



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

### DESENVOLVIMENTO DE NOVO MÉTODO DE CÁLCULO DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE FLUXOS NO PROGRAMA ANAREDE

**PAULA OLIVEIRA LA GATTA(1); RENAN PINTO FERNANDES(1); LEONARDO PINTO DE  
ALMEIDA(1); FLÁVIO RODRIGO DE MIRANDA ALVES(1)  
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1)**

#### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar a implementação, no programa Anarede, de uma nova metodologia para análise de sensibilidade de fluxos, para contemplar diversos desenvolvimentos do fluxo de potência, como estruturas de controle inseridos na matriz jacobiana. O objetivo dessa implementação é a de tornar mais aderentes os resultados da análise de sensibilidade com aqueles encontrados pela intervenção manual do usuário. Os resultados, obtidos a partir de um caso do Sistema Interligado Nacional, mostram a importância da representação dos controles para o cálculo dos fatores de sensibilidade e sua coerência com aqueles obtidos a partir do despacho manual dos geradores.

#### PALAVRAS-CHAVE

Fluxo de Potência, Sensibilidade de Fluxos, Anarede.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

A análise de sensibilidade dos sistemas de potência consiste na avaliação do impacto no comportamento do sistema frente à variação incremental em uma de suas grandezas, como tensão nos barramentos, geração, carga, ou alterações nos parâmetros da rede. É usada para antever tendências no sistema, prevendo pontos onde possa ocorrer sobrecargas e como a injeção em determinados pontos afeta o sistema.

A sua modelagem, na literatura, pode ser feita tanto a partir da solução de um fluxo de potência linear quanto do fluxo de potência não-linear. O fluxo de potência linear é usado para a análise de sensibilidade de fluxos com relação a injeção de potência nas barras, quando o impacto da magnitude de tensão nesses fatores pode ser desprezado. Por outro lado, a análise de sensibilidade a partir do fluxo de potência não-linear leva em consideração tanto as equações de potência ativa quanto reativa para o seu cálculo.

Devido à sua importância para a avaliação de regime permanente de sistemas de potência, o programa de Análise de Redes Anarede, desenvolvido pelo CEPEL, dispõe de uma série de tipos de avaliações de sensibilidade, como a de tensão, de fluxos e de retirada de circuitos. Mais especificamente, a sensibilidade de fluxos visa obter os fatores de variação de fluxo de potência ativa e reativa dos circuitos monitorados frente a um degrau de variação de geração ou carga. Neste caso, é possível avaliar quais circuitos que são mais afetados por uma súbita alteração no patamar de geração ou carga em pontos específicos no sistema, uma possível sobrecarga ou até mesmo uma inversão de fluxo.

O cálculo de fatores de sensibilidade de fluxos, na teoria de análise de sistemas de potência, é chamado de fatores de variáveis dependentes funcionais, que são aquelas variáveis cuja sensibilidade não é diretamente obtida da matriz jacobiana invertida a partir de um ponto de operação. Para este tipo de cálculo, primeiro deve-se linearizar as equações de potência em torno de um ponto de operação convergido, em função das tensões complexas dos barramentos que receberam o degrau de injeção. Depois, avalia-se o degrau de potência, no sistema linearizado do fluxo de potência, para determinar a variação que ocorre no ponto de operação.

Geralmente, nas avaliações de sensibilidade de fluxos, usa-se a matriz original do fluxo de potência, sem levar em consideração os controles normalmente presentes e modelados no problema. Porém, é possível afirmar que a característica de regime permanente dos controles influencia o ponto de operação determinado pelo fluxo de potência, e assim, impacta também no cálculo de variação das variáveis de estado no cálculo de sensibilidades. Desta forma, pode-se concluir que o comportamento das equações de controle é importante para o cálculo de fatores para análise de sensibilidade de fluxos.

Em função disso, não é incomum que o usuário do programa, ao realizar uma análise de sensibilidade, encontrar dificuldades em entender o comportamento do sistema. Em alguns casos, o usuário observa um resultado diferente de quando ele aplica, manualmente, o desbalanço estudado em relação ao que seria antecipado pela análise de sensibilidade. Essa diferença se dará nos cenários em que a atuação de controles for particularmente proeminente em relação à resposta natural do sistema, geralmente esperado em sistemas mais limítrofes ou críticos.

Neste sentido, foi implementada, no programa Anarede, uma nova metodologia para análise de sensibilidade de fluxos, para contemplar diversos desenvolvimentos do fluxo de potência, como estruturas de controle inseridos na matriz jacobiana, a fim de tornar mais aderentes os resultados da análise de sensibilidade com aqueles encontrados pela intervenção manual do usuário. Os resultados obtidos a partir da nova metodologia serão comparados com aqueles obtidos por meio do método tradicional e com o despacho feito de forma manual para dois sistemas: um caso IEEE de 118 barras e um caso real do Sistema Interligado Nacional (SIN). Será verificado que a representação da atuação de controles para o cálculo dos fatores de sensibilidade traz mais fidelidade aos resultados obtidos.

## 2.0 MODELAGEM PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE FLUXOS

A sensibilidade de fluxos visa a determinação dos fatores de variação de fluxo de potência ativa em um ou mais circuitos, quando há a variação de geração de potência ativa em um dado barramento de geração. Nesta seção, serão abordadas tanto a metodologia tradicional de cálculo de fatores de sensibilidade de fluxos quanto a metodologia proposta.

### 2.1 Metodologia Tradicional

A sensibilidade de fluxos de potência ativa está categorizada, na literatura sobre análise de sensibilidade, como variável dependente funcional, pelo fato de que seus fatores não podem ser calculados diretamente a partir da matriz jacobiana do problema de fluxo de potência não-linear. Dessa forma, para se determinar os fatores de variação de fluxo  $\Delta P_{km}/P_{Gi}$  em um circuito  $k-m$ , a partir da variação de geração de potência ativa em uma dada barra de geração  $i$ , é necessário, primeiramente, fazer a linearização da equação do fluxo de potência  $P_{km}$ , em torno de um ponto de operação  $(\underline{V}, \underline{\theta})$  conforme a equação abaixo, obtida utilizando-se os fatores de primeira ordem da Série de Taylor:

$$\Delta P_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \Delta V_m \quad (1)$$

Feita a linearização, é possível observar que a equação (1) depende das variações de magnitude de tensão e ângulo para uma dada perturbação na rede. Dessa forma, é utilizado o sistema linearizado do problema de fluxo de potência para encontrar essas variações. O sistema linearizado é construído a partir do ponto de operação  $(\underline{V}, \underline{\theta})$ , como mostrado em (2).

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{H} & \underline{N} \\ \underline{M} & \underline{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ao inverter a matriz jacobiana e multiplicar pelo vetor de resíduos das equações de potência, tem-se o sistema a ser resolvido para a determinação das correções das variáveis de tensão em magnitude e fase.

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{H} & \underline{N} \\ \underline{M} & \underline{L} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

De posse do sistema linearizado, o vetor de resíduos  $\Delta \underline{P}$  e  $\Delta \underline{Q}$  utilizados são aqueles apresentados em (4). Neste caso, os vetores são zerados, e é incluído o 1 na posição do  $i$ -ésimo gerador que tem sua injeção alterada para o cálculo de sensibilidade. Incluir 1 na posição do  $i$ -ésimo gerador equivale a simular um aumento de 100 MW de geração no barramento escolhido, se a base de potência do sistema é 100 MVA.

$$\begin{aligned} \Delta \underline{P} &= [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0]^T \\ \Delta \underline{Q} &= [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \end{aligned} \quad (4)$$

Resolvido então o sistema linearizado em (3), é possível utilizar as correções nas variáveis de tensão em magnitude e fase na equação em (1) para o cálculo dos fatores de sensibilidade  $\Delta P_{km}/P_{Gi}$ .

É importante observar que o modelo tradicional de cálculo de sensibilidade de fluxos de potência ativa leva em consideração apenas as equações de potência ativa e reativa do problema de fluxo de potência. Isso quer dizer que a metodologia parte da premissa que o sistema a ser analisado seria modelado apenas pelas equações de fluxo de potência, sem a atuação dos controles frente à variação de geração de potência ativa. Em outras palavras, o modelo

parte da premissa que, para o cálculo dos fatores  $\Delta P_{km}/P_{Gi}$ , a rede seria modelada apenas pelas equações de potência ativa e reativa. Esta constatação é muito importante, principalmente quando o ponto de operação analisado se encontra muito sensível à atuação dos controles. Neste caso, o resultado da análise de sensibilidade pode se tornar menos aderente quando comparado ao resultado do despacho de potência ativa feito de forma manual.

## 2.2 Metodologia Proposta

A metodologia proposta consiste em substituir o sistema linearizado a ser utilizado para o cálculo das correções nas variações de tensão em magnitude e fase. Ao invés de usar o sistema mostrado em (2), o modelo utiliza o sistema apresentado em (5). A diferença entre os dois sistemas é a presença do vetor de erros das equações de controle  $\Delta y$ , bem como as derivadas não nulas das equações de controle e o novo vetor de correções das variáveis de controle  $\Delta x$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & \mathbf{J}_{Px} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & \mathbf{J}_{Qx} \\ \mathbf{J}_{y\theta} & \mathbf{J}_{yV} & \mathbf{J}_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (5)$$

De posse do sistema linearizado em (5), é possível inverter a matriz jacobiana expandida pelas equações de controle e determinar os novos vetores de correções das variáveis de estado. Os vetores de erros das equações usados são aqueles mostrados em (7), onde a  $i$ -ésima posição em  $\Delta P$  recebe valor igual a 1 para calcular as correções nas variáveis de estado quando recebe uma variação de 1 p.u. de geração de potência ativa. As demais posições do vetor, quanto das posições dos vetores de resíduos de potência reativa e das equações de controle são zeradas.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & \mathbf{J}_{Px} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & \mathbf{J}_{Qx} \\ \mathbf{J}_{y\theta} & \mathbf{J}_{yV} & \mathbf{J}_{yx} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0]^T \\ \Delta Q &= [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \\ \Delta y &= [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \end{aligned} \quad (7)$$

É importante observar que, para este modelo utilizando o sistema linearizado em (6), a análise de sensibilidade de fluxos utiliza as derivadas não nulas das equações de controle para a determinação das correções nas variáveis de estado  $\Delta \theta$  e  $\Delta V$ . Além disso, ela utiliza as equações de controle que são resolvidas por dentro da matriz jacobiana do método de solução de Newton. Portanto, no programa Anarede, os seguintes controles serão considerados:

- Controle de tensão em barra remota, com o uso da opção CREM;
- Controle de tensão por *tap* de transformador, com o uso da opção CTAP;
- Controle de tensão por bancos *shunt* chaveados automaticamente, com o uso da opção CSCA;
- Controle de tensão por faixa de tensão, com o uso da opção CTAF;
- Controle de corrente ou potência pelo ângulo de transformadores defasadores, com o uso da opção CPHS;
- Representação dos elos de corrente contínua, por meio da opção CELO;
- Fluxo de potência com regulação primária, com o uso da opção FREQ;
- Controle de tensão por compensadores estáticos de reativos;
- Controle de potência, corrente ou reatância fixa por meio do compensador série controlável.

Como, no programa Anarede, os controles associados à verificação de limites de geração de potência reativa, com o uso da opção QLIM, e à verificação de limites de tensão, com o uso da opção VLIM, são representados pela estratégia de reespecificação do tipo de barra ao longo do processo de solução do fluxo de potência, eles não são considerados no cálculo de análise de sensibilidade de fluxos. O controle de elos do tipo CCC (Conversor com Capacitor de Comutação) também não é considerado na metodologia proposta, uma vez que seu controle é realizado utilizando a metodologia de ajustes alternados e não por inserção na matriz jacobiana, mesmo quando do uso da opção CELO.

A metodologia proposta foi implementada no Anarede por meio da opção de execução SNEW para a ferramenta de análise de sensibilidade de fluxos e admite a ativação ou não das opções de controle a serem consideradas na montagem da matriz de (6). Em outras palavras, o usuário pode escolher quais os controles que deverão ser utilizados durante a solução da análise de sensibilidades. Ressalta-se que os controles que estão ativados nos dados de opções padrão DOPC também são utilizados pela análise de sensibilidade pela metodologia proposta.

## 2.3 Utilização da metodologia proposta no programa Anarede

A análise de sensibilidade de fluxos, no programa Anarede, pode ser realizada por meio do código de execução EXSB em conjunto com a opção SPLI [1]. A opção SPLI modifica a régua de entrada de dados do código EXSB para fornecer ao programa os barramentos que terão sua geração incrementada para o cálculo da análise de sensibilidades. Além disso, inclui uma segunda régua para o fornecimento dos circuitos monitorados.

A metodologia tradicional para cálculo de fatores de sensibilidade de fluxos foi mantida como o método *default* de solução, e seu uso está exemplificado na Figura 1(a). Já a metodologia proposta descrita na seção 2.2 pode ser utilizada ao ativar a opção de execução SNEW em conjunto com o código de execução EXSB e a opção SPLI, conforme mostrado na Figura 2(b).

A Figura 1(a) mostra a entrada de dados para a análise de sensibilidade de fluxos de potência ativa pelo método tradicional. É possível observar pela figura que o código de execução EXSB, com a ativação da opção SPLI, admite duas régulas para a entrada de dados. A primeira régua contém os seguintes campos: NB, que se refere ao número da barra que terá sua geração aumentada e NRef é o número do barramento que será utilizado como barra de referência durante a análise de sensibilidade. Se for mantido em branco, o campo NRef tem como valor *default* o barramento de referência tal como definido no código de execução de entrada de dados de barra DBAR. Após o fechamento de entrada de dados de barra utilizando o finalizador 99999, utiliza-se a segunda régua de dados, para fornecimento dos circuitos monitorados, cujos campos são: De é uma barra de extremidade do circuito; Pa é a outra extremidade do circuito; Nc é o número do circuito; Area é o campo que, se for preenchido com o a palavra *AREA*, admite a entrada do número da área que terá seus circuitos monitorados e Nar é o número da área que terá seus circuitos monitorados. É importante observar que se o campo Area for preenchido, os campos De, Pa e Nc não devem ser preenchidos.

Ao comparar a Figura 1(a) com a Figura 1(b), observa-se que a ativação da opção SNEW não modifica as régulas de entrada de dados do código EXSB. A ativação da opção apenas modifica o método de solução utilizado pela análise de sensibilidade. Caso o usuário queira definir quais os controles serão considerados na metodologia da SNEW, ele deve inserir as respectivas opções de execução, em qualquer ordem, junto da opção SNEW. No caso apresentado na Figura 1(b) a ferramenta será executada utilizando as opções presentes no código de execução DOPC.

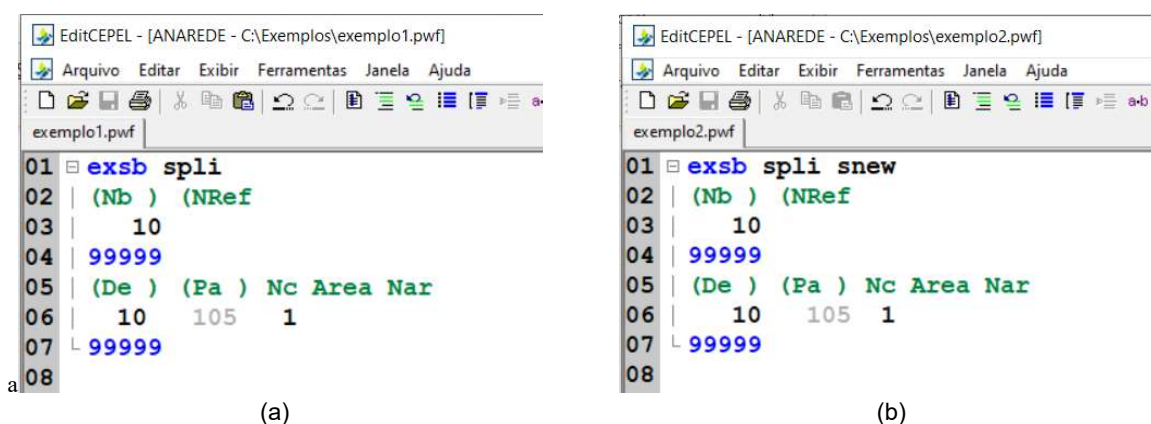


FIGURA 1 – Entrada de dados para análise de sensibilidade de fluxos no programa Anarede: (a) método tradicional; (b) metodologia proposta

### 3.0 RESULTADOS

Esta seção tem por objetivo apresentar os resultados provenientes da metodologia proposta. Estes resultados serão comparados com aqueles obtidos pelo método tradicional de cálculo de fatores de sensibilidade e pelo despacho feito de forma manual. Primeiro será feito um estudo de sinal dos fatores de sensibilidade, em sequência serão apresentados os resultados para o sistema IEEE de 118 barras e por fim, serão apresentados os resultados para um caso do SIN.

#### 3.1 Estudo do Sinal dos Fatores de Sensibilidade

Para o estudo do sinal de sensibilidade, foi utilizado um caso do 3º quadrimestral de 2021, carga pesada, disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) em [2]. O circuito monitorado foi o circuito de Araraquara2 para Araraquara 440 kV, e a barra de referência usada tanto para a solução do fluxo de potência quanto da análise de sensibilidade foi a UHE de Paulo Afonso.

A Figura 2(a) mostra o ponto de operação, no caso base, do circuito monitorado. Se for feito um acréscimo manual de 100 MW no despacho de geração de potência ativa na usina de Água Vermelha (barramento de número 500), o novo ponto de operação para o circuito monitorado é mostrado na Figura 2(b). Por meio da comparação entre as Figuras 2 (a) e (b), observa-se que, o aumento de geração no barramento de Água Vermelha fez com que o fluxo de potência ativa no circuito de Araraquara diminuisse em 6 MW, tanto no sentido 7058-559-1 quanto para o sentido 559-7058-1.

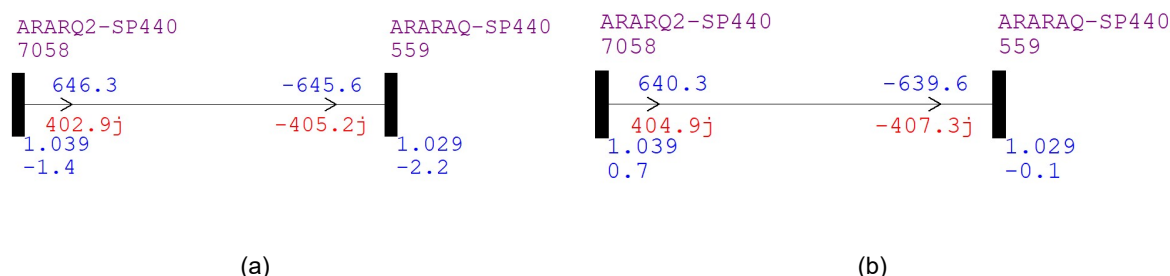


FIGURA 2 – Pontos de operação do circuito 7058-559-1: (a) caso base (b) aumento de 100 MW de geração na barra 500.

As Figuras 3 e 4 mostram os resultados provenientes da metodologia proposta para o cálculo dos fatores de sensibilidade para o circuito monitorado nos dois sentidos do fluxo. É importante notar que, independente do sentido do fluxo, ambas as sensibilidade calculadas foram negativas. O sinal negativo da sensibilidade denota, portanto, que o acréscimo de geração na barra faz com que o fluxo no sentido do circuito monitorado se reduza. Por outro lado, se o sinal da sensibilidade for positivo, isso significa que a injeção de potência na barra faz com que se aumente o fluxo no sentido do circuito monitorado. Ressalta-se que o estudo do comportamento do sinal tem o mesmo comportamento na metodologia original da análise de sensibilidade de fluxo.

C I R C U I T O S   M O N I T O R A D O S				
B A R R A	INJECAO	7058		
	CASO BA	559		
NUM.	NOME	TIPO SE (MW)	1	
500	A.VERMUE003	GERA	530.00	-6.0

FIGURA 3 – Fator de sensibilidade para o circuito no sentido do fluxo 7058-559-1

C I R C U I T O S   M O N I T O R A D O S				
B A R R A		INJECAO	559	
		CASO BA	7058	
NUM.	NOME	TIPO SE (MW)	1	
500	A.VERMUHE003	GERA	530.00	-6.0

FIGURA 4 – Fator de sensibilidade para o circuito no sentido do fluxo 559-7058-1

Como a análise de sensibilidade é calculada em percentual no programa Anarede, a variação de potência ativa gerada é 100 MW e a base do sistema é 100 MVA, então o resultado mostrado no relatório é numericamente equivalente à diferença em MW no fluxo de potência ativa no circuito monitorado para o acréscimo de potência considerado.

### 3.2 Sistema IEEE de 118 barras

Esta seção tem por finalidade apresentar os resultados obtidos por meio da metodologia tradicional e proposta para o sistema IEEE de 118 barras [3]. Foram escolhidos 3 barramentos do sistema para o estudo do acréscimo de potência ativa e 6 circuitos monitorados, dados estes que podem ser vistos na Tabela 1. Os fatores de sensibilidade foram calculados utilizando a metodologia tradicional e proposta, sendo que não foi utilizado nenhum dado de controle durante a solução das sensibilidades pelo método proposto. Além disso, foi feita também a análise manual da adição de 100 MW de potência ativa na geração dos barramentos. Desta forma, procurou-se verificar a variação de fluxo de potência nos circuitos monitorados antes e depois do acréscimo de despacho de potência.

A Tabela 1 mostra os resultados de sensibilidade e despacho manual para o sistema. Adicionalmente, mostra também o erro, em percentual, da diferença entre o resultado obtido pelo método proposto (SNEW) e pelo despacho manual. Observa-se, pela tabela, que a diferença entre a variação de fluxo nos circuitos com relação à sensibilidade

SNEW é bem baixa, chegando a erros de até 7 %, com exceção do fator de sensibilidade 82-83-1 com relação ao barramento 10. Como a sensibilidade desse circuito é muito baixa para injeções no barramento 10, o erro calculado acaba sendo alto. Mas em termos de variação de MW no circuito, há apenas um erro de 0,1 MW.

TABELA 1 – Resultados para o sistema IEEE 118 barras

Barra	Método	Circuito (DE - PARA - NUM)					
		8 - 30 - 1	26 - 25 - 1	64 - 65 - 1	68 - 81 - 1	69 - 77 - 1	82 - 83 - 1
10	Tradicional	71,00	11,90	-1,90	-8,30	-9,70	0,20
	SNEW	71,00	11,90	-1,90	-8,30	-9,70	0,20
	Manual	70,60	11,80	-1,80	-8,10	-9,50	0,10
	Erro [%]	<b>0,57</b>	<b>0,85</b>	<b>5,56</b>	<b>2,47</b>	<b>2,11</b>	<b>100,00</b>
26	Tradicional	-1,80	44,50	-1,60	-6,60	-9,70	0,10
	SNEW	-1,80	44,50	-1,60	-6,60	-9,70	0,10
	Manual	-1,80	44,70	-1,60	-6,50	-9,50	0,10
	Erro [%]	<b>0,00</b>	<b>-0,45</b>	<b>0,00</b>	<b>1,54</b>	<b>2,11</b>	<b>0,00</b>
89	Tradicional	0,00	0,30	1,50	44,20	-31,30	30,30
	SNEW	0,00	0,30	1,50	44,20	-31,30	30,30
	Manual	0,00	0,30	1,40	42,90	-30,20	29,70
	Erro [%]	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>7,14</b>	<b>3,03</b>	<b>3,64</b>	<b>2,02</b>

Pela tabela, observa-se também que os resultados dos fatores obtidos pela metodologia proposta e tradicional são idênticos. Como a sensibilidade proposta não levou em consideração nenhuma equação de controle para seu cálculo, os fatores provenientes do SNEW e da metodologia se tornam aderentes.

### 3.3 Caso do Sistema Interligado Nacional

Nesta seção, será utilizado o mesmo caso usado na seção 3.1 de estudo de sinal da sensibilidade. Neste caso, os fatores de sensibilidade serão estudados para o circuito de Araraquara2 para Araraquara 440 kV para avaliação de acréscimo de despacho de potência ativa em diversas usinas do SIN, como pode ser visto pela Tabela 2. Para este estudo, os fatores de sensibilidade de fluxo foram obtidos por meio da metodologia proposta e tradicional. Com relação à metodologia proposta, foram utilizados todos os controles ativados no caso por meio do código de execução DOPC. Além disso, foram avaliadas também as diferenças de fluxos antes e depois de um acréscimo manual de 100 MW de potência ativa nos geradores da Tabela 2. Destaca-se que o fluxo de potência ativa no circuito monitorado, no sentido 7058-559-1 é de 646,3 MW no caso base, de modo que a coluna “Diferença” apresenta a diferença no fluxo de potência ativa após o degrau manual de 100 MW em relação ao valor do caso base.

TABELA 2 – Comparação dos resultados para o caso do SIN

Barra NUM	NOME	Sensibilidade		Despacho Manual		Barra NUM	NOME	Sensibilidade		Despacho Manual	
		SNEW	TRAD.	FLUXO	DIFERENÇA			SNEW	TRAD.	FLUXO	DIFERENÇA
16	FURNASUHE004	-0,3	-3,2	646,0	-0,3	514	CHAVANUHE002	-3,8	-6,9	642,5	-3,8
12	LCBARRUHE003	-0,3	-3,2	646,0	-0,3	507	CAPIVAUHE002	-4,0	-7,0	642,3	-4,0
20	MARIMBUHE004	1,6	-1,4	647,8	1,5	513	TAQUARUHE003	-4,5	-7,5	641,8	-4,5
500	A.VERMUHE003	-6,0	-8,9	640,3	-6,0	516	BBONITUHE002	-9,3	-12,4	637,1	-9,2
300	EMBORCUHE002	-0,1	-2,7	646,2	-0,1	517	IBITINUHE002	-11,3	-14,2	635,2	-11,1
18	ITUMBIUHE003	0,0	-2,7	646,3	0,0	4300	TLGA-GUTE002	-9,0	-11,9	637,3	-9,0
303	SSIMAOUHE003	-1,4	-4,2	644,8	-1,5	4301	TLGB-GUTE002	-9,0	-11,9	637,3	-9,0
501	I.SOLTUHE013	-10,4	-13,3	636,0	-10,3	800	GBMUNHUHE004	0,1	-3,0	646,3	0,0
502	JUPIA-UHE005	-9,2	-12,2	637,1	-9,2	904	ITA---UHE005	0,0	-3,0	646,3	0,0
503	JUPI--UHE001	-9,0	-11,9	637,3	-9,0	7057	ARARQ2-SP500	13,5	10,4	659,7	13,4
510	PPRIMAUHE006	-4,5	-7,5	641,8	-4,5						

Os resultados da Tabela 2 mostram que os fatores de sensibilidade para cada barramento de geração obtidos pelo método de solução SNEW são aderentes à variação de fluxo calculado por meio da avaliação manual de acréscimo de geração. Além de mostrar corretamente a tendência de comportamento do sistema frente à alteração de geração dos barramentos, os fatores calculados pelo SNEW também indicaram corretamente os sinais dessa variação, que é muito importante para saber o sentido de variação desses fluxos (se o acréscimo de geração tende a aumentar ou diminuir o fluxo no circuito monitorado).

Pode-se exemplificar a importância da representação dos controles na aderência dos resultados entre a análise de sensibilidade e a forma manual de cálculo por meio dos resultados de fatores para a barra de Marimbondo, de numeração 20. É possível observar que o fator calculado pelo método SNEW é da mesma ordem de grandeza da diferença de fluxo calculada manualmente e, além disso, carrega o mesmo sinal de sentido de variação desse fluxo. A diferença entre o fator calculado pelo método SNEW e o método tradicional pode ser explicado pela representação dos controles no primeiro, que tem influência ativa no cálculo desse fator.

As Figuras 5 e 6 mostram uma avaliação feita de forma manual por meio da variação do despacho dos geradores da Tabela 2 para analisar a viabilidade da análise de sensibilidade de fluxos aplicada a casos com o mesmo comportamento. Portanto, foram feitos os acréscimos manuais de 10 MW, 50 MW, 100 MW e 200 MW de geração de potência ativa nos barramentos, e os resultados de variação de fluxos de potência ativa antes e depois do aumento de geração estão mostrados na Figura 5. A Figura 6 mostra, para os barramentos de Furnas, Ibatinga, Marimbondo e Capivara as variações de fluxos em um gráfico de linhas. Esta figura mostra que, para os despachos analisados, as variações de fluxos variam quase que linearmente. Em outras palavras, isso significa que a análise de sensibilidade, sendo uma avaliação baseada na linearização das equações de fluxo de potência, é um bom modelo preditor do comportamento do sistema frente à variação de 100 MW de geração de potência ativa.

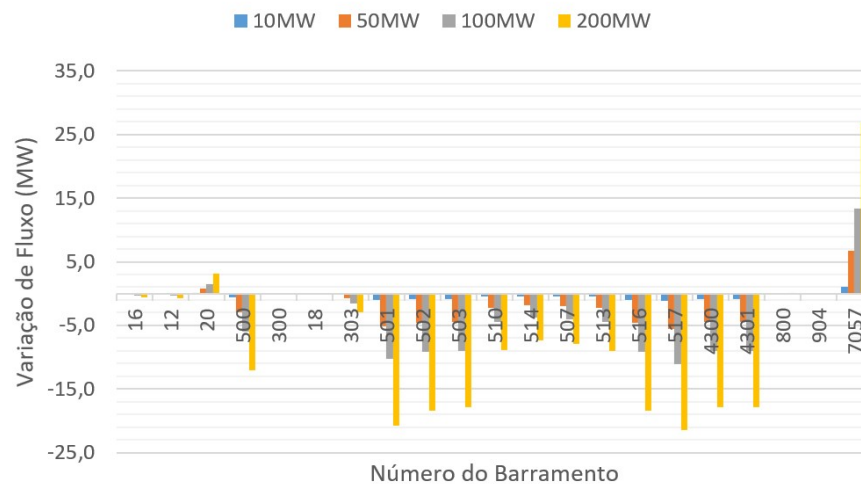


FIGURA 5 – Variação de despacho nos barramentos do caso do SIN



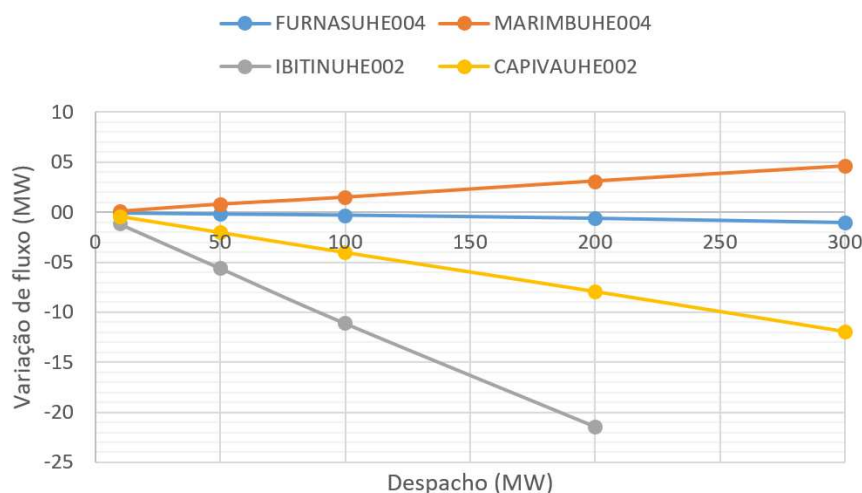


FIGURA 6 – Variação de fluxos por despacho para os barramentos de FURNAS, Ibitinga, Marimbondo e Capivara

#### 4.0 CONCLUSÕES

Este trabalho procurou apresentar a implementação de uma nova forma de solução de cálculo de fatores de sensibilidade de fluxos por variação de geração de potência ativa no programa Anarede. Foi mostrado que a nova metodologia leva em consideração os controles ativados via opções de execução na solução desses fatores. O método tradicional de solução dos fatores de sensibilidade de fluxos continua sendo fornecido pelo código de execução EXSI e pela ativação da opção SPLI, enquanto a metodologia proposta pode ser utilizada via a ativação da opção SNEW.

A metodologia proposta foi avaliada a partir dos sistemas IEEE 118 barras e de um caso do 3º quadrimestral fornecido pelo ONS. Por meio do sistema teste, foi possível concluir que a metodologia proposta é equivalente à metodologia tradicional, pois os resultados comparativos foram aderentes entre si. Esse resultado era esperado visto que não foram utilizados equipamentos de controle na solução dos fatores via a proposta SNEW. Por outro lado, a avaliação do caso do SIN mostrou que os resultados obtidos pela metodologia proposta foram aderentes à avaliação manual do despacho de potência ativa nos barramentos avaliados, visto que levou em consideração os controles que estavam ativados no caso para a solução dos fatores.

Destaca-se por fim, que o usuário tem autonomia para escolher os controles que deseja analisar no cálculo dos fatores de participação a partir do método SNEW, bastando ativar as opções dos respectivos controles no código de execução EXSB ou via o código de execução de entrada de opções padrão DOPC.

#### 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALVES, F.R.M.; FERNANDES, R.P. e LA GATTA, P.O.. “Manual do Usuário do programa Anarede versão 11.5.5”, Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.
- [2] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. “Casos de Referência – Quadrimestral”, visitado em: setembro de 2021, Disponível em: <http://www.ons.org.br/>.
- [3] SISTEMA IEEE 118 BARRAS. Disponível em: [IEEE 118-Bus System - Illinois Center for a Smarter Electric Grid \(ICSEG\)](http://www.icseg.org/).



## DADOS BIOGRÁFICOS



Paula Oliveira La Gatta é engenheira eletricista formada pela Universidade Federal de Viçosa em 2009 e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, em 2012. Atualmente, é doutoranda em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Além disso, trabalha desde 2015 no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel – fazendo parte da equipe de desenvolvimento do programa Anarede. As suas áreas de atuação abrangem a análise de regime permanente de sistemas de potência com o fluxo de potência, representação de esquemas de controle no problema de fluxo de potência e estabilidade de tensão.

### (2) RENAN PINTO FERNANDES

Renan Pinto Fernandes é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desde 2014, onde trabalha como parte da equipe de desenvolvimento do programa Anarede. Possui graduação (2012) e mestrado (2014) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Tem experiência nas áreas de análise de sistemas de potência, em regime permanente e dinâmico, e em planejamento da expansão e da operação. Foi Presidente do Capítulo PES do IEEE entre 2016 e 2019.

### (3) LEONARDO PINTO DE ALMEIDA

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 2000, obteve o título de Mestre na área de Sistemas de Potência na COPPE/UFRJ em 2004. Desde 1998 trabalha no CEPEL. Tem se dedicado à realização de estudos elétricos de sistemas de potência solicitados por diferentes agentes do Setor Elétrico Brasileiro. Participou dos estudos do Projeto de Transmissão em HVDC para as usinas do rio Madeira, e mais recentemente, da usina de Belo Monte. É membro do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil. Principais áreas de interesse: Transmissão HVDC, FACTS, Controle em Sistemas de Potência, Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos e Fasores Dinâmicos.

### (4) FLÁVIO RODRIGO DE MIRANDA ALVES

Flávio Rodrigo de Miranda Alves nasceu no Rio de Janeiro em 15 de Março de 1963. Graduado em Engenharia Elétrica pela UFF em 1986 e em Ciência da Computação pela UFRJ em 1987, possui mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação (1992) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007), ambos pela COPPE/UFRJ. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – desde 1987, atuando no desenvolvimento de aplicações computacionais para operação e planejamento de sistemas elétricos de potência. Atualmente chefia o Departamento de Redes Elétricas – DRE. É membro do IEEE e do CIGRE.