

1 Introdução

1.1 Motivação da Pesquisa

Como resultado das necessidades inerentes ao crescimento e as exigências dos mercados elétricos, simulações computacionais estão agora envolvendo sistemas elétricos de maior-porte e extremamente complexos em termos de configuração, dispositivos de controle, características e níveis de cargas. A combinação desses fatores, junto com particularidades do problema investigado (fluxo de carga, estabilidade electromecânica, fluxo de potência ótimo, etc) formam fatores complicadores quando se trata de solucionar os sistemas matemáticos resultantes, sejam os puramente algébricos, os algébricos e diferenciais (EDAs), ou os puramente diferenciais (EDOs), principalmente se os modelos e os métodos numéricos usados forem limitados em alguns aspectos importantes. Os métodos matemáticos podem simplesmente falhar durante o processo de solução ou serem nada econômicos em termos de tempo de CPU e espaço de memória. Portanto, programas computacionais associados à solução de diferentes classes de problemas envolvendo sistemas elétricos tornaram-se uma questão de preocupação demandando não apenas por hardwares eficientes, mas também por modelos matemáticos adequados e métodos numéricos bem organizados em termos de robustez e eficiência computacional. Baseado no exposto, o desenvolvimento e/ou adaptação de métodos numéricos robustos e eficientes para superar dificuldades associadas a solução dos sistemas matemáticos resultantes parece ser um desafio interessante e, por esta razão, se tornou o tema principal de investigação neste trabalho.

O problema numérico a ser tratado nesta pesquisa envolve uma das etapas associadas à solução do fluxo de carga, mais especificamente a resolução do subproblema linear do tipo (1.1) inerente ao método de Newton usado na solução das equações não-lineares, aplicando para tal fim o método iterativo Resíduo Mínimo Generalizado, ou simplesmente GMRES.

$$A \cdot x = b \quad (1.1)$$

1.2

Métodos Iterativos em Problemas de Sistemas Elétricos: Breve Histórico

A aplicação de métodos iterativos em estudos envolvendo sistemas de energia elétrica foi tratada com certa cautela pelos pesquisadores sob o argumento de baixa confiabilidade e lentidão (Borges et al., 1996). Atualmente tanta cautela não se justifica, devido não apenas às características dos métodos iterativos mais modernos, como o Resíduo Mínimo Generalizado (GMRES) e o Gradiente Bi-Conjugado Estabilizado (Bi-CGSTAB), mas também devido às técnicas de pré-condicionamento que tornam o processo de solução mais eficiente, ou seja, a convergência é obtida em poucas iterações. Entre os vários estudos computacionais envolvendo sistemas elétricos, o fluxo de carga é um dos executados com maior frequência pelos engenheiros para o planejamento da expansão, planejamento da operação e para supervisão e controle. O fluxo de carga é utilizado para solucionar sistemas de grandes e pequenas dimensões, para solucionar múltiplos casos como na análise de contingências e fluxo de carga continuado, além de ser utilizado como ferramenta em cálculos mais complexos, como otimização, estabilidade e análise de segurança (Borges et al., 1997).

A proposta inicial em usar técnicas iterativas em problemas de fluxo de carga foi primeiramente lançada em (Galiana et al., 1994). Desde então, têm sido aplicadas em sistemas elétricos de maior-porte (Flueck & Chiang, 1998), mas o esforço tem sido direcionado em se encontrar pré-condicionadores que acelerem o processo de convergência (Chen, 2005). A referência (Semlyen, 1996) apresentou os resultados da proposta metodológica para fluxo de carga no Subespaço Krylov, formulando duas alternativas na aproximação da matriz Jacobiana, uma através de uma matriz constante e a outra pelo processo Quase-Newton, onde não se usa a matriz Jacobiana explicitamente. Durante cada iteração do método GMRES é necessário multiplicar a matriz Jacobiana por um vetor v_j do subespaço Krylov. Esta operação é realizada sem calcular explicitamente a matriz Jacobiana.

Em (Borges et al., 1996) é apresentado pela primeira vez o método Gradiente Bi-Conjugado Estabilizado pré-condicionado aplicado à solução do problema de fluxo de carga usando Newton-Raphson. O algoritmo foi executado em ambiente computacional vetorial-paralelo e em (Borges et al., 1997) são apresentadas e destacadas as vantagens do uso dos métodos iterativos em ambientes computacionais paralelos. Em (Pai e Dag, 1997) os métodos iterativos do subespaço Krylov são tratados como uma alternativa atrativa de solução dos problemas de fluxo de carga, estimação de estado e segurança de sistemas elétricos de potência. Os pré-condicionadores baseados em fatoração incompleta ILU são recomendados pelos autores.

Em (Flueck & Chiang, 1998) é apresentado o método Newton-GMRES resultante da combinação do método Newton inexato e o método GMRES pré-condicionado com fatoração incompleta. Nesse trabalho são usadas técnicas de reordenamento e é mencionado que o método RCM (Reverse Cuthill Mckee) é superior ao MMD (Minimum Degree). Todas as simulações foram realizadas usando RCM e um sistema de 8.027 barras. São realizados experimentos com quatro tipos de pré-condicionadores. O primeiro é uma matriz diagonal cujos elementos são os mesmos da diagonal principal da Jacobiana. O segundo é o pré-condicionador ILU(0). O terceiro pré-condicionador é criado a partir da matriz formada somente pelos blocos $dP/d\theta$ e dQ/dV da matriz Jacobiana, sem considerar os blocos dP/dV e $dQ/d\theta$, e o quarto usa a matriz do método desacoplado rápido como pré-condicionador (FastD). Os dois últimos pré-condicionadores foram os únicos que convergiram para um sistema de maior porte. O método Newton inexato com GMRES pré-condicionado com FastD apresentou o melhor desempenho, sendo 50% mais rápido que o tradicional método Newton-LU.

Em (de Leon & Semlyen, 2002) é realizada uma comparação entre métodos iterativos (GMRES, BiCGSTAB, CGS, BiCG, QMR) e o método direto de fatoração LU. É apresentada uma estratégia de atualização parcial da matriz Jacobiana em cada iteração do método Newton e mostra para dois sistemas de 3.186 e 6.372 barras que o método iterativo BiCGSTAB é computacionalmente mais eficiente que o método direto, para realizar as comparações foram contabilizados o número total de pontos flutuantes em (Mflops) durante toda a simulação. Nesta publicação se recomenda o uso do método Newton e se menciona que os métodos desacoplados apresentam problemas de

convergência quando os sistemas operam em condições de máximo carregamento e quando alguns ramos possuem valores grandes na relação R/X . Também se menciona que o uso do método Quase-Newton pode resultar desvantajoso quando apresenta maior número de iterações que o método Newton-Raphson.

A referência (Dag & Semlyen, 2003) soluciona o problema de fluxo de carga com o método desacoplado rápido; desta vez, substituindo o método direto pelo método iterativo gradiente conjugado com pré-condicionador do tipo aproximação da inversa. Nessa referência são usadas técnicas de escalonamento, obtendo-se bons resultados. Já em (de Leon, 2003) são feitas críticas à referência (Dag & Semlyen, 2003) e são apresentadas duas justificativas para não se usar os métodos desacoplados junto aos métodos iterativos. Os métodos desacoplados apresentam problemas de convergência quando os sistemas operam em condições de carregamento máximo e quando alguns ramos possuem valores altos na relação R/X . Quando usados os métodos diretos, em ambos os métodos (Newton e desacoplado rápido), o processo mais demorado é a fatoração LU de matrizes grandes. Portanto, os métodos desacoplados se mostram mais eficientes, pois é necessário fazer uma única fatoração durante toda a simulação. Quando usados os métodos iterativos, em princípio, não há fatoração LU envolvida, conseqüentemente, o método desacoplado não pode ser aproveitado como no método direto. De forma indesejável, o método desacoplado aumenta o número de sistemas lineares a serem resolvidos (2 sistemas), o que torna mais demorado a solução. Ainda nessa mesma publicação, recomenda-se que futuros trabalhos na área de métodos iterativos pré-condicionados sejam desenvolvidos usando o método de Newton ao invés dos métodos desacoplados.

Finalmente, em (Chen & Shen, 2006) é apresentado um pré-condicionador adaptativo baseado nos métodos de aproximação da inversa da matriz Jacobiana. É usado o método Newton-GMRES(m), onde o pré-condicionador é construído considerando a aproximação da matriz Jacobiana (Jacobian-Free) do Newton inexato. O pré-condicionador não é calculado completamente a cada iteração GMRES, ao invés disso é atualizado mediante a fórmula de Broyden, de forma externa dentro do algoritmo Newton, e de forma interna dentro do algoritmo GMRES. O pré-condicionador é comparado com o pré-condicionador de Choquet (Choquet; 1995), também do tipo Jacobian-Free. O pré-

condicionador proposto apresentou melhores resultados, quando usado o logaritmo da norma do resíduo para avaliação da convergência do método GMRES. Não foram apresentados os tempos computacionais, nem o número de operações ponto flutuante para comparações do desempenho computacional

1.3 Relevância e Estrutura do Trabalho

Embora métodos baseados em fatoração triangular completa LU (Stott, 1974; Monticelli, 1983; Alves et al., 1999; Tinney, 1967) tenham sido, e continuam sendo aplicados com sucesso em problemas algébrico-lineares do tipo (1.1), sendo estes bastante robustos e confiáveis e com técnicas avançadas de esparsidade, dependendo da dimensão do problema sob investigação estes podem exigir um grande esforço computacional em termos de espaço de memória e tempo de CPU (Duff et al., 1986; George & Liu, 1989). Além disso, sob o ponto de vista de computação paralela, os esforços não têm resultado nas melhorias esperadas (Alvarado, 1979; La Scala, 1989; Chai, 1993). Neste caso, métodos iterativos baseados no subespaço Krylov, que é o caso do GMRES, podem ser vistos como eficientes alternativas de solução, pois demandam por menos espaço de memória e menor tempo de CPU (Van der Vorst, 2003). Apesar das vantagens geralmente apresentadas por esses métodos sobre os diretos na solução de sistemas algébrico-lineares de grande-porte, em algumas aplicações estes tendem a falhar tornando-se necessário considerar uma estratégia conhecida como pré-condicionamento, sendo que esta estratégia nem sempre garante a convergência, ou até mesmo possibilita obtê-la num esforço computacional aceitável. Portanto, o método passa a não ser o único responsável pela solução do problema, dependendo também da eficiência do pré-condicionador. Também, é possível considerar estratégias numéricas que melhorem a qualidade do pré-condicionador influenciando positivamente o processo de convergência. Vale ressaltar que o pré-condicionamento é o elemento mais crítico na aplicação de métodos iterativos, segundo as referências (Van der Vorst, 2003; Barrett & Ed, 2006; Greenbaum, 1997; Meijerink & Van der Vorst, 1997; Saad & Schultz, 1986).

Foi informado no item 1.1 que objetivo inicial desta pesquisa era aplicar o método iterativo GMRES na solução do subproblema linear do fluxo de carga.

Porém, o GMRES sem uma estratégia de pré-condicionamento não é nada eficiente se comparado aos tradicionais métodos diretos. Ainda, seu desempenho pode ser melhorado se antes da construção do pré-condicionador forem consideradas estratégias numéricas para melhorar a sua qualidade em termos de robustez e precisão. Para tal fim, a literatura (a consultada é informada ao longo do texto) com forte apelo matemático indica tipos de pré-condicionadores e respectivas estratégias para diferentes matrizes, realizando estudos e analisando os resultados, enfocando robustez e eficiência do método iterativo considerado. No entanto, notou-se na literatura consultada, principalmente a com apelo matemático, uma quantidade considerável de métodos iterativos bem como de pré-condicionadores para diferentes estudos, quantidade não tão considerável para o estudo de interesse. Este fato resultou na necessidade em se investigar mais detalhadamente métodos iterativos do subespaço Krylov, como também de pré-condicionadores, para o problema abordado aqui. Os resultados dessas investigações estão presentes nos Capítulos 2 e 3, onde se procurou justificar, principalmente, as opções escolhidas na tese, como por exemplo, a do método iterativo cujas propriedades fossem mais vantajosas para solucionar o subproblema linear e que explorasse de forma eficiente as características e propriedades da matriz de coeficientes, bem como identificar pontos fracos do processo iterativo e propor alternativas para superá-los. A presença de experimentos numéricos preliminares nesses capítulos visou ilustrar e reforçar os resultados das investigações.

Como resultado dos estudos dos Capítulos 2 e 3, foi proposto e desenvolvido um solucionador iterativo baseado no método GMRES, este descrito no Capítulo 4, para ser aplicado nos sistemas lineares associados a solução do fluxo de carga, principalmente os de difícil convergência decorrentes de matrizes Jacobianas mal condicionadas. Propostas inovadoras de estratégias, principalmente para a qualidade do pré-condicionador e conseqüentemente para o processo iterativo, são apresentadas neste capítulo.

Note que o termo solucionador assumido nesta tese está associado ao termo “solver” em inglês e corresponde a um conjunto de métodos e estratégias matemáticas ordenadas de forma a solucionar um determinado problema (Ascher & Petzold, 1998; Pai et al., 1995; Pai & Dag, 1997; Chaniotis & Pai, 2000; de Leon & Semlyen, 2002; Duff & Scott, 2004; Weiss, 1996; Sonneveld, 1989). Este solucionador foi implementado em um programa computacional de

fluxo de carga e experimentos numéricos usando duas configurações do Sistema Interligado Nacional (SIN) para condições de operação adversas foram realizados no Capítulo 5, a fim de verificar a sua robustez e eficiência, usando para fins comparativos um solucionador direto e dois programas computacionais bem conhecidos, estes também usando métodos diretos. Os resultados corroboram o alto desempenho do solucionador proposto e respectivos parâmetros. Finalmente, as conclusões e recomendações para futuros trabalhos estão presentes no Capítulo 6.