é colaborador da Divisão de Estudos Elétricos e Normas (OPSE.DT) da Itaipu Binacional e doutorando em engenharia elétrica na Universidade de São Paulo (USP/EESC). Recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Nacional do Leste, Faculdade Politécnica (FPUNE), Paraguay, em 2012. Seus interesses de pesquisa incluem ajustes de controladores do sistema de excitação de geradores síncronos (AVR e PSS) para pequenas perturbações, utilizando técnicas clássicas de controle e metaheurísticas; estabilidade electromecânica de sistemas de potência; caracterização de ciclos limites causados por interações entre controladores não lineares de sistemas de potência.

## (8) ANDRE PAGANI TOCHETTO

Nasceu em 1983 na cidade de Francisco Beltrão, estado do Paraná. Recebeu o diploma de graduação em engenharia elétrica pela Universidade Estadual do Paraná (2005) e diploma de pós-graduação (2011) e mestrado (2014) pela Universidade de Itajubá. Trabalha na Itaipu Binacional desde 2006, onde atualmente trabalha na área de estudos elétricos e normas, envolvido com análise de perturbações, realização estudos elétricos e elaboração de procedimentos operativos.

## (9) ESTEBAN FEDERICO VARGAS CORREA

Recibió su diploma de graduación y pos-graduación en ingeniería eléctrica por la Universidad Nacional del Este en 2007 y 2009, respectivamente, y diploma de master en ingeniería eléctrica por la Universidad Politécnica de Madrid, España. Trabaja en la Itaipu Binacional desde 2011, actuando en el área de estudios eléctricos y normas, involucrado con análisis de perturbaciones, realización de estudios eléctricos y elaboración de procedimientos operativos.