



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

Ferramentas para Ajuste Automático das Lógicas do Sistema Especial de Proteção Associado ao Sistema de Transmissão de 765 kV

JHENNYFER CAROLINE DA SILVA (1); ANDRÉ PAGANI TOCHETTO (1); ROBSON ALMIR DE OLIVEIRA (1); IB(1);

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automático destinado ao ajuste das lógicas do Sistema Especial de Proteção associado ao sistema de transmissão de 765 kV e à Itaipu 60 Hz (SEP 765 kV), que pode ser dividido em dois subsistemas. O primeiro subsistema realiza o ajuste automático do fluxo de potência do sistema elétrico brasileiro, alterando a geração em Itaipu 60 Hz (GIPU), o fluxo para o sudeste via sistema de 765 kV (FSE) e o perfil de tensão no sistema de transmissão de 765 kV. O segundo subsistema realiza simulações dinâmicas de um conjunto de contingências pré-selecionadas e avalia se o desempenho do sistema elétrico atende a critérios pré-definidos. O sistema automático foi implementado utilizando Matlab e realiza as simulações de maneira integrada com o Anarede e o Anatem, buscando automatizar os processos de simulação e análise realizados em estudos de estabilidade eletromecânica.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema Automático, Fluxo de Potência, Análise de Transitórios Eletromecânicos.

1.0 - INTRODUÇÃO

A usina de Itaipu 60 Hz está conectada ao Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN-BR) através de um sistema de transmissão composto por uma linha de 525kV entre as subestações de Foz do Iguaçu e Cascavel Oeste, e por três linhas de 765 kV que interligam as subestações de Foz do Iguaçu, Ivaiporã, Itaberá e Tijuco Preto [1].

Esse sistema de transmissão é dotado de um Sistema Especial de Proteção (SEP 765 kV), cuja principal ação é comandar o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 60 Hz quando da ocorrência de contingências no sistema de transmissão de 765 kV com o objetivo de garantir a segurança do sistema elétrico brasileiro e permitir um maior aproveitamento da geração de Itaipu 60 Hz. O SEP 765 kV é composto por lógicas que atuam em função de contingências no sistema de transmissão associadas à existência de fluxo de potência superior a um ajuste [2,3].

Atualmente o SEP 765 kV está passando por um processo de modernização, que inclui atualização de hardware e modificações na filosofia das lógicas. Em função disso, há a necessidade de reavaliação e definição de novos ajustes para todas as lógicas do SEP 765 kV. Essa reavaliação demanda um grande esforço no sentido de efetuar diversas simulações de fluxo de potência e de transitórios eletromecânicos através dos softwares Anarede e Anatem, pois existe uma grande quantidade de contingências que devem ser analisadas, além das diferentes condições de carregamento do sistema, diferentes perfis de tensão e topologia da rede [1].

Neste contexto, este trabalho surgiu com o intuito de auxiliar no processo de reavaliação das lógicas, através da realização automática de simulações e análises de resultados, visando tornar o processo mais rápido e eficaz,

possibilitando ao analista utilizar maior parte do seu tempo para analisar os resultados efetivamente.

2.0 - SEP 765 KV ASSOCIADO A ITAIPU 60 HZ

Os sistemas especiais de proteção são empregados em sistemas de energia elétrica com o intuito de garantir que esses sistemas funcionem dentro de condições estáveis mesmo após a ocorrência de grandes ou pequenas perturbações. De modo geral, os SEPs possuem dispositivos automáticos que tomam ações de controle, tipicamente o corte de carga ou o corte de geração, a fim de eliminar ou minimizar os impactos causados pela ocorrência de perturbações [4].

A Figura 1 mostra o sistema de transmissão de 765 kV associado à Itaipu 60 Hz, onde há um sistema especial de proteção implantado desde 1989, quando entrou em operação o segundo circuito de 765 kV desse sistema [1]

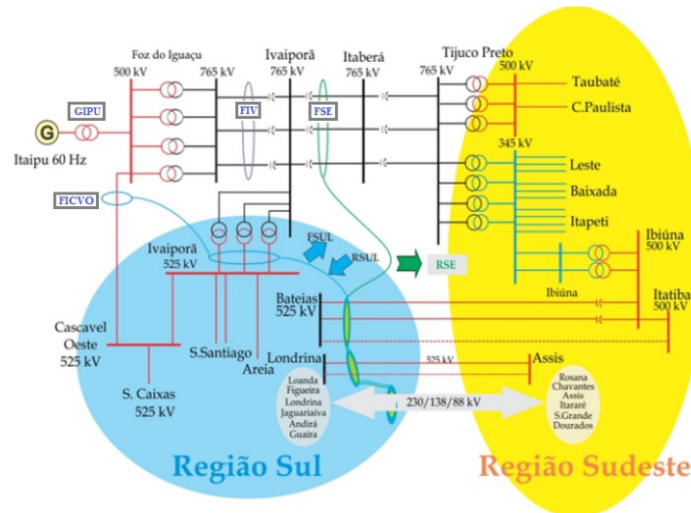


Figura 1 – Sistema de transmissão de 765 kV.

Inicialmente o SEP foi implantado com relés auxiliares e chaves seletoras, sendo que a posição das chaves era selecionada manualmente por operadores, de acordo com as condições operativas do sistema. Além disso, a manobra das chaves era feita por operadores das subestações de Itaipu e Furnas. Em 1995 o SEP 765 kV foi modernizado, com a implantação de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), buscando aumentar a confiabilidade do sistema [2,3].

Atualmente o SEP 765 kV está passando por um novo processo de modernização, com a substituição dos CLPs por Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) bem como modificações na filosofia das lógicas [1].

2.1 Lógicas do SEP 765 kV

O SEP 765 kV é composto por várias lógicas, sendo que a maioria delas comandam o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 60 Hz diante de contingências no sistema de transmissão, quando o valor da geração em Itaipu 60 Hz (GIPU) ou o fluxo para o sudeste via sistema de 765 kV (FSE) for superior à referência, como por exemplo [5]:

- Lógicas 1FIIV, 2FIIV, 3FIIV: comandam o desligamento de unidades geradoras em Itaipu 60 Hz diante de contingências simples, duplas e triplas no trecho entre Foz do Iguaçu e Ivaiporã e o valor da geração de Itaipu (GIPU) for maior que a referência;
- Lógicas 1IVIA, 2IVIA, 3IVIA: comandam o desligamento de unidades geradoras em Itaipu 60 Hz diante de contingências simples, duplas e triplas no trecho entre Ivaiporã e Itaberá e o valor fluxo para o sudeste via sistema de 765 kV (FSE) for maior que a referência;
- Lógicas 1IATP, 2IATP, 3IATP: comandam o desligamento de unidades geradoras em Itaipu 60 Hz diante de contingências simples, duplas e triplas no trecho entre Ivaiporã e Itaberá e o valor fluxo para o sudeste via sistema de 765 kV (FSE) for maior que a referência.

2.2 Reavaliação das Lógicas do SEP 765 kV

O processo de reavaliação das lógicas do SEP 765 kV e determinação das referências é realizado com base em estudos de regime permanente e transitórios eletromecânicos. As premissas e critérios utilizados nas simulações

são definidos no âmbito da Comissão Mista de Operação (CMO), grupo em que participam Itaipu, Eletrobrás, ANDE, Furnas e ONS. As principais premissas e critérios considerados nos estudos do SEP 765 kV são [5]:

- a. A geração de Itaipu 60 Hz entre 420 MW e 750 MW por máquina;
- b. As contingências múltiplas simuladas são consideradas simultâneas;
- c. O tempo para atuação do esquema, comandando o desligamento de unidades geradoras em Itaipu 60 Hz, é de 200 ms;
- d. As simulações de desempenho dinâmico são realizadas com a tensão no banco de capacitores série das LT FI-IV (VT) em 102%;
- e. A barra sob perturbação, no instante da aplicação do curto-circuito, não deve possuir níveis de tensão inferior a 60% quando a barra for localizada próxima à unidades geradoras, ou não inferior a 70% nas demais barras do sistema;
- f. A corrente de excitação das unidades geradoras de Itaipu 60 Hz deve ser inferior à 2,1 p.u. após a estabilização do sistema;
- g. O tempo de atuação do limitador das unidades geradoras de Itaipu 60 Hz não deve exceder 300 ms;
- h. Nas barras que compõe o sistema de transmissão de 765 kV, após a eliminação do curto-circuito, o nível de tensão deverá ser superior à 75%;
- i. Nas demais barras do sistema interligado a tensão mínima na primeira oscilação após a eliminação da perturbação deve ser superior à 60%. Nas oscilações posteriores o nível de tensão mínimo é de 80%;
- j. Após 10 segundos as oscilações pico a pico de tensão no sistema de transmissão de 765 kV não devem ser superiores a 2%;
- k. O valor dos níveis de tensão em regime permanente do sistema de transmissão 765 kV devem permanecer dentro dos limites operativos de emergência;
- l. A potência ativa gerada em Itaipu 60 Hz não deve oscilar em níveis superiores à 40 MW/máquina após 15 s de simulação;
- m. Não deve haver atuação da proteção de perda de sincronismo (PPS) das linhas de transmissão.

Com base na análise desses critérios são determinadas as referências para as lógicas do SEP 765 kV, ou seja, os valores de fluxo a partir dos quais é necessário desligar unidades geradoras de Itaipu 60 Hz quando ocorrem contingências no sistema de transmissão.

3.0 - O SISTEMA AUTOMÁTICO PARA AJUSTE DAS LÓGICAS

O sistema automático foi desenvolvido em Matlab e interage com os aplicativos Anarede e Anatem do Cepel, com o intuito de determinar as referências para atuação do SEP do 765 kV. O sistema foi dividido em dois subsistemas que funcionam de forma complementar, sendo que um realiza o ajuste automático dos casos de fluxo de potência, e o outro realiza as simulações dinâmicas e avalia o desempenho dinâmico do sistema elétrico, verificando se este atende aos critérios estabelecidos.

A Figura 2 apresenta a arquitetura básica do sistema automático desenvolvido. O subsistema de ajuste automático dos casos de fluxo de potência lê um ou mais casos base de fluxo de potência do Anarede e a partir deles realiza modificações, gerando novos casos, com diferentes valores de geração de Itaipu 60 Hz (GIPU), fluxo para o Sudeste via sistema de 765 kV (FSE) e perfil de tensão no 765 kV (Tensão VT). O subsistema destinado a avaliação do desempenho dinâmico utiliza os casos gerados pelo subsistema de ajuste automático de fluxo de potência e informações adicionais como contingências a serem avaliadas e critérios utilizados, realiza simulações com o Anatem e busca o ajuste para as referências das lógicas.

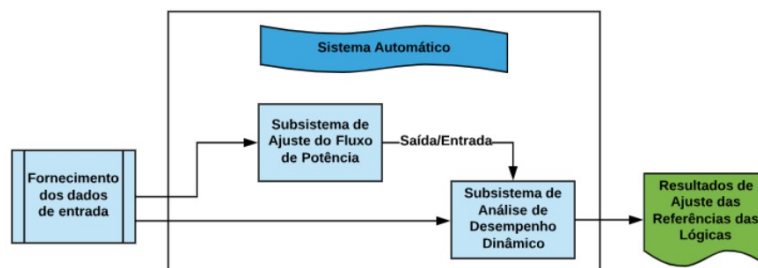


Figura 2 – Arquitetura do sistema automático completo.

3.1 Ajuste Automático dos Casos de Fluxo de Potência

O principal objetivo deste subsistema é a formulação dos casos de regime permanente de modo automático, possibilitando que o analista simule diversas condições pré-evento de forma a abranger diversos pontos de interesse da região operacional das unidades geradoras (UG) de Itaipu 60 Hz e do sistema de transmissão de 765 kV. Neste subsistema, o foco é o ajuste das grandezas V_{IPU} (tensão de operação da SE-IPU 60 Hz), número de unidades geradoras em Itaipu 60 Hz, GIPU, FSE e VT, que são as grandezas utilizadas para avaliar as referências das principais lógicas do SEP 765 kV.

A Figura 3 apresenta um fluxograma que mostra a estrutura básica do subsistema desenvolvido, compreendendo o fornecimento dos dados de entrada, o ajuste do fluxo de potência e o gerenciamento dos casos a serem simulados.

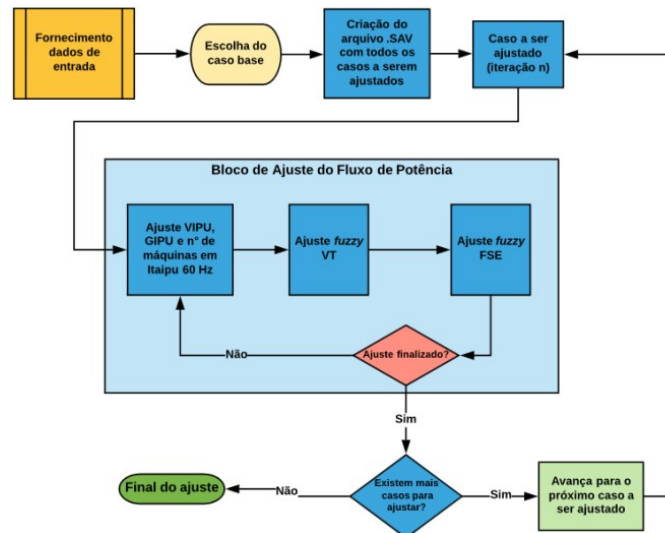


Figura 3 – Fluxograma do funcionamento do subsistema de ajuste dos casos de fluxo de potência.

Os dados de entrada devem ser fornecidos por um analista e consistem basicamente de um ou mais casos de regime permanente convergidos no Anarede e as características desejadas para os novos casos a serem gerados automaticamente, que são:

- Faixa de valores de GIPU: por exemplo de 5000 MW a 6000 MW em intervalos de 100 MW;
- Número de unidades geradoras sincronizadas em Itaipu 60 Hz em todos os casos: por exemplo, 9;
- Valor desejado para a tensão na SE-IPU 60 Hz (V_{ipu}) em todos os casos: por exemplo, 1,05 p.u.;
- Valor da tensão VT para todos os casos: por exemplo 1,02 p.u.;
- Faixa de valores de FSE: por exemplo de 4500 MW a 5500 MW em intervalos de 100 MW.

Com base nessas entradas o subsistema de ajuste de fluxo de potência irá gerar uma série de casos de fluxo de potência com as combinações de GIPU x FSE. A primeira etapa do ajuste de cada caso consiste em ajustar as variáveis que não necessitam de um processo iterativo, como GIPU, V_{IPU} e número de unidades geradoras sincronizadas. A segunda etapa consiste em ajustar os valores de VT e FSE, que necessitam de alterações em outras grandezas do sistema. Como a variação de FSE resulta em variação de tensão, os ajustes de VT e FSE são repetidos, um de cada vez, até que o erro com relação à referência seja inferior ao estipulado (0,0021 p.u. ou 15 MW). Quando o ajuste do caso é finalizado, o programa registra o caso no arquivo histórico (.sav) e inicia novamente o processo de ajuste para o próximo caso.

Os ajustes de VT e de FSE são feitos de forma indireta, através da alteração de outras grandezas do sistema. Por este motivo, esses ajustes foram implementados através de um controlador *fuzzy*, que dispõe de um conjunto de ações pré-determinadas para obter as variações de VT e FSE desejadas [5, 6].

Durante a execução das simulações o subsistema de ajuste de fluxo de potência monitora os limites de tensão de barras da região de estudo e os limites de geração das usinas utilizadas. Caso os recursos de geração e/ou tensão se esgotem antes de se obter o ajuste desejado, o subsistema irá informar o usuário que o caso não foi gerado por esse motivo.

3.1.1 Ajuste de VT

O controlador proposto para o ajuste de VT utiliza como dado de entrada o erro da tensão VT em p.u., conforme mostra a Equação 1. A partir dessa variável o sistema *fuzzy* interpretará com o auxílio do conjunto de regras qual o estado operativo do sistema a ser ajustado.

$$Erro_{VT} = VT_{ref} - VT_{atual} \quad (1)$$

A obtenção dos conjuntos *fuzzy* que representam as variáveis de entrada se dá através da definição dos limites superiores e inferiores destas variáveis, bem como a amplitude dos intervalos de variação dessas grandezas [7, 8]. A Tabela 1 apresenta os limites, onde podem ser verificados distintos valores de a, b, c, e d os quais descrevem os pontos das funções de pertinência triangulares e trapezoidais, respectivamente. Estes são obtidos em função do conhecimento prévio do comportamento dessas grandezas.

Tabela 1 – Funções de pertinência do controlador *fuzzy* para o ajuste de VT.

Variável de Entrada	Funções de Pertinência (FP)	Valores dos Limites das FPs			
		a	b	c	d
Erro VT	Máximo Negativo	-0,04	-0,04	-0,02	-0,015
	Grande Negativo	-0,016	-0,0125	-0,009	-
	Médio Negativo	-0,01	-0,0075	-0,0041	-
	Pequeno Negativo	-0,0042	-0,003	-0,0021	-
	Nulo	-0,0021	0	-0,0021	-
	Pequeno Positivo	0,0021	0,003	0,0042	-
	Médio Positivo	0,0041	0,0075	0,01	-
	Grande Positivo	0,009	0,0125	0,016	-
	Máximo Positivo	0,015	0,02	0,04	0,04

As ações de controle para cada uma das funções de pertinência são o chaveamento de bancos de reatores, alteração de *tap* de transformadores e alteração de tensão em determinadas barras, de acordo com um conjunto de ações pré-determinadas pelo usuário. Caso a tensão VT esteja acima do desejado (erro de VT negativo), a ação do controlador *fuzzy* irá conectar reatores e/ou reduzir a tensão nas barras, de forma a reduzir a tensão VT. Caso a tensão esteja abaixo do desejado (erro de VT positivo), a ação do controlador *fuzzy* irá desconectar reatores e/ou aumentar a tensão nas barras, de forma a aumentar o VT.

As regras envolvem a utilização de dois reatores para os erros máximos de tensão, um reator associado a ajuste de tensão para erros grandes e somente ajustes de tensões de barra controladas para erros médios e pequenos.

3.1.2 Ajuste de FSE

O controlador proposto para o ajuste do FSE utiliza como dado de entrada o erro do valor de FSE atual em relação ao valor de referência desejado, calculado a partir da Equação 2. A partir dessa variável o sistema *fuzzy* interpretará, com o auxílio do conjunto de regras, qual o estado operativo do sistema a ser ajustado.

$$Erro_{FSE} = \frac{FSE_{ref}[MW] - FSE_{atual}[MW]}{10000 MW} \quad (2)$$

A Tabela 2 apresenta os limites, onde podem ser verificados distintos valores de a, b, c, e d, os quais descrevem os pontos das funções de pertinência triangulares e trapezoidais, respectivamente. Estes são obtidos em função do conhecimento prévio do comportamento dessas grandezas.

Tabela 2 – Funções pertinência FSE.

Variável de Entrada	Funções de Pertinência (FP)	Valores dos Limites das FPs				Ação de Controle
		a	b	c	d	
Erro FSE	Grande Negativo	-0,05	-0,05	-0,025	-0,015	-350MW no Sul
	Médio Negativo	-0,015	-0,01	-0,005	-	-200MW no Sul
	Pequeno Negativo	-0,005	-0,0025	-0,0015	-	-75MW no Sul
	Nulo	-0,0015	0	-0,0015	-	Sem alteração
	Pequeno Positivo	0,0015	0,0025	0,005	-	+75MW no Sul
	Médio Positivo	0,005	0,01	0,015	-	+200MW no Sul
	Grande Positivo	0,015	0,025	0,05	0,05	+350MW no Sul

As ações de controle, para cada uma das funções de pertinência, são a variação de geração na região Sul e na região Sudeste do SIN-BR, em um conjunto de barras pré-definido pelo usuário. Caso o erro de FSE seja positivo, a ação do controlador *fuzzy* irá aumentar a potência das unidades geradoras da região Sul e realizar a compensação através das usinas do Sudeste, resultando no aumento do FSE. Caso o erro de FSE seja negativo a ação do controlador *fuzzy* irá reduzir a potência das usinas do Sul e compensar no Sudeste, resultando na redução do FSE.

3.2 Simulação dinâmica e avaliação do desempenho

A etapa de avaliação do desempenho dinâmico utiliza os casos gerados pelo subsistema de ajuste automático de fluxo de potência e um conjunto de informações fornecidas pelo analista para a realização de simulações dinâmicas com o programa Anatem. O subsistema analisa os resultados das simulações e verifica se os critérios de desempenho dinâmico são atendidos.

A Figura 4 apresenta um fluxograma que mostra a estrutura básica do subsistema desenvolvido, compreendendo o fornecimento dos dados de entrada, a realização da simulação, a análise dos resultados e o ajuste das referências.

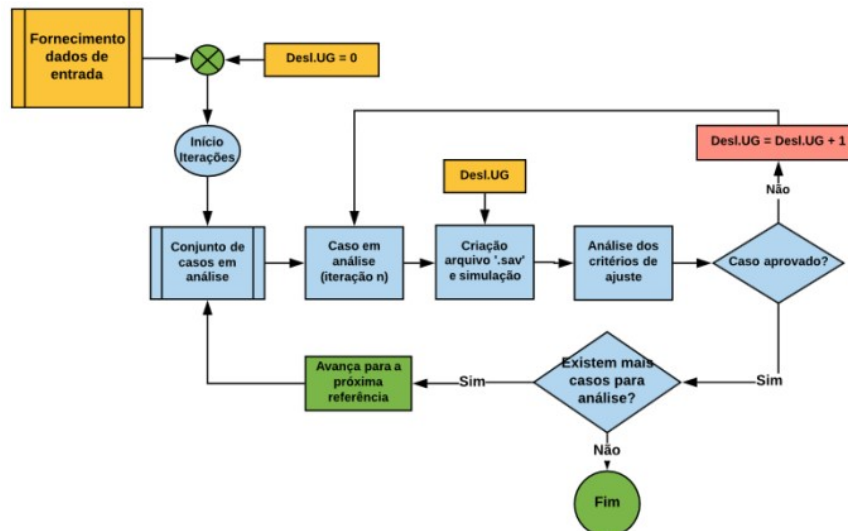


Figura 4 – Fluxograma do subsistema de simulação dinâmica e análise dos resultados.

Os dados de entrada devem ser fornecidos por um analista e consistem basicamente dos casos de regime permanente resultados da etapa anterior, de dados e modelos para a simulação dinâmica, da lista de contingências e dos critérios para avaliação do desempenho dinâmico.

As simulações são realizadas por lógica do SEP 765 kV, representada por uma determinada contingência e um fluxo de potência de referência (GIPU ou FSE). O subsistema inicia as simulações para uma determinada contingência com o caso de regime permanente com menor valor de fluxo de potência de referência.

Após a simulação, o subsistema realiza a avaliação do desempenho do sistema com base nos critérios citados no item 2.2, que também são pré-programados pelo usuário. A título de exemplo, a Figura 5 mostra como o subsistema verifica os critérios de tensão (letras “i” e “j” do item 2.2).

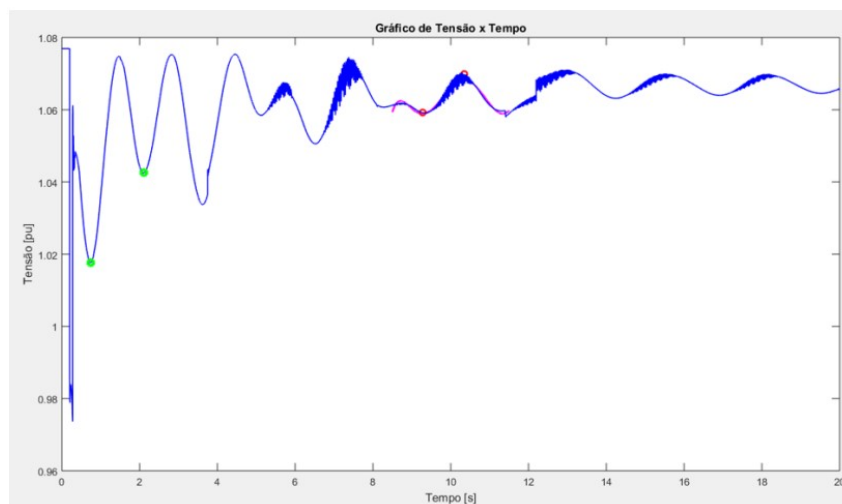


Figura 5 – Desempenho da tensão.

O subsistema identifica automaticamente os valores mínimos de tensão na primeira e na segunda oscilação, além dos valores máximos e mínimos de tensão no tempo de 10s e verifica se as variações atendem os critérios

estabelecidos. É possível observar também que o ruído que aparece no valor da tensão é desprezado pelo algoritmo, que utiliza filtros passa-baixa e realiza interpolação polinomial em torno do ponto de interesse.

Os demais critérios são verificados de forma similar e incluem o monitoramento da corrente de excitação das unidades geradoras de Itaipu 60 Hz, oscilações de potência, verificação da excursão da impedância de uma linha de transmissão em relação à característica das PPS, entre outros.

Se nenhum critério foi violado na avaliação dos resultados, o subsistema seleciona um novo caso de fluxo de potência da lista fornecida que tenha um incremento no valor do fluxo de potência. O processo de simulação e avaliação dos resultados é repetido desta forma até que um caso apresente violação de algum critério.

Quando for identificada a violação de critério, o subsistema irá realizar novamente essa simulação, acrescentado nos eventos o comando de desligamento de unidade geradora em Itaipu 60 Hz. Esse processo é repetido, sempre usando um caso com maior fluxo de potência quando não há violação de critério e adicionando mais unidades geradoras para desligamento quando um critério é violado.

Por fim, o subsistema irá determinar as referências para a lógica do SEP 765 kV sob avaliação, escolhendo os casos com maior fluxo de potência e que atendem os critérios de desempenho. São determinadas referência para o desligamento de uma até quatro unidades geradoras em Itaipu 60 Hz.

4.0 - RESULTADOS

O sistema automático foi utilizado para realizar o ajuste das referências de algumas das lógicas do SEP 765 kV, tendo seus resultados comparados com outros estudos realizados tradicionalmente.

A Tabela 3 mostra um exemplo de resultado do subsistema de ajuste de fluxo de potência onde o objetivo era ajustar diferentes valores de FSE tendo como base um caso de FSE igual 6400MW.

Tabela 3 – Resultado do ajuste automático do fluxo de potência.

UG	GIPU	VT ref.	VT ajustado	FSE ref.	FSE ajustado	Iterações
8	6000 MW	1,020 p.u.	1,022 p.u.	5000 MW	5002 MW	12
8	6000 MW	1,020 p.u.	1,020 p.u.	5500 MW	5496 MW	7
8	6000 MW	1,020 p.u.	1,018 p.u.	6000 MW	6003 MW	4
8	6000 MW	1,020 p.u.	1,022 p.u.	6500 MW	6508 MW	1
8	6000 MW	1,020 p.u.	1,018 p.u.	7000 MW	6994 MW	4

É possível observar que o desempenho do subsistema é melhor, com menos iterações (it.), quando os valores desejados para o ajuste são mais próximos do ponto base fornecido. Variações maiores exigem muitas mudanças no sistema, o que aumenta a chance de não convergência. Nesse ponto é extremamente importante o papel do analista, em fornecer ao sistema automático casos de fluxo de potência adequados ao objetivo e com margem para realizar as variações necessárias. Quando é necessário mudar drasticamente a condição do sistema, convém que o analista prepare casos adicionais, de forma que o subsistema possa partir de um ponto de operação mais próximo do desejado.

O subsistema de ajuste automático do fluxo de potência se mostrou eficiente em ajustar cerca de 90% dos casos pretendidos, sendo os 10% restantes relacionados a casos mais extremos, com esgotamento dos recursos de geração e de controle de tensão.

O subsistema de simulação dinâmica, além de determinar as referências, também gera uma tabela de resultados para todos os casos simulados, indicando os valores das grandezas monitoradas, quais os critérios foram violados e em quais barras. Essa função do subsistema também pode ser usada de forma separada, para analisar o resultado de uma série de arquivos de plotagem do Anatem (.plt) já simulados.

Tabela 4 – Resultado da simulação dinâmica e análise do resultado.

UG	Desl.	FSE	VT	I _{excitação}	Máx _{oscilação}	V _{regime}	PPS-TP	Resultado
8	0	6690 MW	1,018 p.u.	2,074 p.u.	1,954%	0,905 p.u.	Violou	Reprovado
8	1	6690 MW	1,018 p.u.	1,991 p.u.	0,796%	0,905 p.u.	-	Aprovado
8	1	6891 MW	1,019 p.u.	2,006 p.u.	1,435%	0,927 p.u.	Violou	Reprovado
8	2	6891 MW	1,019 p.u.	1,915 p.u.	0,812%	0,955 p.u.	-	Aprovado
9	0	6398 MW	1,020 p.u.	2,118 p.u.	0,955 %	0,911 p.u.	-	Reprovado
9	1	6398 MW	1,020 p.u.	2,031 p.u.	0,392 %	0,940 p.u.	-	Aprovado
9	1	6992 MW	1,021 p.u.	2,057 p.u.	1,406 %	0,920 p.u.	Violou	Reprovado
9	2	6992 MW	1,021 p.u.	1,966 p.u.	1,902 %	0,947 p.u.	-	Aprovado
9	2	7100 MW	1,021 p.u.	1,974 p.u.	1,824 %	0,941 p.u.	Violou	Reprovado
9	3	7100 MW	1,021 p.u.	1,885 p.u.	0,441 %	0,958 p.u.	-	Aprovado

A Tabela 4 mostra um exemplo de parte da tabela de resultado do subsistema de simulação dinâmica e análise do desempenho, onde o objetivo era ajustar as referências de FSE para a lógica 2IATP, correspondente ao desligamento de duas linhas de 765 kV no trecho entre Itaberá e Tijuco Preto. Nesta tabela é possível observar o resultado da análise, se o caso foi aprovado ou reprovado, e qual critério foi violado, como por exemplo a elevada corrente de excitação (lexc) nas unidades geradoras de Itaipu 60 Hz e a possibilidade atuação da PPS da linha de 765 kV remanescente no trecho Itaberá-Tijuco Preto (PPS-TP).

O subsistema de simulação dinâmica e avaliação do desempenho mostrou resultados satisfatórios, sendo capaz de determinar referências para todos os casos. Nesse ponto vale também destacar a importância do papel do analista, que deve realizar uma análise qualitativa dos resultados.

Dessa forma, comprovada a eficácia do aplicativo desenvolvido partiu-se para realizar o ajuste das referências das seguintes lógicas:

- 1FIIVIATP: Contingência tripla envolvendo o desligamento de uma LT FI-IV, uma LT IA-IV e uma LT IA-TP;
- 1FIIV1CVO: Contingência dupla envolvendo uma LT FI-IV e uma LT FI-CVO;
- 2IATP: Contingência dupla envolvendo duas LT IA-TP.

Os resultados obtidos para 10 unidades geradoras sincronizadas em Itaipu 60 Hz são mostrados Tabela 5. É possível observar os valores de referência para as lógicas, ou seja, os valores de fluxo a partir dos quais é necessário o desligamento de uma ou mais unidades geradoras de Itaipu 60 Hz para que o sistema suporte as contingências.

Tabela 5 – Referência para as lógicas com 10 UG sincronizadas em Itaipu 60 Hz.

Contingência	Desligamento 1UG	Desligamento 2UG	Desligamento 3UG
1FIIVIATP	GIPU – 6900 MW	GIPU – 7200 MW	-
1FIIV1CVO	GIPU – 6500 MW	GIPU – 7000 MW	GIPU – 7300 MW
2IATP	FSE – 5600 MW	FSE – 6500 MW	FSE- 7100 MW

Também se observa que não há ajuste para o desligamento de três unidades geradoras pela lógica 1FIIVIATP, isso em função de que dentre os casos de fluxo de potência analisados, o desligamento de duas unidades geradoras foi suficiente para atender os critérios de desempenho estabelecidos.

5.0 - CONCLUSÕES

O SEP 765 kV desempenha um papel fundamental na manutenção da estabilidade do SIN-BR frente a contingências no sistema de 765 kV e necessita estar sempre bem ajustado, evitando o risco de perda de estabilidade ou o desligamento desnecessário de unidades geradoras .

A avaliação das lógicas do SEP 765 kV é uma atividade de grande complexidade, a qual exige dos analistas um elevado esforço no sentido de efetuar centenas simulações, alterando parâmetros de regime permanente e dinâmicos de forma redundante e exaustiva. Neste contexto, este trabalho propôs a elaboração de um sistema automático que viabiliza a realização do ajuste das lógicas com maior agilidade e facilidade para os analistas.

O sistema automático foi implementado em Matlab e executa os aplicativos Anarede e Anatem com o intuito de determinar as referências do SEP de 765 kV. Foi necessário desenvolver uma lógica *Fuzzy* para o ajuste de tensão e fluxos necessários às simulações.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, tanto do módulo de ajuste automático do fluxo de potência como do módulo de simulação dinâmica e de análise dos resultados.

O sistema desenvolvido foi voltado para realizar as análises no sistema de transmissão de 765 kV, com foco no SEP 765 kV. Ainda assim, poderia ser facilmente adaptado para realizar avaliações de limites ou referências de outros SEPs, considerando diferentes variáveis do sistema e diferentes critérios de análise de desempenho.

De forma geral, o emprego do sistema automático reduz o tempo dispensado pelo analista na realização de um grande número de simulações, facilitando seu trabalho, além de reduzir a chance de erro humano nas análises dos resultados. Embora o sistema forneça resultados automáticos, a participação do analista continua sendo fundamental, desde o fornecimento de dados de entrada coerentes até a análise dos resultados obtidos.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS. RE 3-172/2014 – **Sistemas Especiais de Proteção – SEP Associado ao Tronco de Transmissão de 765 kV – Relatório do Implantação**, 2017.
- [2] FARIAS, A. L., **Esquema de Controle de Emergências na Configuração Final do Sistema de Transmissão de 750 kV**. XVI SNPTEE, 2001.
- [3] SILVA, R. J., **Expert System for 765 kV Transmission System Load Flow Adjustmet**. VI SEPOPE, 1998.
- [4] GUARINI, M. C. **Análise de Segurança de Esquemas de Proteção para Sistemas Elétricos de Potência**. [S.I.]. Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.
- [5] SILVA, J. C., **Sistema Automático para Ajuste das Lógicas do Sistema Especial de Proteção do Tronco de 765 kV Associado à Itaipu 60 Hz**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Paraná, Foz do Iguaçu. 2018.
- [6] GODOY, P. T., **Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Ajuste do Fluxo de Potência do Sistema de Transmissão que Interliga Usina de Itaipu ao Sistema Interligado Nacional Brasileiro para Análises de Contingência**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Paraná, Foz do Iguaçu, 2017.
- [7] ZADEH, L. A., **Outline of a New Approach to the Analysis of Complex System and Decision Process**. IEEE Transactions on Systems, 1973.
- [8] TAKAGI, T. E S..M, **Derivation of Fuzzy Control Ruçes From Human Operator’s Control Action**. IFAC Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis, Marseille, 1983.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Jhenyfer Caroline da Silva. Nasceu em 1994 na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná. Ingressou no curso de Engenharia Elétrica na Universidade Estadual do Oeste do Paraná em 2014. Durante a graduação participou de diversos projetos de pesquisa e extensão, tais como Aerodesign (Projeto e concepção de Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT), Baterias de Sódio, Arduino, etc. Em 2017 foi estagiária do Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), onde desenvolveu projetos e pesquisas relacionados a geração distribuída e sistemas distribuição, além de auxiliar na elaboração de novos projetos de P&D na área de energias renováveis com ênfase em biogás. Em 2018, iniciou um novo estágio na Usina Hidrelétrica Itaipu Binacional, onde desenvolveu o presente trabalho. Em Fevereiro de 2019, graduou-se em Engenharia Elétrica.

André Pagani Tochetto (pagani@itaipu.gov.br). 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.

Robson Almir de Oliveira. Natural de Itajubá, MG. Graduou-se em engenharia elétrica em 1997 e concluiu 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 realização de estudos elétricos m regime permanente, dinâmico e transitório, sistemas de proteção e controle (sistemas SCADA/SEM, CAG, CAT, regulação primária de tensão e velocidade). Também é professor assistente da UNIOESTE desde 2002, ministrando aulas de Proteção, Operação e Estabilidade de sistemas elétricos de potência.