

Minimização de Perdas em Redes de Energia Elétrica via Método Não-Linear de Pontos Interiores

Luciano V. Barboza, André A. P. Lerm

Universidade Católica de Pelotas
Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas
96010-000, Pelotas, RS
E-mail: luciano@atlas.ucpel.tche.br, alerm@atlas.ucpel.tche.br

1 Introdução

Nos dias atuais, a operação econômica, segura e confiável dos sistemas de energia elétrica passou a ser considerada como a principal meta a ser atingida pelas indústrias. O processo de privatização da rede elétrica brasileira, a partir do final do século do passado, tornou estas condições de operação dos sistemas de potência mais fundamentais ainda. Dentro deste novo paradigma, os processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica devem ser realizados considerando-se novos parâmetros operacionais. Entre estes, devem ser ressaltados aqueles relacionados à operação econômica. A transmissão da energia elétrica tem que levar em conta a otimização dos equipamentos existentes na rede elétrica de modo a que se possa utilizá-los nos seus limites efetivos sem perda de confiabilidade.

Este trabalho aborda um dos requisitos operacionais mais importantes para a utilização eficiente de uma rede de energia elétrica: a transmissão da energia elétrica com a menor perda de potência ativa nas linhas de transmissão. Com isso, se pode atender integralmente as demandas energéticas do sistema de potência com um mínimo de geração de energia. Associando-se a este objetivo uma minimização de custo de geração, pode-se ter um sistema de energia elétrica operando em uma condição o mais econômica possível.

O problema de fluxo de potência convencional [8][11][15] utiliza uma metodologia de classificar o sistema elétrico por tipo de barras: *PV* (barras de geração), *PQ* (barras de carga) e *folga* (a barra de geração responsável pelo suprimento das perdas de potência). Nesta modelagem, a especificação da geração de potência ativa nas barras *PV* é realizada através de casos históricos ou pela experiência dos operadores do sistema elétrico. Ao final do cálculo, toda a perda de potência do sistema tem que ser compensada pela geração de potência ativa na *barra de folga*.

Por outro lado, a literatura apresenta algumas abordagens para o tratamento do problema da minimização da perda de potência ativa em linhas de transmissão. As metodologias sugeridas podem ser classificadas em:

- método da continuação [1];
- programação linear [14];
- análise de sensibilidades [5].

No presente estudo é proposta uma abordagem para

o tratamento das perdas de potência ativa em linhas de transmissão como um problema de otimização restrita. O índice a ser otimizado corresponde à soma das gerações de potência ativa em todas as barras de geração. Para um sistema de potência, tem-se que a perda total de potência ativa corresponde à geração total de potência menos à soma de todas as demandas elétricas. Observe que, para uma determinada demanda total do sistema elétrico, se a geração total de potência for minimizada, isto implica em que as perdas de potência ativa também serão minimizadas. As restrições de igualdade correspondem aos balanços de potências ativa e reativa em todas as barras do sistema. As restrições de desigualdade modelam, por exemplo, limites operacionais e/ou de equipamentos constituintes do sistema elétrico.

A solução do problema de otimização é realizada utilizando-se a versão não-linear do método Preditor-Corretor do Primal-Dual de Pontos Interiores [12]. Esta versão do método tem sido muito aplicada a problemas de sistemas de potência pela facilidade com que as restrições de desigualdade são tratadas e pela eficiência do seu desempenho computacional, características essas que serão abordadas neste trabalho.

Este estudo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 é apresentada uma revisão matemática do método Preditor-Corretor do Primal-Dual de Pontos Interiores. A seguir, introduz-se o problema da minimização da perda de potência ativa em linhas de transmissão em função das variáveis físicas envolvidas. Na seção 4 são mostrados resultados numéricos obtidos com a aplicação da metodologia proposta. Finalmente, conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

2 O Método de Pontos Interiores Preditor-Corretor do Primal-Dual

Considere o seguinte problema de otimização com restrições [1]

$$\begin{aligned} \text{Min } & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.a. } & \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (1)$$

onde \mathbf{x} é o vetor das variáveis de otimização; $f(\mathbf{x})$ é o índice a ser otimizado e $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ e $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ são, respectiva-

mente, os conjuntos contendo as restrições de igualdade e de desigualdade.

O tratamento das restrições de igualdade pelo método de Pontos Interiores é feito modificando-se a função objetivo. Estas restrições são incorporadas à função objetivo através dos multiplicadores de Lagrange λ . Por sua vez, as restrições de desigualdade são transformadas em igualdade pela adição de variáveis de folga não-negativas s . Assim, o problema de otimização (1) pode ser reescrito como

$$\begin{aligned} \text{Min } & f(\mathbf{x}) - \lambda^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \text{s.a. } & \mathbf{h}(\mathbf{x}) - s = \mathbf{0} \\ & s > \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2)$$

A seguir, o problema de otimização com restrições pode ser transformado em um problema irrestrito utilizando-se o método de penalidades de Fiacco e McCormick [6], resultando em

$$\text{Min } f(\mathbf{x}) - \lambda^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mu \sum_i \ln s_i - \boldsymbol{\pi}^T [\mathbf{h}(\mathbf{x}) - s] \quad (3)$$

onde $\boldsymbol{\pi}$ é o vetor com os multiplicadores de Lagrange das restrições de desigualdade que foram transformadas em igualdade pela adição das variáveis de folga; o termo $\mu \sum_i \ln s_i$ é a função barreira logarítmica e garante a não-negatividade das variáveis de folga e μ é o parâmetro barreira do método de Pontos Interiores.

A função Lagrangeana correspondente ao problema de otimização expresso pela equação (3) é

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, s, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) = f(\mathbf{x}) - \mu \sum_i \ln s_i - \lambda^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\pi}^T [\mathbf{h}(\mathbf{x}) - s] \quad (4)$$

As condições de otimalidade de primeira ordem (condições de Karush-Kuhn-Tucker) [3][10] aplicadas à função Lagrangeana resultam em

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L}(\mathbf{x}, s, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) & \equiv \nabla_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) - \mathbf{G}(\mathbf{x})^T \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{H}(\mathbf{x})^T \boldsymbol{\pi} = \mathbf{0} \\ \nabla_s \mathcal{L}(\mathbf{x}, s, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) & = \mu \mathbf{e} - \mathbf{S} \boldsymbol{\pi} = \mathbf{0} \\ \nabla_{\boldsymbol{\lambda}} \mathcal{L}(\mathbf{x}, s, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) & = -\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ \nabla_{\boldsymbol{\pi}} \mathcal{L}(\mathbf{x}, s, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) & = -[\mathbf{h}(\mathbf{x}) - s] = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (5)$$

onde $\nabla_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x})$ é o vetor gradiente da função objetivo; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ e $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ são as matrizes Jacobianas das restrições de igualdade e de desigualdade, respectivamente, isto é,

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad \text{e} \quad \mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (6)$$

\mathbf{e} corresponde a um vetor com 1's em todas as posições e \mathbf{S} é uma matriz diagonal com as variáveis de folga.

Este sistema de equações não-lineares, equação (5), pode ser resolvido pelo método de Newton-Raphson perturbado. Assim chamado pois, a cada iteração do processo, uma nova estimativa para o parâmetro barreira μ é calculada. Dessa forma, a cada iteração, deve-se resolver o seguinte sistema de equações lineares

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) & \mathbf{0} & -\mathbf{G}(\mathbf{x})^T & -\mathbf{H}(\mathbf{x})^T \\ \mathbf{0} & -\boldsymbol{\Pi} & \mathbf{0} & -\mathbf{S} \\ -\mathbf{G}(\mathbf{x}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{H}(\mathbf{x}) & \mathbf{U} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta s \\ \Delta \boldsymbol{\lambda} \\ \Delta \boldsymbol{\pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t \\ -(\mu \mathbf{e} - \mathbf{S} \boldsymbol{\pi}) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) - s \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde $\boldsymbol{\Pi}$ é uma matriz diagonal formada pelos elementos do vetor $\boldsymbol{\pi}$, \mathbf{U} é a matriz identidade e

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) = \nabla_{\mathbf{x}}^2 f(\mathbf{x}) - \sum_i \lambda_i \nabla_{\mathbf{x}}^2 g_i(\mathbf{x}) - \sum_j \pi_j \nabla_{\mathbf{x}}^2 h_j(\mathbf{x}) \quad (8)$$

é a matriz Hessiana da função Lagrangeana em relação às variáveis de otimização.

Resolvida a equação matricial (7), obtém-se os incrementos nas variáveis primais e duais e a próxima etapa é determinar os comprimentos dos passos nos espaços primal e dual de modo a garantir a não-negatividade das variáveis de folga e os sinais adequados para os multiplicadores de Lagrange das restrições de desigualdade.

$$\begin{aligned} \gamma_p & = \min \left[\min_{\Delta s_i < 0} \frac{s_i}{|\Delta s_i|}, 1, 0 \right] \\ \gamma_D & = \min \left[\min_{\Delta \pi_j < 0} \frac{\pi_j}{|\Delta \pi_j|}, 1, 0 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

A nova aproximação para a solução ótima é

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(k+1)} & = \mathbf{x}^{(k)} + \sigma \gamma_p \Delta \mathbf{x}^{(k)} \\ s^{(k+1)} & = s^{(k)} + \sigma \gamma_p \Delta s^{(k)} \\ \boldsymbol{\lambda}^{(k+1)} & = \boldsymbol{\lambda}^{(k)} + \sigma \gamma_D \Delta \boldsymbol{\lambda}^{(k)} \\ \boldsymbol{\pi}^{(k+1)} & = \boldsymbol{\pi}^{(k)} + \sigma \gamma_D \Delta \boldsymbol{\pi}^{(k)} \end{aligned} \quad (10)$$

onde σ é uma constante que tem por finalidade garantir que as variáveis s e $\boldsymbol{\pi}$ não assumam valores iguais a zero [19]. A literatura recomenda a utilização de um valor igual a 0,9995.

Finalmente, o método de penalidades de Fiacco e McCormick estabelece que o parâmetro barreira μ deve diminuir durante o processo iterativo, tendendo a zero na convergência. A sua nova estimativa é

$$\mu = \frac{\mathbf{s}^T \boldsymbol{\pi}}{2n\beta} \quad (11)$$

onde β é um fator que controla o decrescimento do parâmetro barreira (recomenda-se utilizar um valor entre 10 e 20 [9]); n é o número de restrições com limites e o numerador da equação (11) é conhecido como *gap de complementariedade*, o qual estima a distância entre os problemas primal e dual a cada iteração.

Esta forma de solução do método de Pontos Interiores é conhecida como *Primal-Dual*.

Uma formulação alternativa deste método foi apresentada em [13] e reformulada em [12]. Esta ficou conhecida como *Preditor-Corretor do Primal-Dual* de Pontos Interiores. A diferença fundamental entre as duas versões consiste em que, no Primal-Dual simplesmente aplica-se o método de Newton-Raphson para a obtenção dos pontos estacionários da função Lagrangeana, isto é, os pontos que satisfazem as condições de KKT, equação (5). Portanto, inicia-se um processo iterativo onde, a cada iteração, uma nova aproximação do ponto ótimo é determinada.

Na versão Preditor-Corretor, além de buscar a cada iteração uma melhor aproximação para a solução ótima, substitui-se esta nova aproximação diretamente nas condições de KKT. Com a aplicação desta metodologia, obtém-se o seguinte sistema de equações não-lineares [2]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) & \mathbf{0} & -\mathbf{G}(\mathbf{x})^T & -\mathbf{H}(\mathbf{x})^T \\ \mathbf{0} & -\boldsymbol{\Pi} & \mathbf{0} & -\mathbf{S} \\ -\mathbf{G}(\mathbf{x}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{H}(\mathbf{x}) & \mathbf{U} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{s} \\ \Delta \boldsymbol{\lambda} \\ \Delta \boldsymbol{\pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t + z \\ -(\mu e - \mathbf{S}\boldsymbol{\pi}) + \Delta \mathbf{S}\Delta \boldsymbol{\pi} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{s} \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde $z = \left[\sum_i \Delta \lambda_i \nabla_x^2 g_i(\mathbf{x}) + \sum_j \Delta \pi_j \nabla_x^2 h_j(\mathbf{x}) \right] \Delta \mathbf{x}$ e os demais termos são os mesmos da equação (7).

Observe que as matrizes dos sistemas lineares das formulações Primal-Dual, equação (7), e Preditor-Corretor, equação (12), são as mesmas. Na versão Preditor-Corretor, o vetor do lado direito do sistema linear apresenta termos não-lineares nos vetores z e $\Delta \mathbf{S}\Delta \boldsymbol{\pi}$. Devido à presença destes termos, a equação (12) pode ser resolvida apenas de forma aproximada. Além disso, em termos de programação não-linear, o vetor z pode ser desprezado na avaliação do vetor do lado direito do sistema linear [18].

Assim, em [12] é sugerido primeiramente se fazer uma etapa de *predição* na qual o problema original é resolvido, isto é, despreza-se a influência da barreira logarítmica. A equação a ser resolvida é, portanto,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\pi}) & \mathbf{0} & -\mathbf{G}(\mathbf{x})^T & -\mathbf{H}(\mathbf{x})^T \\ \mathbf{0} & -\boldsymbol{\Pi} & \mathbf{0} & -\mathbf{S} \\ -\mathbf{G}(\mathbf{x}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{H}(\mathbf{x}) & \mathbf{U} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{s} \\ \Delta \boldsymbol{\lambda} \\ \Delta \boldsymbol{\pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t \\ \mathbf{S}\boldsymbol{\pi} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{s} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Com estes incrementos, o parâmetro barreira e os

termos não-lineares podem ser estimados e o lado direito da equação (12) pode ser determinado. Em [17] é sugerido estimar-se o parâmetro barreira por

$$\mu = \left(\frac{g\tilde{a}p}{gap} \right)^2 \left(\frac{g\tilde{a}p}{2n} \right) \quad (14)$$

onde $gap = \mathbf{s}^T \boldsymbol{\pi}$ é o gap de complementariedade sem atualização das variáveis; $g\tilde{a}p = (\mathbf{s} + \tilde{\gamma}\Delta \mathbf{s})^T (\boldsymbol{\pi} + \tilde{\gamma}\Delta \boldsymbol{\pi})$ é o gap de complementariedade com atualização das variáveis; e

$$\tilde{\gamma} = \min \left[\min_{\Delta s_i < 0} \frac{s_i}{|\Delta s_i|}, \min_{\Delta \pi_j < 0} \frac{\pi_j}{|\Delta \pi_j|} \right] \quad (15)$$

Para determinar a direção de busca da iteração corrente, realiza-se a etapa de *correção*. Nesta etapa, somente o vetor do lado direito do sistema linear é recalculado. Portanto, resolve-se o sistema linear mostrado na equação (12), para isto basta realizarem-se substituições diretas e inversas visto que a matriz do sistema linear já foi previamente fatorada. Uma vez obtidos os incrementos nas variáveis primais e duais, a seqüência passa a ser a mesma do Primal-Dual. Determinam-se os comprimentos dos passos nos espaços primal e dual (γ_p e γ_D), atualizam-se as variáveis (vetores \mathbf{x} , \mathbf{s} , $\boldsymbol{\lambda}$, $\boldsymbol{\pi}$) e calcula-se a nova estimativa do parâmetro barreira (μ).

3 O Problema da Minimização de Perda de Potência Ativa

Neste trabalho, o problema de minimização da perda de potência ativa em um sistema de energia elétrica é abordado através de um problema de minimização da potência ativa gerada. Observe que, para uma determinada demanda especificada, a perda de potência ativa no sistema consiste na diferença entre os valores do somatório das potências geradas e o somatório da demanda prevista. Dessa forma, o problema em análise pode ser modelado matematicamente como

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_i P_{G_i} \\ \text{s.a.} \quad & P_j^{calc}(\mathbf{x}) - P_{G_j} + P_{d_j} = 0 \\ & Q_k^{calc}(\mathbf{x}) - Q_{G_k} + Q_{d_k} = 0 \\ & \mathbf{x}^{min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{max} \\ & Q_{G_i}^{min} \leq Q_{G_i}(\mathbf{x}) \leq Q_{G_i}^{max} \end{aligned} \quad (16)$$

onde P_G é a potência ativa gerada, com $i = 1, \dots, npv$ (número de barras de geração); P^{calc} corresponde a in-

jeção de potência ativa calculada em função das variáveis de estado, com $j = 1, \dots, nb$ (número total de barras do sistema elétrico); P_d é a demanda especificada de potência ativa; Q^{calc} é a injeção de potência reativa calculada em função das variáveis de estado, com $k = 1, \dots, npq$ (número de barras de carga); Q_G é a potência reativa gerada; e Q_d é a demanda especificada de potência reativa.

O vetor das variáveis de estado, neste estudo, é composto por

$$\mathbf{x} = [\mathbf{P}_G \quad \mathbf{V} \quad \boldsymbol{\delta} \quad \mathbf{a}]^T \quad (17)$$

onde \mathbf{P}_G é o vetor com as potências ativas geradas; \mathbf{V} é o vetor com as magnitudes das tensões complexas em todas as barras do sistema; $\boldsymbol{\delta}$ é o vetor com os ângulos de fase das tensões complexas em todas as barras, exceto na barra de folga; e \mathbf{a} corresponde ao taps dos transformadores com comutação sob carga (LTC).

As variáveis \mathbf{P}_G , \mathbf{V} e \mathbf{a} e a função Q_G possuem limites mínimo e máximo que devem ser respeitados durante o processo de minimização.

As injeções de potências ativa e reativa são da forma

$$\begin{aligned} P_k^{calc}(\mathbf{x}) &= G_{kk} V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}) \\ Q_k^{calc}(\mathbf{x}) &= -B_{kk} V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \delta_{km} - B_{km} \cos \delta_{km}) \end{aligned} \quad (18)$$

onde k é o número da barra em análise; \mathbf{G} e \mathbf{B} são matrizes com as partes real e imaginária da matriz admitância de barra (\mathbf{Y}_{barra}); e δ_{km} corresponde à abertura angular da linha entre as barras k e m , isto é, $\delta_{km} = \delta_k - \delta_m$.

A potência reativa gerada nas barras de geração pode ser expressa em função da injeção de potência reativa e da demanda especificada como

$$Q_{G_i}(\mathbf{x}) = Q_i^{calc}(\mathbf{x}) + Q_{d_i} \quad (19)$$

O problema de otimização enunciado pela equação (16) é resolvido utilizando o algoritmo Preditor-Corretor do Primal-Dual de Pontos Interiores, conforme apresentado na seção 2.

A metodologia proposta foi aplicada a vários sistemas-teste, tanto hipotéticos como realísticos. Os resultados e discussão estão apresentados na seção seguinte.

4 Resultados Numéricos

A metodologia apresentada na seção 3 foi implementada no ambiente de programação do software Matlab™ e, para avaliar o seu desempenho, esta foi aplicada a vários sistemas-teste. Neste artigo, mostrar-se-ão resultados para os sistemas-teste apresentados na Tabela 1.

Nesta tabela, a coluna 2 refere-se ao número de barras do sistema elétrico, a coluna 3, ao número de circuitos (linhas de transmissão e transformadores), a coluna 4, ao número de barras de geração, e a coluna 5, ao número de transformadores LTC.

Sistema	<i>NB</i>	<i>NC</i>	<i>NPV</i>	<i>NTRAF</i>
IEEE	57	80	7	15
	118	179	34	9
SSB	340	684	53	141

Tabela 1: Principais características dos sistemas-teste

Os dois primeiros sistemas são hipotéticos e propostos pelo IEEE [16]. O último é um sistema real equivalente da região Sul-Sudeste do Brasil.

O desempenho da metodologia foi avaliado tanto em termos matemático-computacionais como também na qualidade das soluções fornecidas. Para isso, para cada sistema-teste, foram realizados dois testes em diferentes níveis de carregamento, a saber:

- Teste A: carregamento para o caso-base.
- Teste B: aumento de 30% no carregamento do sistema em relação ao Teste A.

As soluções obtidas nos testes A e B foram comparadas com as soluções determinadas através das técnicas convencionais de fluxo de carga, muito utilizadas pelas indústrias de energia elétrica.

4.1 Sistema-teste IEEE-57

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no Teste A para o sistema de 57 barras. Nesta tabela, *FCC* refere-se ao resultado obtido via fluxo de carga convencional e *MMP* é com a aplicação da metodologia de minimização de perdas. Os índices considerados para comparação são o número total de iterações do processo de convergência e a perda total de potência ativa nas linhas de transmissão do sistema elétrico. O nível de carregamento do sistema, neste caso, corresponde a uma demanda ativa total de 1.250,80 MW.

	<i>FCC</i>	<i>MMP</i>
Número de Iterações	3	8
Perda Total (MW)	61,80	23,18

Tabela 2: Teste A – Sistema IEEE-57

Pela análise da Tabela 2, percebe-se que, conforme esperado, o processo de otimização exige um número maior de iterações para a convergência. Entretanto, pode ser observado que é possível reduzir as perdas do sistema elétrico em aproximadamente 62%.

Aumentando-se o carregamento deste sistema em

30%, a demanda total de potência ativa passa para 1.626,04 MW. A Tabela 3 mostra os resultados para este caso.

	<i>FCC</i>	<i>MMP</i>
Número de Iterações	3	9
Perda Total (MW)	108,97	69,40

Tabela 3: Teste B – Sistema IEEE-57

Na simulação do Teste B, observa-se a possibilidade de uma redução de perdas de aproximadamente 36%. Neste nível de carregamento, nota-se que o processo iterativo requer um número um pouco maior de iterações para a sua convergência (9).

4.2 Sistema-teste IEEE-118

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no Teste A para o sistema IEEE-118. Este teste foi realizado em um nível de carregamento de 4.125,00 MW de demanda total de potência ativa.

	<i>FCC</i>	<i>MMP</i>
Número de Iterações	3	8
Perda Total (MW)	136,65	46,99

Tabela 4: Teste A – Sistema IEEE-118

Observa-se na Tabela 4 que a perda de potência ativa total no sistema de energia pode ser reduzida em 65%.

Aplicando a metodologia proposta no Teste B, a Tabela 5 apresenta os resultados obtidos. O acréscimo no carregamento leva o sistema para um consumo total de 5.362,50 MW de potência ativa.

	<i>FCC</i>	<i>MMP</i>
Número de Iterações	3	10
Perda Total (MW)	238,22	101,97

Tabela 5: Teste B – Sistema IEEE-118

Neste caso, a redução de perdas com a aplicação da metodologia proposta é de aproximadamente 57,20%.

4.3 Sistema-teste SSB-340

Este sistema-equivalente abrange a região Sul-Sudeste do Brasil. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos no Teste A para este sistema. Para o caso-base, o nível de carregamento deste sistema corresponde a 33.077,83 MW.

	<i>FCC</i>	<i>MMP</i>
Número de Iterações	4	19
Perda Total (MW)	1.023,57	785,82

Tabela 6: Teste A – Sistema SSB-340

A redução na perda de potência ativa deste sistema real é de 23,23% com a aplicação da abordagem proposta neste estudo. É de se observar o aumento no número de iterações do processo de otimização (19).

Para o Teste B, o sistema elétrico passa para um nível de carregamento de 42.831,54 MW. Neste caso, a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos.

	<i>FCC</i>	<i>MMP</i>
Número de Iterações	6	20
Perda Total (MW)	1.860,62	1.345,20

Tabela 7: Teste B – Sistema SSB-340

Da Tabela 7, observa-se novamente a possibilidade de redução das perdas de potência ativa no sistema elétrico. Neste caso, a redução fica em torno de 27,70%.

4.4 Síntese dos Resultados

A Figura 1 apresenta de uma forma gráfica a qualidade dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta.

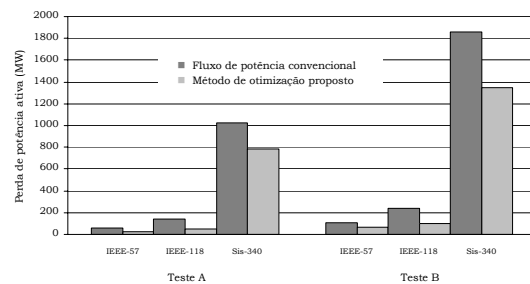


Figura 1: Síntese dos resultados (qualidade operacional)

Analisando o gráfico da Figura 1, pode-se observar que o método de minimização de perdas proposto no trabalho apresenta um desempenho adequado. Para os sistemas testados, foi possível reduzir a perda de potência ativa do sistema mediante um redespacho de geração, tanto no Teste A como no Teste B. Além disso, é importante salientar que com a metodologia sugerida não existem violações de limites operacionais (por exemplo, magnitudes de tensão) nem limites de equipamentos (por exemplo, geração de potências ativa e reativa).

5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia para o tratamento das perdas de potência ativa em redes de energia elétrica. A abordagem proposta modelou o processo físico na forma de um problema de otimização.

As principais conclusões que se pode depreender a partir dos resultados obtidos até o momento são:

- a perda de potência ativa em sistemas elétricos de potência pode ser modelada através de um problema de otimização com restrições;
- a solução deste problema pode ser realizada com a utilização do método não-linear de Pontos Interiores na sua versão Preditor-Corretor do Primal-Dual;
- o processo de otimização, como já era esperado, exige um número maior de iterações para a convergência do processo iterativo;
- a qualidade da solução fornecida pela técnica proposta é melhor do que àquela fornecida pelas técnicas tradicionais do fluxo de carga convencional, ou seja, com a utilização da abordagem proposta é possível reduzir-se a perda de potência ativa no sistema elétrico;
- em níveis de carregamento mais elevados, ocorre um aumento na perda de potência ativa do sistema elétrico;
- a ferramenta matemático-computacional implementada pode ser de grande utilidade para as indústrias de energia elétrica para os estudos de planejamento de operação e expansão da rede elétrica.

Como futuros trabalhos, sugere-se a implementação da metodologia em uma linguagem de alto nível, como por exemplo em Fortran ou C, de modo a se avaliar o seu desempenho para sistemas elétricos realísticos de grande porte.

Referências

- [1] D. A. Alves, L. C. P. Silva, C. A. Castro e V. F. Costa, Continuation load flow method parameterized by transmission line power losses, em "PowerCon'2000", pp. 763-768, Perth, 2000.
- [2] L. V. Barboza, "Análise e Desenvolvimento de Metodologias Corretivas para a Restauração da Solução das Equações da Rede Elétrica", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [3] M. S. Bazaraa e C. M. Shetty, "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms", John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [4] J. Carpentier, Contribution a l'Étude du Dispatching Économique, *Bulletin de la Société Française des Électriciens*, 3 (1962) 431-447.
- [5] M. El Arini, Effects of voltage sensitive loads on optimum capacitor allocation for power system, em "Melecon'96", pp. 1598-1602, Bari, 1996.
- [6] A. V. Fiacco e G. P. McCormick, "Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques", John Wiley & Sons, New York, 1968.
- [7] F. Glimm e G. W. Stagg, Automatic calculation of load flows, *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 76 (1957) 817-828.
- [8] J. D. Glover e M. Sarma, "Power System Analysis and Design", PWS Publishing, Boston, 1993.
- [9] S. Granville, Optimal reactive dispatch through interior point methods, *IEEE Transactions on Power Systems*, 9 (1994) 136-146.
- [10] D. M. Greig, "Optimisation", Longman, London, 1980.
- [11] A. Gross, "Power System Analysis", John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [12] S. Mehrotra, On the implementation of a primal-dual interior point method, *SIAM Journal on Optimization*, 2 (1992) 575-601.
- [13] S. Mizuno, M. J. Todd e Y. Ye, Anticipated behaviour of the path following algorithms for linear programming, *Technical report 878*, School of Operations Research and Industrial Engineering, Cornell University, 1989.
- [14] M. Olofsson, G. Andersson e L. Soder, Linear programming based optimal power flow using second order sensitivities, *IEEE Transactions on Power Systems*, 3 (1995) 1691-1697.
- [15] G. W. Stagg e A. H. El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill, Tokyo, 1968.
- [16] University of Washington, Electrical Engineering, Power Systems Test Case Archive. Available: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>.
- [17] Y. C. Wu, A. S. Debs e R. E. Marsten, A nonlinear programming approach based on an interior point method for optimal power flows, em "IEEE/NTUA Powertech conference: planning, operation and control of today's electric power systems" pp. 17-27, Athens, 1993.
- [18] Y. C. Wu, A. S. Debs e R. E. Marsten, A direct nonlinear predictor corrector primal dual interior point algorithm for optimal power flows, *IEEE Transactions on Power Systems*, 9 (1994) 876-883.
- [19] X. Yan e V. H. Quintana, An efficient predictor-corrector interior point algorithm for security-constrained economic dispatch, *IEEE Transactions on Power Systems*, 12 (1997) 803-810.