



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

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE TRÊS ENROLAMENTOS EM FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO USANDO O FLUPOT

BEATRIZ NOGUEIRA LEVY(1); JAVIER RUBEN OJEDA SOTO(1); LUCIANO DE SOUZA MOULIN(1); ELDER GERALDO SALES DE SANT'ANNA(2)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1); OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO ONS(2)

RESUMO

Neste artigo será apresentada a implementação no FLUPOT, programa desenvolvido pelo CEPEL, de correta identificação de transformadores de três enrolamentos em paralelo quando da otimização de um fluxo de potência de forma a evitar possível circulação de reativo entre esses equipamentos. Serão realizados testes em casos exemplos que contenham esses equipamentos para a devida validação da implementação.

PALAVRAS-CHAVE

Fluxo de Potência Ótimo, Otimização, Método dos Pontos Interiores.

1.0 INTRODUÇÃO

O FLUPOT é um programa computacional desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) para a otimização de um caso de fluxo de potência, atendendo a uma função objetivo sujeita a diversas restrições, estas podendo ser tanto físicas quanto operacionais. O programa utiliza em sua solução o Método de Pontos Interiores Primal-Dual.

De forma que o FLUPOT gere um caso otimizado que seja o mais fiel possível ao comportamento real, é de suma importância que a identificação de equipamentos do sistema se aproxime o máximo possível das condições reais de operação. Caso contrário, o usuário terá que ajustar manualmente o caso otimizado pelo FLUPOT até que o caso atenda aos critérios necessários para um melhor funcionamento do sistema.

Transformadores de três enrolamentos são equipamentos que até recentemente não tinham uma representação fiel tanto para sua identificação quanto para a identificação daqueles que estão em paralelo entre si, podendo causar nesse último caso uma circulação de reativo indesejada entre os equipamentos devido a seus valores de tap não convergirem para um mesmo valor, levando o planejador e o operador a terem que ajustar manualmente o caso após a otimização de forma a corrigir esse problema.

Representar adequadamente esses equipamentos se mostrou ainda mais crucial quando da recente unificação da base de dados de curto-circuito e de *load flow*, visto que uma das deliberações dessa unificação foi a decisão de representar todos os transformadores de três enrolamentos como na base de dados de curto-circuito, ou seja, com a devida representação do terciário. Nos dados de fluxo de potência isso não era observado em diversos transformadores, o que aumentou consideravelmente o número desses equipamentos na base de dados de fluxo de potência.

Dessa forma, este trabalho mostra como foi feita a identificação dos transformadores de três enrolamentos e a identificação daqueles que estão em paralelo, mostrando ainda as adições que foram feitas à matriz do método de solução do FLUPOT para a inclusão da paralelização desses equipamentos.

Na seção de resultados, as simulações de casos do sistema elétrico brasileiro demonstram que a implementação foi satisfatória, viabilizando o ajuste mais adequado de *taps* de transformadores de três enrolamentos em paralelo, eliminando a necessidade de reajustes pelos usuários do ponto de operação após a otimização do programa.

2.0 TRANSFORMADORES DE TRÊS ENROLAMENTOS

Os transformadores de três enrolamentos, como dito anteriormente, não possuíam uma representação adequada até recentemente. Eles são modelados no sistema como três transformadores de dois enrolamentos conectados entre si por meio de uma barra fictícia (Figura 1). O FLUPOT, portanto, não enxergava esses equipamentos quando em paralelo visto que a paralelização era apenas constatada quando as barras das extremidades de um transformador fossem iguais às de outro transformador, regra esta que atende apenas aos transformadores de dois enrolamentos, não comportando os transformadores de três enrolamentos.

Para que o FLUPOT reconheça quando transformadores de três enrolamentos estão em paralelo, são necessárias três etapas:

- Identificação de transformadores de três enrolamentos;
- Identificação de transformadores de três enrolamentos em paralelo; e
- Inclusão das devidas contribuições da paralelização desses equipamentos na matriz de solução.

Cada uma dessas etapas é explicada nos próximos tópicos.

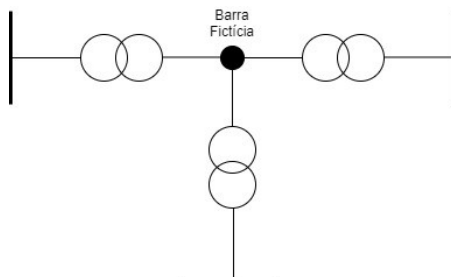


FIGURA 1 – Representação de um transformador de três enrolamentos.

3.0 IDENTIFICAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE TRÊS ENROLAMENTOS

Para que o FLUPOT reconheça um transformador como sendo de três enrolamentos, foram necessários definir diversos critérios. A seguir estão listados os critérios adotados:

- 1) O grupo base de tensão da barra fictícia deve ser 1.0 kV, 991kV ou 999kV;
- 2) O nome da barra fictícia deve terminar com "FIC" ou "000", conforme regra de nomenclatura para barras fictícias;
- 3) A barra fictícia deve ser uma barra midpoint;
- 4) A barra fictícia deve estar conectada a exatamente três outras barras;
- 5) A barra fictícia deve estar conectada apenas a transformadores; e
- 6) Os níveis de tensão das três barras conectadas à barra fictícia devem ser distintos entre si.

Em relação às condições 1 e 2, elas não precisam ocorrer ao mesmo tempo.

A barra fictícia estando conectada a outras três barras (condição 4), as condições 1 ou 2 podem estar sendo atendidas ou a barra fictícia pode estar definida como sendo uma barra midpoint (condição 3).

Esses critérios tendo sido atendidos, o transformador será considerado como sendo de três enrolamentos.

4.0 IDENTIFICAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE TRÊS ENROLAMENTOS EM PARALELO

A Figura 2 mostra um exemplo de transformadores de três enrolamentos em paralelo.

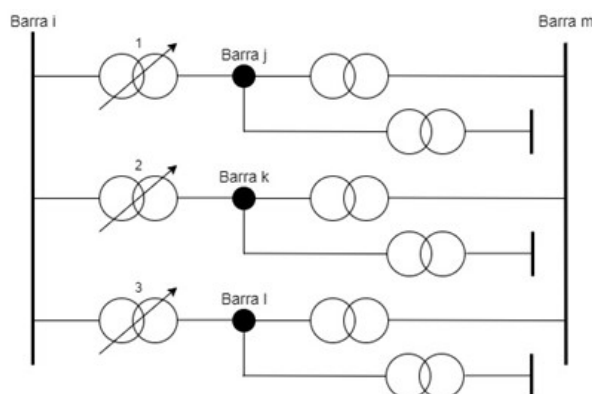


FIGURA 2 – Representação de transformadores de três enrolamentos em paralelo.

Entretanto, nem todos os transformadores que estejam nessa configuração são necessariamente considerados como estando em paralelo.

Assim como para a identificação desses equipamentos, também foi necessária a elaboração de critérios para que o FLUPOT identifique dois ou mais transformadores de três enrolamentos como estando em paralelo.

Os critérios adotados estão listados a seguir.

- 1) As barras primárias e secundárias (barras i e m da Figura 2, respectivamente) dos transformadores devem ser as mesmas, ou seja, os transformadores devem estar topologicamente em paralelo;
- 2) A reatância dos transformadores controladores deve ser igual ou superior a 0,001;
- 3) Os transformadores devem estar controlando a mesma barra; e
- 4) Os *taps* dos transformadores devem estar referenciados para a mesma barra.

Os valores de *taps* mínimos e máximos serem diferentes para ambos os transformadores não impedem que dois transformadores de três enrolamentos sejam considerados em paralelo, assim como se as impedâncias dos transformadores forem diferentes.

Caso dois ou mais transformadores de três enrolamentos atendam a esses critérios, eles serão considerados paralelos entre si.

5.0 ADIÇÃO DE CONTRIBUIÇÃO NA MATRIZ DE SOLUÇÃO

Após a identificação dos transformadores de três enrolamentos e, em seguida, daqueles que estão em paralelo, é ainda necessária uma adequação da matriz de solução do problema.

O FLUPOT utiliza o Método de Pontos Interiores Primal-Dual para a solução do problema de fluxo de potência ótimo. Abaixo é apresentada a formulação do problema e, em seguida, as implementações necessárias para a adequação do problema dos transformadores de três enrolamentos.

5.1 Método de Pontos Interiores

O problema do fluxo de potência ótimo é constituído por uma função objetivo a ser maximizada ou minimizada sujeita a restrições de igualdade e desigualdade. Ele pode ser formulado como (1).

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s. a.} \quad & g(x) = 0 \\ & h(x) \leq 0 \\ & l \leq x \leq u \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

- z vetor de variáveis do sistema,
- $g(z)$ restrições de igualdade,
- $h(z)$ restrições de desigualdade (funcionais),
- u, l limites superior e inferior de z .

As restrições de igualdade se referem às equações de balanço de potência ativa e reativa em cada nó da rede e a outras restrições auxiliares. As restrições de desigualdade se referem a restrições funcionais e a restrições de limites físicos e operacionais.

Pelo Método de Pontos Interiores, a solução do problema de otimização é realizada através da chamada função Lagrangeana, que é igual à diferença entre a função objetivo e o somatório das restrições multiplicadas por coeficientes chamados de multiplicadores de Lagrange.

Dessa forma, as restrições de igualdade são incluídas na função objetivo através do uso dos multiplicadores de Lagrange.

As restrições de desigualdade se transformam em equações de igualdade através da utilização de variáveis complementares chamadas de variáveis de folga, conforme pode ser visto em (2), e são incluídas na função objetivo através do uso de novos multiplicadores de Lagrange. As variáveis de folga incluídas no problema devem assumir valor igual ou maior do que zero, e de forma a que o problema atenda a essa restrição são utilizadas barreiras logarítmicas (2).

Em (2) tem-se o problema (1) reformulado, sem restrições de desigualdade e com a adição das variáveis de folga.

$$\begin{aligned} \min f(x) - \mu \sum_{i=1,n} \log s_{1i} - \mu \sum_{i=1,n} \log s_{2i} \\ \text{s. a.} \quad & h(x) = 0 \\ & x - s_1 = l \\ & x + s_2 = u \end{aligned} \quad (2)$$

Onde:

- $h(x)$ inclui as equações de balanço e as restrições funcionais,
- u, l limites das variáveis de controle, de estado e das de folga associadas às restrições funcionais.

Em (3) tem-se a equação da função Lagrangeana, que é construída a partir do problema (2).

$$L(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) = f(x) - \mu \sum_{i=1,n} \log s_{1i} - \mu \sum_{i=1,n} \log s_{2i} - \lambda^T h(x) - \pi_1^T (x - s_1 - l) - \pi_2^T (x + s_2 - u) \quad (3)$$

O ponto ótimo do problema será quando a derivada da função Lagrangeana em função de cada variável for igual a zero.

A solução desse problema é a solução da matriz abaixo.

$$\begin{bmatrix} H & -J^T \\ -J & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla L|_x \\ -\nabla L|_\lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde:

- H Hessiana da função Lagrangeana em relação às variáveis primais,
- J Hessiana da função Lagrangeana em relação às variáveis primais e duais,
- Δx incremento das variáveis primais,
- $\Delta \lambda$ incremento das variáveis duais.

A matriz em (4) pode ser rearranjada para um melhor tratamento da matriz. Cada nó da rede está associado a uma equação de balanço de potência ativa e a outra de potência reativa, e cada uma dessas equações está associada a um λ_p e a um λ_Q , respectivamente. Sendo θ a variável associada à potência ativa e V a variável associada à potência reativa, cada nó da rede está associado a um par de variáveis (θ, λ_p) e (V, λ_Q). Outros tipos de variáveis como *taps*, carregamento de circuitos etc., são incluídas na matriz sem multiplicadores associados.

Dessa forma, a matriz de solução mostrada em (4) pode ser reestruturada e então separada em duas matrizes:

- HB *Heavy-Border* (2x2) que contém as derivadas de segunda ordem relativas a θ, V, λ_p e λ_Q .
- LB *Light-Border* que contém os elementos restantes da matriz

5.2 Matriz de solução

Para a paralelização dos transformadores de três enrolamentos foi necessária a inclusão de novos termos na matriz *Heavy-Border* do problema.

Tomando-se como exemplo a estrutura de transformadores de três enrolamentos em paralelo da Figura 2, considerando a_1 como sendo o *tap* do transformador controlador 1, e assim sucessivamente para os próximos transformadores, e sabendo que se almeja que os *taps* desses transformadores sejam iguais para sua devida paralelização, temos que as seguintes equações devem ser adicionadas à solução do problema:

$$\begin{aligned} a_1 &= \alpha_{12} \times a_2 \\ a_1 &= \alpha_{13} \times a_3 \\ a_1 &= \alpha_{14} \times a_4 \end{aligned} \quad (5)$$

Onde:

- α_{ij} Proporção entres os *taps* das barras i e j .

Essas novas equações são incluídas na função Lagrangeana com a adição de novos multiplicadores de Lagrange, conforme (6).

$$L = \dots - \lambda_{\alpha_{12}} \times (a_1 - \alpha_{12} \times a_2) - \lambda_{\alpha_{13}} \times (a_1 - \alpha_{13} \times a_3) \quad (6)$$

Na Figura 3 temos a matriz de solução alterada para a inclusão do paralelismo dos transformadores de três enrolamentos. Considerando $y = i, j, k, l$,

- θ_y ângulo da barra x ,
- V_y tensão da barra x ,
- λ_{P_y} multiplicador de Lagrange associado à restrição de potência ativa da barra x ,
- λ_{Q_y} multiplicador de Lagrange associado à restrição de potência reativa da barra x ,
- H contribuições na matriz referentes a pares de variáveis primais,
- J contribuições na matriz referentes a pares de variáveis primal e dual,
- Z contribuições na matriz entre os multiplicadores de lagrange adicionados ao problema ($\lambda_{\alpha_{12}}$ e $\lambda_{\alpha_{13}}$) e as variáveis associadas às barras de conexão dos transformadores controladores ($\theta_j, \lambda_{P_j}, V_j, \lambda_{Q_j}, \theta_k, \lambda_{P_k}, V_k, \lambda_{Q_k}, \theta_l, \lambda_{P_l}, V_l, \lambda_{Q_l}$).

As adições à matriz são os elementos referentes à conexão da barra i com a barras k e l , ou seja, são os elementos referentes aos seguintes pares de variáveis:

$$\begin{aligned}
& (a_2, \theta_k), (a_2, \lambda_{P_k}), (a_2, V_k), (a_2, \lambda_{Q_k}) \\
& (a_3, \theta_l), (a_3, \lambda_{P_l}), (a_3, V_l), (a_3, \lambda_{Q_l}) \\
& (\lambda_{\alpha_{12}}, \theta_k), (\lambda_{\alpha_{12}}, \lambda_{P_k}), (\lambda_{\alpha_{12}}, V_k), (\lambda_{\alpha_{12}}, \lambda_{Q_k}) \\
& (\lambda_{\alpha_{13}}, \theta_l), (\lambda_{\alpha_{13}}, \lambda_{P_l}), (\lambda_{\alpha_{13}}, V_l), (\lambda_{\alpha_{13}}, \lambda_{Q_l})
\end{aligned}$$

Esses elementos estão hachurados de cinza na matriz de solução (Figura 3).

	a_1	a_2	a_3	θ_i	λ_{P_i}	V_i	λ_{Q_i}	θ_j	λ_{P_j}	V_j	λ_{Q_j}	θ_k	λ_{P_k}	V_k	λ_{Q_k}	θ_l	λ_{P_l}	V_l	λ_{Q_l}	α_{12}	$\lambda_{\alpha_{12}}$	α_{13}	$\lambda_{\alpha_{13}}$
a_1	H_{a_1}			H_t	J_t	H_t	J_t	H_t	H_t	H_t	H_t										1		1
a_2		H_{a_2}		H_t	J_t	H_t	J_t					H_t	H_t	H_t	H_t					$-\lambda_{\alpha_{12}}$	$-\alpha_{12}$		
a_3			H_{a_3}	H_t	J_t	H_t	J_t									H_t	H_t	H_t	H_t			$-\lambda_{\alpha_{13}}$	$-\alpha_{13}$
θ_i	H_t	H_t	H_t	H	J	H	J_1	H	J_1	H	J_1	H	J_1	H	J_1	H	J_1	H	J_1		Z_1		Z'_1
λ_{P_i}	J_t	J_t	J_t	J	0	J_2	0	J_2	0	J_2	0	J_2	0	J_2	0	J_2	0	J_2	0		Z_2		Z'_2
V_i	H_t	H_t	H_t	H	J_2	H	J	H	J_2	H	J_1	H	J_2	H	J_1	H	J_2	H	J_1		Z_3		Z'_3
λ_{Q_i}	J_t	J_t	J_t	J_1	0	J	0	J_1	0	J_2	0	J_1	0	J_2	0	J_1	0	J_2	0		Z_4		Z'_4
θ_j	H_t			H	J_1	H	J_1	H	J	H	J_1										Z_5		Z'_5
λ_{P_j}	H_t			J_2	0	J_2	0	J	0	J_2	0										Z_6		Z'_6
V_j	H_t			H	J_2	H	J_1	H	J_2	H	J										Z_7		Z'_7
λ_{Q_j}	H_t			J_1	0	J_2	0	J_1	0	J	0										Z_8		Z'_8
θ_k		H_t		H	J_1	H	J_1					H	J	H	J_1						Z_9		
λ_{P_k}		H_t		J_2	0	J_2	0					J	0	J_2	0						Z_{10}		
V_k		H_t		H	J_2	H	J_1					H	J_2	H	J						Z_{11}		
λ_{Q_k}		H_t		J_1	0	J_2	0					J_1	0	J	0						Z_{12}		
θ_l			H_t	H	J_1	H	J_1									H	J	H	J_1				Z'_9
λ_{P_l}			H_t	J_2	0	J_2	0									J	0	J_2	0				Z'_{10}
V_l			H_t	H	J_2	H	J_1									H	J_2	H	J				Z'_{11}
λ_{Q_l}			H_t	J_1	0	J_2	0									J_1	0	J	0				Z'_{12}
α_{12}		$-\lambda_{\alpha_{12}}$																		H	J		
$\lambda_{\alpha_{12}}$	1	$-\alpha_{12}$		Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}					J	0		
α_{13}			$-\lambda_{\alpha_{13}}$																			H	J
$\lambda_{\alpha_{13}}$	1		$-\alpha_{13}$	Z'_1	Z'_2	Z'_3	Z'_4	Z'_5	Z'_6	Z'_7	Z'_8					Z'_9	Z'_{10}	Z'_{11}	Z'_{12}			J	0

FIGURA 3 – Matriz de solução para exemplo da Figura 3.

6.0 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A seguir são mostrados alguns resultados da otimização do FLUPOT para demonstrar a eficácia da implementação da restrição dos transformadores de três enrolamentos em paralelo.

6.1 – Caso 1

No caso 1, foi utilizado uma configuração do sistema brasileiro em que o FLUPOT é empregado para o ajuste do máximo intercâmbio da região Sudeste (SE) para a região Nordeste (NE), ano 2021, utilizando as funções objetivo ASHN (Mínima Alocação de Shunt Reativo) e MXTR (Máxima Transferência de Potência Ativa). Foram utilizados os controles SHNC (chaveamento de bancos shunt), VGEN (variação de tensão em barras PV), QGEN (geração de potência reativa), CCER (compensadores estáticos de reativo), TAPC (comutação dos *taps* dos LTCs), LTCP (acoplamento de *taps* de transformadores de dois enrolamentos em paralelo), PGEN (geração de potência ativa). Foi incluída a monitoração de tensão em toda a rede de 69 kV a 765 kV.

Serão comparados abaixo os resultados de quando se utiliza ou não os controles de restrição de transformadores de três enrolamentos em paralelo (3ENR). Ambos os casos resultaram num valor de máxima transferência de 9.650 MW e 33,1 MVAR de mínima alocação de potência reativa.

Na Figura 4 são apresentados os resultados dessa simulação, com 2 transformadores de três enrolamentos em paralelo sem a opção 3ENR (a) e com a opção 3ENR (b). O resultado da Figura 4(a) encontra-se com os *taps* otimizados, de acordo com as funções objetivo, controles e limites considerados e mesmo assim apresenta a circulação de potência reativa entre os transformadores paralelos e violação do limite de fluxo. Na Figura 4(b) verifica-se que o problema foi resolvido com o uso da opção 3ENR.

Na Tabela 1 é apresentado um subconjunto dos transformadores de três enrolamentos do mesmo caso simulado, considerando os resultados com e sem 3ENR, além da convergência do fluxo de potência no Anarede utilizando apenas a opção CTAP (EXLF CTAP), após o resultado do FLUPOT ser transportado para o Anarede.

Na coluna “Com 3ENR” da Tabela 1 encontra-se o resultado do FLUPOT com a opção 3ENR ativada e na coluna imediatamente a sua direita (EXLF CTAP), o resultado do fluxo de potência aplicado sobre o resultado do FLUPOT. Observa-se que em alguns casos os valores dos *taps* resultam diferentes no Anarede porque sua solução prioriza a tensão local, ao contrário do FLUPOT que prioriza a função objetivo do sistema como um todo. Na coluna “Sem 3ENR” o resultado do FLUPOT tem *taps* diferentes para transformadores em paralelo, muitas vezes com circulação de potência reativa. Verifica-se que o fluxo de potência do Anarede (coluna à direita desta, EXLF CTAP) iguala os valores dos *taps*, mas resulta em valores diferentes do resultado otimizado com o FLUPOT, e não necessariamente com variáveis dentro de seus limites (tensões etc.).

Nos demais resultados dos *taps* de transformadores com três enrolamentos do caso simulado, a opção com 3ENR resultou em valores iguais, como esperado pela implementação.

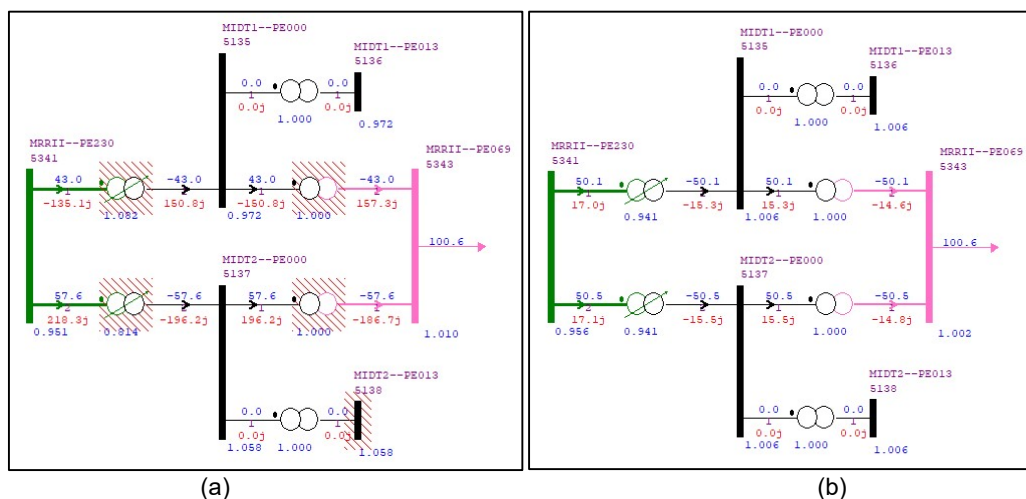


FIGURA 4: Resultado da otimização do FLUPOT (a) sem a opção 3ENR (b) com a opção 3ENR – Caso 1

TABELA 1 – Transformadores de três enrolamentos em paralelo – Caso 1

Identificação dos Trafos					Tap			
Número da barra 'DA'	Nome da barra	Número da barra 'PARA'	Nome da barra	Número do circuito	Com 3ENR	EXLF CTAP	Sem 3ENR	EXLF CTAP
5191	MIRUEI-PE230	5197	MRRT1--PE000	1	0,9485	0,9485	0,9641	0,9515
5191	MIRUEI-PE230	5198	MRRT2--PE000	1	0,9485	0,9485	0,9081	0,9515
5191	MIRUEI-PE230	5199	MRRT3--PE000	1	0,9485	0,9485	0,967	0,9515
5262	C.NOVO-RN138	5268	CRDT1--RN000	1	0,9921	0,9706	0,9915	0,9724
5262	C.NOVO-RN138	5269	CRDT2--RN000	2	0,9921	0,9706	0,9915	0,9724
5341	MRRII--PE230	5135	MIDT1--PE000	1	0,9415	0,9415	1,0822	0,9329
5341	MRRII--PE230	5137	MIDT2--PE000	2	0,9415	0,9415	0,8145	0,9329
66	IVAIP0-PR525	58	IVAIP2-PR000	1	0,9989	0,9988	0,9922	0,9982
66	IVAIP0-PR525	59	IVAIP3-PR000	1	0,9989	0,9988	1,0087	0,9982
66	IVAIP0-PR525	68	IVAIP1-PR000	1	0,9989	0,9988	0,9951	0,9982
6225	PINDAI-BA230	6272	PNDT1--BA000	1	1,0201	1,0201	1,0219	1,0205
6225	PINDAI-BA230	6274	PNDT2--BA000	1	1,0201	1,0201	1,0191	1,0205
5741	NSSOCO-SE230	5894	NSCT1--SE000	1	0,9468	0,9468	1,0218	1,0218
5741	NSSOCO-SE230	5896	NSCT2--SE000	1	0,9468	0,9468	1,0218	1,0218
5591	IMPERA-MA230	5597	IMP.T2-MA000	1	0,9757	0,9757	0,9709	0,9734
5591	IMPERA-MA230	5598	IMP.T1-MA000	1	0,9757	0,9757	0,976	0,9734

6.1 – Caso 2

No caso 2, o FLUPOT foi utilizado para convergir o fluxo de potência com mínima alocação de potência reativa (função objetivo ASHN), na configuração do sistema brasileiro inverno de 2021. Também foram utilizados os controles SHNC (chaveamento de bancos shunt), VGEN (variação de tensão em barras PV), QGEN (geração de potência reativa), CCER (compensadores estáticos de reativo), TAPC (*taps* dos LTCs), LTCP (acoplamento de *taps* de transformadores de dois enrolamentos em paralelo). Foi incluída a monitoração de tensão de toda a rede de 69 kV a 765 kV.

Além desses controles, foram testados os casos com e sem a nova opção 3ENR (acoplamento de transformadores de 3 enrolamentos) para otimizar os *taps* conforme a formulação mostrada. Ambos os casos resultaram na mínima alocação de potência reativa de 40,2 MVAR.

Na Figura 5 é mostrado um exemplo do resultado (a) sem a opção 3ENR, onde se pode ver diferenças resultantes no controle dos *taps* e circulação de potência reativa, embora não haja violações resultantes da circulação. Na Figura 5(b) pode-se ver o resultado com a opção 3ENR, mostrando que a implementação funcionou conforme o esperado. Na Tabela 2 são mostrados alguns dos resultados dos *taps* de transformadores de três enrolamentos deste caso, confirmando o ajuste correto dos *taps* na coluna “Com 3ENR”. Todos os demais transformadores de três enrolamentos do caso também foram corretamente ajustados conforme a formulação mostrada no artigo.

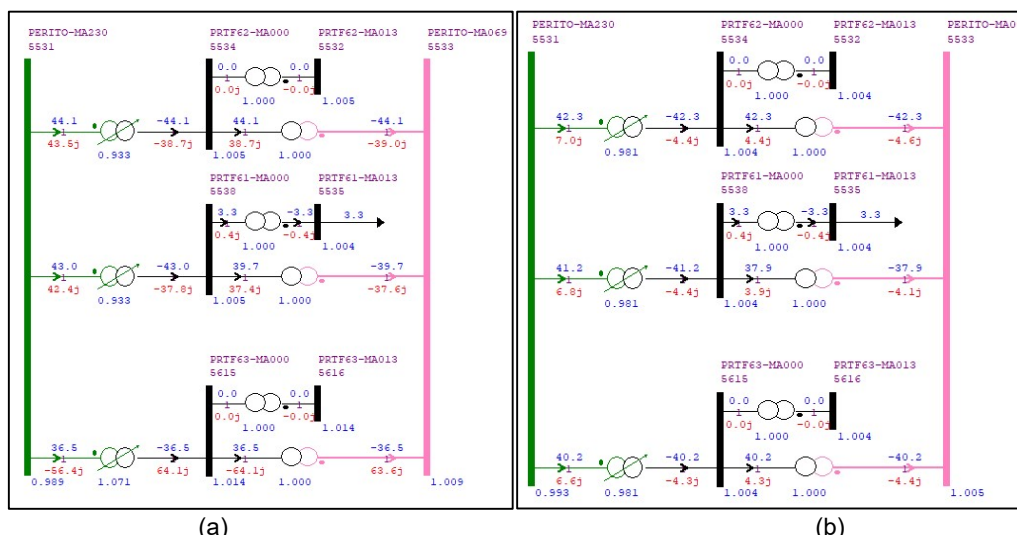


FIGURA 5: Resultado da otimização do FLUPOT (a) sem a opção 3ENR (b) com a opção 3ENR – Caso 2

TABELA 2 – Transformadores de três enrolamentos em paralelo – Caso 2

Identificação dos Trafos					Tap			
Número da barra 'DA'	Nome da barra	Número da barra 'PARA'	Nome da barra	Número do circuito	Com 3ENR	EXLF CTAP	Sem 3ENR	EXLF CTAP
238	R.VERD-GO138	240	RVERDE-GO000	1	1,0505	1,0505	1,0443	1,0508
238	R.VERD-GO138	3960	RVERD2-GO000	2	1,0505	1,0505	1,054	1,0508
238	R.VERD-GO138	3971	RVERD3-GO000	3	1,0505	1,0505	1,054	1,0508
4583	SINOP--MT138	4580	SINOP2-MT000	1	0,9848	0,9848	0,9927	0,9813
4583	SINOP--MT138	4584	SINOP3-MT000	1	0,9848	0,9848	0,9733	0,9813
4583	SINOP--MT138	4589	SINOP1-MT000	1	0,9848	0,9848	0,9782	0,9813
4807	JAURU--MT138	4860	JAURU1-MT000	1	1,0245	1,0245	1,0424	1,0239
4807	JAURU--MT138	4864	JAURU2-MT000	1	1,0245	1,0245	1,0068	1,0239
5531	PERITO-MA230	5534	PRTF62-MA000	1	0,9814	0,9814	0,933	0,9769
5531	PERITO-MA230	5538	PRTF61-MA000	1	0,9814	0,9814	0,9332	0,9769
5531	PERITO-MA230	5615	PRTF63-MA000	1	0,9814	0,9814	1,071	0,9769
5591	IMPERA-MA230	5597	IMP.T2-MA000	1	0,9981	0,9981	0,9858	0,9974
5591	IMPERA-MA230	5598	IMP.T1-MA000	1	0,9981	0,9981	1,0075	0,9974
6840	JIPARA-RO230	6844	JIPAT1-RO000	1	0,9866	0,9866	0,9881	0,9905
6840	JIPARA-RO230	6845	JIPAT2-RO000	1	0,9866	0,9866	1,0579	0,9905
6840	JIPARA-RO230	6848	JIPA---RO000	1	0,9866	0,9866	0,9327	0,9905

7.0 CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada a implementação do paralelismo de transformadores de três enrolamentos para sistemas de fluxo de potência. Foram mostradas as adições que foram necessárias à matriz de solução do FLUPOT e foram apresentados dois casos exemplo para sua validação.

Diversas simulações de otimização no sistema elétrico brasileiro foram realizadas com a nova implementação, que já vem sendo utilizada por diversas entidades do setor elétrico. Os resultados demonstram o correto funcionamento do tratamento dos transformadores de 3 enrolamentos em paralelo como mostrado neste artigo.

Essa nova opção de controle execução do fluxo de potência ótimo viabilizará a obtenção de forma direta dos adequados ajustes de tensão em barramentos do sistema, racionalizando ainda mais o tempo dos analistas. Portanto, tomando por base os resultados obtidos, conclui-se que a implementação feita no FLUPOT disponibiliza um novo código de controle de execução que torna o ajuste de *taps* de transformadores de três enrolamentos, quando em paralelo, mais eficaz.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LEVY, B. N., MOULIN, L. S e SOTO, J. R. O. “Manual do Usuário do Programa FLUPOT”, Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Julho de 2021. Versão 7.9.0.

[2] DE LUJÁN LATORRE, Maria; Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo. Rio de Janeiro, 1995. 75 f. Tese (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DADOS BIOGRÁFICOS



Beatriz Nogueira Levy possui graduação (2009) e mestrado (2013) em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente, ela é pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Ela tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, atuando na área de otimização de fluxo de potência.

(2) JAVIER RUBEN OJEDA SOTO

Javier Ruben Ojeda Soto. Nasceu em Chimbote, estado de Ancash no Perú, em 1967. Possui graduação(1992) em Matemáticas pela Universidad de Ingenieria - UNI do Perú, mestrado(1998) em Engenharia de Sistemas e Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Trabalha como pesquisador no CEPEL desde 2006. Sendo as áreas de interesse em Fluxo de Potência Ótimo, Planejamento de Potência Reativa, Serviços Ancilares e outros.

(3) LUCIANO DE SOUZA MOULIN

Nasceu em Nanuque, Minas Gerais em 1972. Possui graduação (1995), mestrado (1998) e doutorado (2002) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, com ênfase em sistemas elétricos de potência. Trabalha como pesquisador no CEPEL desde 2002.

(4) ELDER GERALDO SALES DE SANT'ANNA

Experiência em planejamento da operação de sistemas elétricos e amplo conhecimento de programas de simulação de fluxo de potência, domínio de toda cadeia de planejamento da operação de sistemas elétricos, com forte interface com o planejamento energético. Atuação como multiplicador de conhecimento em Programas de Simulação e apoio técnico na formação de engenheiros. Mestrado em Engenharia Elétrica pela UNIFEI/MG, MBA em Administração Financeira pela FGV/RJ, Pós-Graduação em Aspectos Regulatórios do Setor Elétrico pela PUC/RJ e Graduação em Engenharia Elétrica pela UERJ.