

Resolução do problema de FPO com restrições de segurança do tipo $N - 1$ e variáveis contínuas e discretas

Ana Paula Mazzini¹

IFSP, Matão, SP

Guilherme G. Lage²

DEE/UFSCAR, São Carlos, SP

Eduardo N. Asada³

SEL/EESC/USP, São Carlos, SP

Resumo. Este trabalho apresenta uma modelagem para o problema de Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança (FPORS) do tipo $N - 1$ com variáveis contínuas e discretas, bem como seu algoritmo de resolução por meio de uma técnica de programação não linear e de uma função senoidal quadrática para tratamento das variáveis discretas. São apresentados testes computacionais para o sistema elétrico de transmissão IEEE de 14 barras. A metodologia empregada e os resultados parciais se mostram promissores para resolução desse problema para sistemas elétricos de transmissão de maior porte.

Palavras-chave. Fluxo de potência ótimo com restrições de segurança, Critério $N - 1$, Variáveis discretas, Programação não linear.

1 Introdução

O problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) em sistemas elétricos de potência tem por objetivo determinar o despacho (geração) de potência ativa e/ou reativa que otimize um determinado objetivo operacional (como, por exemplo, custo de geração, perdas de potência ativa na transmissão, emissão de gases poluentes etc.) sujeito ao atendimento de restrições técnicas e operacionais [1]. O conceito de segurança do sistema surgiu com a necessidade de se garantir a operação do sistema elétrico de transmissão nos estados normal e contingenciais após perturbações provocadas pela falta e desligamento de um componente da rede, como geradores, linhas de transmissão e transformadores. Quando a operação do sistema é determinada em função dos estados normal e contingenciais após a falta e o desligamento de um componente da rede, têm-se as chamadas de restrições de segurança do tipo $N - 1$ [2, 3].

Formulações estritas de FPORS do tipo $N - 1$ possuem controles contínuos e discretos que resultam em problemas de Programação Não Linear Inteira-Mista (PNLIM) não convexa e de grande porte. A maioria dos esforços de pesquisa no meio acadêmico tradicionalmente focam em algoritmos de resolução para um caso especial de FPO, considerando-o como um problema Programação Não Linear (PNL) não convexa e de grande porte, sendo geralmente desconsideradas as contingências do tipo $N - 1$ e os aspectos discretos de alguns controle dos sistemas elétricos de transmissão [4], já que pode-se argumentar, que as restrições de segurança do tipo $N - 1$ em geral “apenas” adicionam mais variáveis ao problema em função dos conjuntos de restrições

¹ana.mazzini@ifsp.edu.br

²glage@ufscar.br

³casada@usp.br

de igualdade e desigualdade de cada estado operacional (normal e contingenciais), não alterando quaisquer propriedades estruturais do relaxamento contínuo do FPORS.

Apresenta-se neste trabalho, portanto, uma modelagem para o problema de FPORS do tipo $N - 1$ com *taps* dos transformadores em-fase e susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunts* modeladas como variáveis de controle discretas. Para a resolução desse modelo, as variáveis de controle discretas são tratadas por funções senoidais quadráticas incorporadas à função objetivo do problema original por um parâmetro de penalidade [5]. Dessa forma, o problema de FPORS originalmente modelado como um problema de PNLIM pode ser relaxado continuamente e resolvido por técnicas de PNL somente com variáveis contínuas. São apresentados testes computacionais para o sistema elétrico de transmissão IEEE de 14 barras utilizando-se o *solver* CONOPT [6, 7] no ambiente de modelagem de problemas de programação matemática GAMS [8].

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 apresenta-se a formulação matemática do problema de FPORS com variáveis de controle contínuas e discretas. Na Seção 3 apresenta-se a estratégia de relaxamento contínuo e tratamento das variáveis de controle discretas do problema. Na Seção 4 apresenta-se os resultados obtidos. E, finalmente, na Seção 5 apresenta-se as principais contribuições e conclusões acerca do trabalho realizado.

2 Formulação do problema de FPORS do tipo $N - 1$ com variáveis contínuas e discretas

Matematicamente, o problema de FPORS do tipo $N - 1$ com variáveis contínuas e discretas pode ser formulado como um problema de PNLIM. O modelo apresentado (2) é uma modificação da modelagem proposta em [4], aqui os *taps* dos transformadores e as susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunts* são modelados como variáveis de controle discretas do sistema. O desempenho operacional do sistema a ser otimizado é a minimização das perdas ativas na transmissão $P_{perdas(0)}$ no estado normal e é dado por:

$$P_{perdas(0)} = \sum_{k,m \in \mathcal{L} \cup \mathcal{T}} g_{km(0)} \left(\frac{1}{t_{km(0)}^2} V_{k(0)}^2 + V_{m(0)}^2 - 2 \frac{1}{t_{km(0)}} V_{k(0)} V_{m(0)} \cos \theta_{km(0)} \right). \quad (1)$$

Na modelagem do problema (2), tem-se que: V e θ são, respectivamente, os vetores das magnitudes e ângulos de fase da tensão nas barras do sistema; t é o vetor dos *taps* variáveis de transformadores em-fase; b^{sh} é o vetor das susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunts*; P_k e Q_k representam, respectivamente, as injeções líquidas de potência ativa e reativa na barra k ; Q_{G_k} é a potência reativa gerada na barra k ; $Q_{G_k}^{min}$ e $Q_{G_k}^{max}$ representam as potências reativas mínima e máxima gerada na barra k , respectivamente; Q_k^{sh} é a injeção de potência reativa pelo *shunt* da barra k ; P_{km} e Q_{km} são os fluxos de potência ativa e reativa no ramo $k-m$; θ_{km} é a diferença entre os ângulos de fase da tensão nas barras k e m ; g_{km} é a condutância série associada ao elemento de transmissão do ramo $k-m$; V_k^{min} e V_k^{max} são os limites inferior e superior da magnitude de tensão da barra k , respectivamente; \mathcal{D}_{km}^{tap} é o conjunto dos valores discretos que os *taps* dos transformadores em-fase podem assumir; e \mathcal{D}_k^{sh} é o conjunto dos valores discretos que as susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunts* podem assumir.

Ainda, tem-se que \mathcal{B} é o conjunto de todas as barras do sistema; \mathcal{G} é conjunto das barras de geração; \mathcal{G}' é conjunto das barras de geração menos a barra *slack*; \mathcal{C} é conjunto das barras de carga; \mathcal{L} é o conjunto dos ramos $k-m$ que representam linhas de transmissão; \mathcal{T} é conjunto dos ramos $k-m$ que representam transformadores em-fase com *tap* variável; \mathcal{V}_k é o conjunto das barras adjacentes (vizinhas) à barra k ; \mathcal{B}^{sh} é conjunto das barras com controle da magnitude de tensão pela injeção de potência reativa por bancos de capacitores e reatores *shunts*; $\Delta V_{(i)}$ é o vetor de variação máxima de correção relacionado às magnitudes de tensão; $\Delta t_{km(i)}$ é o vetor de variação máxima

de correção relacionado aos *taps* de transformadores em-fase; e $\Delta b_{(i)}^{sh}$ é o vetor de variação máxima de correção relacionado às susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunts*. Ademais, o sub-índice (0) representa o estado operacional normal, ou seja, o caso base, enquanto o sub-índice (i) representa cada um dos estados contingenciais, onde \mathcal{M} se refere ao conjunto de possíveis perturbações do tipo $N - 1$ investigadas. As restrições (2b) a (2g) representam o conjunto original de restrições de problemas de FPO; as restrições (2h) a (2m) representam as restrições de segurança relacionadas a cada um dos possíveis estados contingenciais; e as restrições (2n) a (2p) representam o acoplamento entre os estados operacionais normal e contingenciais, limitando as magnitudes das ações corretivas das variáveis de controle do problema e que servem como um elo entre os problemas de FPO e FPORS do tipo $N - 1$ [1]. Dessa forma, o modelo do FPORS do tipo $N - 1$ com variáveis contínuas e discretas é dado por:

$$\min \quad P_{perdas(0)} \tag{2a}$$

$$\text{s.a:} \quad P_{k(0)} - \sum_{m \in V_k} P_{km(0)}(V_{(0)}, \theta_{(0)}, t_{(0)}) = 0 \quad \forall k \in \mathcal{G}' \cup \mathcal{C} \tag{2b}$$

$$Q_{k(0)} + Q_{k(0)}^{sh}(V_{k(0)}, b_{k(0)}^{sh}) - \sum_{m \in \mathcal{V}_k} Q_{km(0)}(V_{(0)}, \theta_{(0)}, t_{(0)}) = 0 \quad \forall k \in \mathcal{C} \tag{2c}$$

$$Q_{G_{k(0)}^{min}} \leq Q_{G_{k(0)}}(V_{(0)}, \theta_{(0)}, t_{(0)}, b_{k(0)}^{sh}) \leq Q_{G_{k(0)}^{max}} \quad \forall k \in \mathcal{G} \tag{2d}$$

$$V_{k(0)}^{min} \leq V_{k(0)} \leq V_{k(0)}^{max} \quad \forall k \in \mathcal{B} \tag{2e}$$

$$t_{km(0)} \in \mathcal{D}_{km}^{tap} \quad \forall k, m \in \mathcal{T} \tag{2f}$$

$$b_{k(0)}^{sh} \in \mathcal{D}_k^{sh} \quad \forall k \in \mathcal{B}^{sh} \tag{2g}$$

$$P_{k(i)} - \sum_{m \in V_k} P_{km(i)}(V_{(i)}, \theta_{(i)}, t_{(i)}) = 0 \quad \forall k \in \mathcal{G}' \cup \mathcal{C}, i = 1, \dots, \mathcal{M} \tag{2h}$$

$$Q_{k(i)} + Q_{k(i)}^{sh}(V_{k(i)}, b_{k(i)}^{sh}) - \sum_{m \in \mathcal{V}_k} Q_{km(i)}(V_{(i)}, \theta_{(i)}, t_{(i)}) = 0 \quad \forall k \in \mathcal{C}, i = 1, \dots, \mathcal{M} \tag{2i}$$

$$Q_{G_{k(i)}^{min}} \leq Q_{G_{k(i)}}(V_{(i)}, \theta_{(i)}, t_{(i)}, b_{k(i)}^{sh}) \leq Q_{G_{k(i)}^{max}} \quad \forall k \in \mathcal{G}, i = 1, \dots, \mathcal{M} \tag{2j}$$

$$V_{k(i)}^{min} \leq V_{k(i)} \leq V_{k(i)}^{max} \quad \forall k \in \mathcal{B}, i = 1, \dots, \mathcal{M} \tag{2k}$$

$$t_{km(i)} \in \mathcal{D}_{km}^{tap} \quad \forall k, m \in \mathcal{T} \tag{2l}$$

$$b_{k(i)}^{sh} \in \mathcal{D}_k^{sh} \quad \forall k \in \mathcal{B}^{sh} \tag{2m}$$

$$|V_{k(i)} - V_{k(0)}| \leq \Delta V_{(i)} \quad k \in \mathcal{G}, i = 1, \dots, \mathcal{M} \tag{2n}$$

$$|t_{km(i)} - t_{km(0)}| \leq \Delta t_{km(i)} \quad k, m \in \mathcal{T}, i = 1, \dots, \mathcal{M} \tag{2o}$$

$$|b_{(i)}^{sh} - b_{(0)}^{sh}| \leq \Delta b_{(i)}^{sh} \quad k \in \mathcal{B}^{sh}, i = 1, \dots, \mathcal{M} \tag{2p}$$

Podemos definir um modelo contínuo associado ao modelo (2) denominado de Relaxação Contínua, onde as variáveis de controle discretas associadas aos *taps* e aos *shunts* são consideradas contínuas, ou seja, as restrições (2f) e (2l) e as restrições (2g) e (2m) são substituídas, respectivamente, pelas restrições (3a) e (3b). Dessa forma, a Relaxação Contínua encontra um limitante inferior para a função objetivo (1).

$$t_{km(i)}^{min} \leq t_{km(i)} \leq t_{km(i)}^{max} \quad \forall k, m \in \mathcal{T}, i = 0, 1, \dots, \mathcal{M} \tag{3a}$$

$$b_{k(i)}^{sh, min} \leq b_{k(i)}^{sh} \leq b_{k(i)}^{sh, max} \quad \forall k \in \mathcal{B}^{sh}, i = 0, 1, \dots, \mathcal{M} \tag{3b}$$

onde t_{km}^{min} e t_{km}^{max} são os limites inferior e superior dos *taps* dos transformadores em-fase, respectivamente; $b_k^{sh, min}$ e $b_k^{sh, max}$ são os limites inferior e superior das susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunts*, respectivamente.

3 Estratégia para tratamento das variáveis discretas

Considere o seguinte problema de PNLIM:

$$\min \quad f(x) \tag{4a}$$

$$\text{s.a:} \quad g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, p \tag{4b}$$

$$h_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, q \tag{4c}$$

$$x_1^{min} \leq x_{1_i} \leq x_1^{max} \quad i = 1, \dots, m_1 \tag{4d}$$

$$x_{2_i} \in \mathcal{D}_{x_{2_i}} \quad i = 1, \dots, m_2 \tag{4e}$$

onde $x_1 \in \mathbb{R}^{m_1}$ é o vetor das variáveis contínuas e $x_2 \in \mathcal{D}_{x_2} \subset \mathbb{R}^{m_2}$ é o vetor das variáveis discretas, com $x = (x_1, x_2)$ e $x \in \mathbb{R}^n$; $x_1^{min}, x_1^{max} \in \mathbb{R}^{m_1}$ são os vetores dos limites inferior e superior das variáveis contínuas x_1 ; $\mathcal{D}_{x_{2_i}}$ é o conjunto dos valores discretos de cada variável x_{2_i} ; $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$; $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$, com $p < n$; e $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^q$.

A função senoidal quadrática $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ para o tratamento de variáveis discretas x_2 na resolução de problemas como (4) foi amplamente estudada nos últimos anos [5, 9] e pode ser definida como:

$$\phi(y_i) = \left[\text{sen} \left(\frac{y_i}{y_i^{sup} - y_i^{inf}} \pi + \alpha_i \right) \right]^2, \tag{5}$$

onde y_i^{sup} é o valor discreto em $\mathcal{D}_{x_{2_i}}$ imediatamente superior a y_i ; y_i^{inf} é o valor discreto em $\mathcal{D}_{x_{2_i}}$ imediatamente inferior a y_i ; e α_i é uma constante definida no intervalo $[0, \pi]$ tal que a função ϕ se anule quando $y_i = x_{2_i} \in \mathcal{D}_{x_{2_i}}$. A função ϕ assume valores da seguinte forma:

$$\phi(y_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } y_i \in \mathcal{D}_{x_{2_i}}, \\ \rho > 0 & \text{c.c.} \end{cases}, \tag{6}$$

ou seja, ϕ é nula se, e somente se, y_i assumir valores discretos; e ρ é um número real maior que zero. Para maiores detalhes da função ϕ consultar [5, 9].

Através da incorporação de funções ϕ para cada variável discreta à função objetivo do problema (4), obtém-se o seguinte problema modificado:

$$\min \quad f(x) + \gamma \sum_{i=1}^{m_2} \phi(x_{2_i}) \tag{7a}$$

$$\text{s.a:} \quad g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, p \tag{7b}$$

$$h_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, q \tag{7c}$$

$$x_1^{min} \leq x_{1_i} \leq x_1^{max} \quad i = 1, \dots, m_1 \tag{7d}$$

$$x_{2_i}^{min} \leq x_{2_i} \leq x_{2_i}^{max} \quad i = 1, \dots, m_2 \tag{7e}$$

onde $\gamma > 0$ é um parâmetro de penalidade que controla da amplitude da função ϕ ; $x_1 \in \mathbb{R}^{m_1}$ e $x_2 \in \mathbb{R}^{m_2}$ são vetores de variáveis contínuas, com $x = (x_1, x_2)$ e $x \in \mathbb{R}^n$; $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$; $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$, com $p < n$; e $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^q$. No problema modificado (7), as funções f , g e h são de classe C^2 e $x_2^{min}, x_2^{max} \in \mathbb{R}^{m_2}$ são os vetores dos limites inferior e superior das variáveis contínuas x_2 , com $x_{2_i}^{min} = \min\{\mathcal{D}_{x_{2_i}}\}$ e $x_{2_i}^{max} = \max\{\mathcal{D}_{x_{2_i}}\}$ para $i = 1, \dots, m_2$.

O algoritmo de discretização utilizando a função senoidal quadrática consiste na resolução de uma sequência de problemas modificados (7) até que todas as variáveis relaxadas continuamente associadas às variáveis discretas do problema original assumam valores discretos. A determinação de um valor inicial para o parâmetro γ é fundamental para que a solução do problema (7) seja encontrada. A fim de que o valor de γ seja determinado corretamente, propõe-se a resolução de uma série de problemas como (7) para diferentes valores de γ , com γ aumentando gradualmente, ver [5, 9]. O ajuste do crescimento de γ é feito através de um parâmetro c , definido no intervalo $(1, 10]$. O processo de resoluções sucessivas do problema (7) e de ajuste do parâmetro γ continua até que o critério de convergência (C1) que avalia a discretização das variáveis x_2 na solução corrente seja satisfeito ou o critério de parada (C2) que avalia os ajustes nas variáveis x_2 entre duas iterações consecutivas seja satisfeito.

Portanto, a resolução de um problema de PNLIM como (4) é dada pelo Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Algoritmo de Discretização Utilizando a Função Senoidal Quadrática

Dado o problema (2) equivalente ao problema (4), defina as funções ϕ para cada variável x_2 e construa o problema (7);

Faça $k = 0$;

Dê um valor inicial para as variáveis x_1^0 e x_2^0 e para o parâmetro γ^0 ;

Especifique c , ξ_1 e ξ_2 ; **enquanto** x_2^k não satisfizer a condição **C1**: $\|x_{2_i}^k - x'_{2_i}\|_\infty \leq \xi_1$ **ou**

C2: $\|x_{2_i}^k - x_{2_i}^{k-1}\|_\infty < \xi_2$ **faça**

 Resolva o problema (7), com γ^k fixo;

 Admita (x_1^k, x_2^k) como uma solução;

$\gamma^{k+1} = c\gamma^k$;

$k = k + 1$;

fim

4 Resultados

Foi realizados testes com a Relaxação Contínua e com o modelo (3) para o sistema elétrico de transmissão IEEE de 14 barras. Foi considerado que os *taps* de transformadores em-fase possuem limites mínimo e máximo são 0.88 p.u. e 1.12 p.u., respectivamente. Quando estes forem considerados discretos, devem pertencer ao conjunto discreto igualmente espaçado por passos de 0.0075 p.u. entre 0.88 p.u. e 1.12 p.u. (33 posições). Foi considerado também que os limites inferior e superior das magnitudes de tensão são 0.9 p.u. e 1.1 p.u.; a precisão adotada para as tolerâncias ξ_1 e ξ_2 foi de 10^{-4} ; para o algoritmo de discretização foi adotado $c = 10$ e $\lambda^0 = 10^{-4}$. Foi adotado variação máxima de correção relacionadas às magnitudes de tensão, aos *taps* de transformadores em-fase e às susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunts*, $\Delta V_{(i)}$, $\Delta t_{km(i)}$ e $\Delta b_{(i)}^{sh}$, respectivamente, em 10^{-6} . Todos os testes foram realizados utilizando-se o *solver* CONOPT [6, 7] no ambiente para a modelagem de problemas de programação matemática GAMS [8]. Ademais, foram considerados três cenários de carregamento desse sistema para os testes realizados: carga leve, média e pesada.

O sistema elétrico IEEE de 14 barras possui as seguintes características: 1 barra de geração *slack*; 4 barras com controle de geração de reativos; 9 barras de carga; 1 banco de capacitores; 17 linhas de transmissão; e 3 transformadores com *tap* variável nos ramos 4-7, 4-9 e 5-6, que denotaremos como 1, 2 e 3, respectivamente. Considera-se que a variável associada ao banco de capacitores *shunt* possua limites mínimo e máximo de 0.0 p.u. e 0.39 p.u. para a relaxação contínua, respectivamente, e que devam assumir valores discretos no conjunto $\{0, 0.19, 0.34, 0.39\}$ para a variável considerada discreta.

A seleção e ordenação das contingências a serem incorporadas ao modelo (2) é feita essencialmente segundo um critério de proximidade em relação à instabilidade de tensão [10]. Apresenta-se na Tabela 1 as contingências que serão utilizadas para testes com o sistema elétrico de transmissão IEEE de 14 barras.

Tabela 1: Contingências analisadas.

Índice i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
De	2	2	6	6	6	7	9	9	10	12	13
Para	4	5	11	12	13	9	10	14	11	13	14

A Tabela 2 apresenta as perdas ativas e o tempo de resolução dos modelos (3) e (2), utilizando todas as contingências apresentadas na Tabela 1, para as cargas leve, média e pesada, utilizando na resolução do modelo (3) o *solver* CONOPT e na resolução do modelo (2) o Algoritmo 1 juntamente com o *solver* CONOPT.

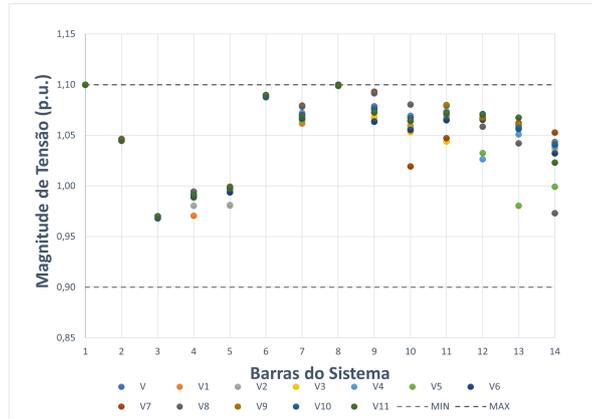


Figura 1: Perfil da tensão para a relaxação contínua com carga pesada.

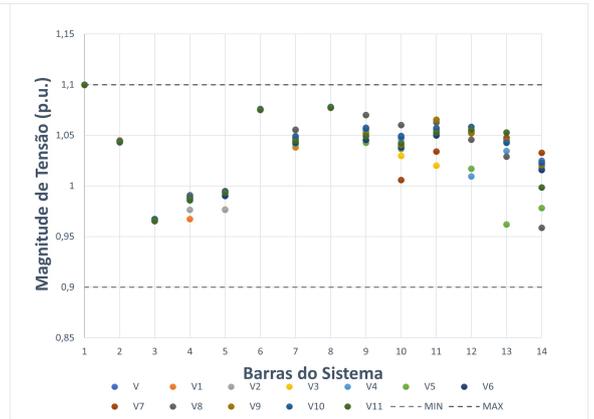


Figura 2: Perfil da tensão para o modelo (2) com carga pesada.

Tabela 2: Solução do problema de FPORS do sistema IEEE de 14 barras obtidas para a relaxação contínua e o modelo (2).

Resolução da Relaxação Contínua			
Carregamento	Leve	Médio	Pesado
Perdas (MW)	12.29	19.93	31.98
Tempo (s)	7.326	5.693	7.871
Resolução do modelo (2) pelo Algoritmo 1			
Carregamento	Leve	Médio	Pesado
Perdas (MW)	12.29	19.97	32.25
Tempo (s)	11.282	11.449	12.919

As Figuras 1 e 2 apresentam os perfis das magnitudes de tensão considerando o cenário de carregamento pesado para a relaxação contínua e para o modelo (2), atendendo todos os casos contingenciais apresentados na Tabela 1.

A Tabela 3 apresenta os valores dos *taps* de transformadores em-fase considerando o cenário de carregamento pesado para a relaxação contínua e para o modelo (2), atendendo todos os casos de contingenciamento $N - 1$ apresentados na Tabela 1.

Tabela 3: *Taps* para o problema de FPORS do sistema elétrico de transmissão IEEE de 14 barras obtidos utilizando-se a relaxação contínua e o modelo (2) com carga pesada.

Resolução da Relaxação Contínua pelo solver CONOPT												
t	$t_{(0)}$	$t_{(1)}$	$t_{(2)}$	$t_{(3)}$	$t_{(4)}$	$t_{(5)}$	$t_{(6)}$	$t_{(7)}$	$t_{(8)}$	$t_{(9)}$	$t_{(10)}$	$t_{(11)}$
1	0,962	0,961	0,963	0,963	0,961	0,961	0,963	0,961	0,963	0,963	0,963	0,963
2	0,899	0,898	0,898	0,900	0,900	0,900	0,898	0,900	0,900	0,898	0,900	0,898
3	0,881	0,88	0,88	0,881	0,88	0,881	0,88	0,881	0,88	0,88	0,88	0,88
Resolução do modelo (2) pelo Algoritmo 1 e pelo solver CONOPT												
t	$t_{(0)}$	$t_{(1)}$	$t_{(2)}$	$t_{(3)}$	$t_{(4)}$	$t_{(5)}$	$t_{(6)}$	$t_{(7)}$	$t_{(8)}$	$t_{(9)}$	$t_{(10)}$	$t_{(11)}$
1	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
2	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
3	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88

Os valores encontrados para o shunt de barra do sistema de 14 barras, para a relaxação contínua com cargas leve, média e pesada, são respectivamente, 0.375, 0.39 e 0.389 atendendo os estados normal e contingenciais. Os valores encontrados para o shunt de barra do sistema de 14 barras, para o modelo (2) com cargas leve, média e pesada, são respectivamente, 0.34, 0.39 e 0.39 atendendo os estados normal e contingenciais.

Observando os resultados encontrados com o sistema de 14 barras, podemos afirmar que o modelo proposto (2) para o problema de FPORS com variáveis contínuas e discretas, é eficiente em determinar estados otimizados considerando faltas nas linhas dos sistemas elétricos. As variáveis

de tensão nas barras de geração, os *taps* de transformadores e as susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunt* são conectadas entre o caso pré-contingências e os casos contingenciados pelas restrições (2n), (2o) e (2p), respectivamente, e apresentam resultados que garantem a eficácia do modelo proposto.

5 Considerações Finais

Foi apresentado neste trabalho, uma modelagem para o problema de FPORS do tipo $N - 1$ com *taps* dos transformadores em-fase e susceptâncias equivalentes dos bancos de capacitores e reatores *shunts* modeladas como variáveis de controle discretas. As variáveis de controle discretas são tratadas por funções senoidais quadráticas incorporadas à função objetivo do problema original por um parâmetro de penalidade. Dessa forma, o problema de FPORS originalmente modelado como um problema de PNLIM é relaxado continuamente e resolvido por técnicas de PNL somente com variáveis contínuas. Foi apresentado testes computacionais para o sistema elétrico de transmissão IEEE de 14 barras utilizando-se o solver CONOPT no ambiente de modelagem de problemas de programação matemática GAMS. A metodologia empregada e os resultados obtidos se mostram promissores para a resolução de problemas de FPORS do tipo $N - 1$ para sistemas elétricos de transmissão de maior porte. Testes numéricos deverão ser conduzidos com os sistemas elétricos maiores a fim de consolidar o modelo e a estratégia de resolução apresentadas.

Referências

- [1] A. Monticelli, M. V. F. Pereira e S. Granville. “Security-Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling”. Em: **IEEE Power Engineering Review** PER-7.2 (1987), pp. 43–44.
- [2] O. Alsac e B. Stott. “Optimal Load Flow with Steady-State Security”. Em: **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** PAS-93.3 (mai. de 1974), pp. 745–751. ISSN: 0018-9510. DOI: 10.1109/TPAS.1974.293972.
- [3] F. Capitanescu et al. “State-of-the-art, challenges, and future trends in security constrained optimal power flow”. Em: **Electric Power Systems Research** 81.8 (2011), pp. 1731–1741.
- [4] F. Capitanescu. “Critical review of recent advances and further developments needed in AC optimal power flow”. Em: **Electric Power Systems Research** 136 (2016), pp. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.02.008>.
- [5] E. M. Soler, E. N. Asada e G. R. M. da Costa. “Penalty-Based Nonlinear Solver for Optimal Reactive Power Dispatch With Discrete Controls”. Em: **IEEE Transactions on Power Systems** 28 (2013), pp. 2174–2182.
- [6] S. A. Drud. “CONOPT”. Em: **Mathematical Programming** 31 (1985), pp. 153–191.
- [7] S. A. Drud. “A Large-scale GRG code”. Em: **ORSA Journal on Computing** 6 (1992), pp. 207–216.
- [8] GAMS. **General Algebraic Modeling Systems**. Gams distribution 24.0. 2013. URL: <http://www.gams.com>.
- [9] A. P. Mazzini, G. G. Lage e E. N. Asada. “The Resolution of the Optimal Reactive Power Dispatch with Continuous and Discrete Variables”. Em: **LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (LI SBPO)** Anais do LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO) (2019), pp. 1–12.
- [10] L. Beordo. “Planejamento da operação de controles de reativo e tensão considerando restrições de estabilidade de tensão”. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.