

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Atualmente, os sistemas de energia elétrica encontram-se bem maiores em termos de dimensão e muito mais complexos em termos de configuração, englobando diversos dispositivos de controle com diferentes características de resposta e atuação e cargas com características especiais. Sob o ponto de vista da operação, os sistemas elétricos passaram a enfrentar condições adversas, como, por exemplo, carregamentos extremos, freqüentemente compensados por dispositivos de controle operando nos seus limites ou sob restrições de contingências múltiplas. Conseqüentemente, a solução das equações matemáticas que representam o sistema elétrico e seus componentes tem se tornado uma tarefa bastante difícil, mesmo com recursos computacionais avançados. Dependendo das características e das limitações dos métodos numéricos usados, estes podem não solucionar o problema de forma satisfatória, influenciando negativamente no esforço computacional e na precisão dos resultados. Em alguns casos, nem mesmo soluções são obtidas para determinadas redes.

Portanto, métodos numéricos robustos que atendam às exigências do problema de interesse são atualmente indispensáveis. Esta adequação significa capacidade em solucionar o problema de forma confiável (precisão dos resultados) e, se possível, com um baixo custo computacional (eficiência). O uso de estratégias numéricas alternativas que aumentem a robustez e a eficiência do método considerado pode chegar a ser imperativo dependendo das dificuldades do problema. Pelo histórico apresentado e pelos artigos mais recentes abordados, nota-se que as estratégias e os métodos numéricos vêm evoluindo bastante durante as duas últimas décadas, oferecendo um vasto e interessante campo de pesquisa.

O problema investigado neste trabalho está associado a solução do subproblema linear do fluxo de carga, ou seja, a uma das etapas do método de Newton aplicado na solução das equações não-lineares, mais especificamente na solução do sistema linear do tipo $Ax=b$. Já com bastante frequência, verifica-se que solucionadores do tipo *direto* vêm sendo aplicados com sucesso para solucionar sistemas deste tipo. Entretanto, estes podem não corresponder conforme o esperado, ou até mesmo falhar.

Certas características e propriedades espectrais da matriz de coeficientes A – no caso a matriz Jacobiana do sistema elétrico – têm sido identificadas como as origens das principais dificuldades pertinentes ao problema em questão, que podem dificultar o processo de solução. Por exemplo, se uma determinada condição de operação resultar em uma matriz mal-condicionada ou próxima da singularidade, é possível que isto decorra do nível de carga do sistema e/ou a proximidade de um ponto de colapso, onde solucionadores diretos geralmente falham.

Seguindo ainda as observações do item acima, sistemas lineares de grande porte envolvendo milhões, ou até mesmo bilhões de incógnitas não conseguem ser solucionados por solucionadores diretos (Saad & Van der Vorst, 2000; Saad, 2003). Apesar dos problemas de fluxo de carga não apresentarem tais dimensões, se o sistema elétrico sob investigação envolver milhares de incógnitas e estiver operando sob condições adversas, a solução por método direto pode falhar, pelo fato destes sistemas apresentarem matrizes Jacobianas indefinidas, com autovalores que possuem tanto partes reais negativas quanto positivas. Estas dificuldades relativas a matrizes Jacobianas indefinidas são também analisadas e solucionadas neste trabalho. Neste caso, um método iterativo agregando estratégias de pré-condicionamento e reordenamento para a melhora de desempenho podem ser considerados como alternativas viáveis para a solução do problema.

Comprovou-se nesta tese que o uso eficiente da estratégia de pré-condicionamento melhora significativamente o desempenho do método iterativo, superando os resultados obtidos pelos métodos diretos considerados, em termos de eficiência computacional e principalmente de robustez. Com o uso desta estratégia, é também possível solucionar sistemas lineares relativos ao subproblema linear de fluxo de carga que envolvem matrizes mal-condicionadas,

matrizes próximas da singularidade e/ou indefinidas, decorrentes de cenários de condições operacionais adversas, que comumente os solucionadores diretos não conseguem solucionar.

Portanto, considera-se que a estratégia de pré-condicionamento é a parte mais importante do solucionador iterativo, substituindo o sistema linear original mal-condicionado, muitas vezes indefinido, por outro de solução mais simples, com autovalores de módulos pequenos, de partes reais positivas, agrupados próximos de um e com um número de condicionamento menor que no caso sem pré-condicionamento.

A estratégia de reordenamento é fundamental para que a construção do pré-condicionador seja realizada com um baixo custo computacional pelo fato de reduzir o número de operações realizadas por novos elementos não-nulos. Contudo, o reordenamento aplicado junto à estratégia de pré-condicionamento é determinante para que o método iterativo seja tão, ou mais eficiente que um direto. Além de reduzir o número de operações realizadas por novos elementos não-nulos, o reordenamento utiliza a estratégia de pré-condicionamento para melhorar a qualidade dos subespaços de Krylov gerados em cada iteração do GMRES. Subespaços de boa qualidade contêm sempre uma solução muito próxima da exata e o teste de convergência pode ser satisfeito em apenas uma (ou poucas) iteração (iterações).

Foram analisados e estudados grande parte dos trabalhos realizados na área de pré-condicionadores aplicados a problemas de sistemas elétricos de potência, enfatizando os pré-condicionadores $ILUT(\tau, \rho)$ e $ILU(k)$. Nesta tese, após a avaliação destes dois últimos pré-condicionadores, comprovou-se que suas regras de preenchimento apresentam falhas, no sentido de que nenhuma delas considera o erro associado a cada elemento dos fatores L e U antes de decidir sobre o descarte ou uso dos mesmos. Além disso, seus algoritmos de fatoração não permitem adequar e/ou aplicar uma regra de preenchimento baseada no erro que solucione as falhas das regras convencionais. Outra desvantagem destas regras é que normalmente demandam a realização de operações adicionais no algoritmo de fatoração, tornando os pré-condicionadores menos eficientes.

De forma geral, neste trabalho foram considerados para análise detalhada e busca de soluções os seguintes pontos críticos referentes ao problema em questão:

- A existência de sistemas lineares com matrizes Jacobianas de fluxo de carga mal-condicionadas e próximas da singularidade, associadas a sistemas elétricos extremamente carregados e/ou próximos de um ponto de colapso.
- A existência de sistemas lineares com matrizes Jacobianas de fluxo de carga indefinidas, normalmente associadas a sistemas elétricos de maior porte.
- A falta de critérios para escolher ou descartar os componentes do solucionador, como também para propor novas estratégias numéricas quando as existentes não são apropriadas ou falham, prejudicando o desempenho do solucionador.
- A existência de métodos iterativos que apresentam interrupções no processo de solução e problemas de estabilidade numérica.
- O baixo desempenho dos métodos iterativos sem estratégias de pré-condicionamento, quando comparados aos métodos diretos.
- A existência de estratégias de pré-condicionamento que usam algoritmos de fatoração e regras de preenchimento menos eficientes e sem fundamentação matemática.
- A falta de critérios para o ajuste dos parâmetros do solucionador, de forma que se atinja o melhor desempenho possível e que garanta a robustez do solucionador.

Para solucionar as dificuldades mencionadas, o presente trabalho propôs e avaliou um solucionador iterativo para solucionar subproblemas lineares reais e de difícil convergência inerente ao problema do fluxo de carga. O solucionador proposto é baseado no método iterativo do Resíduo Mínimo Generalizado (GMRES), não apresentou problemas de estabilidade numérica nem interrupções. Como parte do solucionador, foi proposta uma estratégia de pré-condicionamento ILU(ξ) baseada no algoritmo de Doolittle, com regra de preenchimento baseada no cálculo do erro resultante. Esta estratégia substitui

os sistemas lineares com matrizes Jacobianas indefinidas, próximas da singularidade e mal-condicionadas por sistemas equivalentes bem condicionados e de fácil solução.

A estratégia de pré-condicionamento é aplicada conjuntamente com a técnica de reordenamento MD, melhorando significativamente o desempenho do solucionador e superando os solucionadores diretos em todas as avaliações. Acerca da regra de preenchimento, verificou-se que ela solucionou todos os problemas e falhas registradas nas regras de preenchimento dos pré-condicionadores ILUT(τ, ρ) e ILU(k). A regra usada permite preencher menos elementos que os preenchidos por outros pré-condicionadores, sem prejudicar a qualidade e o desempenho geral do solucionador. A eficiência desta regra se deve principalmente à sua fundamentação matemática consistente e ao uso dos recursos proporcionados pelo algoritmo de Doolittle.

Após a realização de várias análises, comprovou-se que o solucionador proposto apresenta o melhor desempenho entre outros solucionadores diretos e iterativos considerados neste trabalho. Seu desempenho se torna ainda mais consistente após o ajuste de seus parâmetros pelo método proposto neste trabalho, encontrando-se faixas recomendáveis para as tolerâncias do método GMRES e valores apropriados para o parâmetro do pré-condicionador ILU(ξ). Múltiplas simulações de análise de contingências comprovaram a robustez e eficiência do solucionador proposto e dos parâmetros escolhidos.

Este trabalho de pesquisa oferece as seguintes contribuições:

- Um solucionador iterativo robusto e eficiente com base no método iterativo GMRES e de desempenho superior aos registrados pelos solucionadores diretos, apropriado para sistemas algébrico-lineares sem restrição de dimensão; suscetível também a contornar diferentes condições de operação, inclusive as associadas com matrizes Jacobianas mal-condicionadas, próximas da singularidade e indefinidas.
- A proposta inovadora de um pré-condicionador ILU(ξ) baseado no algoritmo de Doolittle, com regra de preenchimento baseada no erro resultante que não utiliza heurísticas e com fundamentação matemática, solucionando de

forma eficiente todos os problemas associados à outras regras de preenchimento baseadas no tamanho e posições dos elementos.

- Um programa computacional para simulação de fluxo de carga contendo o solucionador proposto.
- Uma estratégia de qualidade para o ajuste de parâmetros do solucionador, tema normalmente pouco pesquisado, porém, nesta tese, de fundamental importância para seu correto desempenho e robustez.
- Investigações e resultados obtidos sobre métodos iterativos aplicados em problemas envolvendo sistemas elétricos, linha de pesquisa pouco explorada pelos pesquisadores da área de sistemas de energia elétrica e áreas afins.
- Possível aplicação em outras áreas da engenharia e científicas, já que a principal função do solucionador iterativo proposto é solucionar eficientemente sistemas lineares.

6.2

Trabalhos futuros

Como sugestões para futuros trabalhos, propõem-se:

- Adequação do solucionador proposto para solução problemas correlatos, como, por exemplo, o fluxo de potência continuado, análise de contingências e análises no domínio do tempo.
- Avaliar o desempenho do solucionador usando o pré-condicionador ILU(ξ) quase-fixo em simulações de fluxo de carga com controles e em análise no domínio do tempo.
- Propor estratégias de atualização dos elementos do pré-condicionador para evitar sua construção completa em cada iteração Newton-Raphson.
- Avaliar a eficiência do solucionador iterativo para sistemas de energia elétrica de maior-porte (superior a 10 mil barras, por exemplo) sob condições adversas de operação (níveis elevados de carga).

- Avaliar a eficiência do solucionador para diferentes modelagens do fluxo de carga, como por exemplo, as encontradas em (Passos, 2005).
- Implementação do solucionador e do algoritmo de pré-condicionamento utilizando técnicas de processamento paralelo. Melhorar o acesso a hierarquia de memória (máquinas multicore).
- Desenvolver um solucionador baseado nos métodos de Jacobiana-livre e Newton-Krylov com pré-condicionador baseado no erro resultante, visando descartar o ajuste das tolerâncias relativa e absoluta do método GMRES.