

Um Programa Computacional Para Análises em Regime Permanente e Dinâmico Fazendo Uso de Técnicas Iterativas

José E. O. Pessanha, UFMA Osvaldo Saavedra, UFMA Alex A. Paz, UFMA/PUC-Rio

Fábio Mendes, ELETRONORTE S.A. e Júlio C. R. Buzar, ELETRONORTE S.A.

Resumo - Este artigo apresenta as principais características de um protótipo computacional desenvolvido no projeto intitulado “Desenvolvimento de Metodologia Para Mapeamento de Regiões do Sistema ELETRONORTE com Problemas de Tensão” do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da ELETRONORTE S.A., ciclo 2002/2003. O protótipo em questão é um programa computacional que realiza de forma conjunta análises estáticas e dinâmicas numa única plataforma. Para garantir a eficiência computacional do protótipo, foram implementados o Método de Diferenciação Regressiva (BDF) de passo variável em conjunto com o método direto baseado na eliminação Gaussiana, e também o método iterativo Resíduo Mínimo Generalizado (GMRES) baseado em técnicas de projeção Krylov. Este último é bastante explorado neste artigo uma vez que caracteriza uma contribuição significativa na área dos métodos numéricos. A eficiência destas técnicas é verificada através da solução do sistema linear algébrico associado ao problema do fluxo de carga no sistema Norte-Nordeste Brasileiro.

Palavras-chave— Colapso de Tensão, Estabilidade de Tensão, Métodos Iterativos, Simulação Computacional.

I. INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica da Eletronorte, área do estado do Maranhão, apresentava problemas no dia-a-dia da operação caracterizados por oscilações de tensão em algumas áreas consideradas estratégicas por possuírem indústrias importantes para o estado. Geralmente, essas oscilações resultavam de distúrbios no sistema, que em alguns casos ocorriam distantes eletricamente da região afetada, indicando a priori uma elevada sensibilidade à pequenas variações nas condições de operação. Essas oscilações se concentravam em algumas áreas críticas do

sistema, causando problemas operacionais principalmente à consumidores industriais. A equipe após investigações em parceria com engenheiros da ELN-Ma identificou uma indústria de grande porte (ALUMAR) instalada na cidade de São Luís, extremamente susceptível a oscilações de tensão, e também com características relevantes ao problema da estabilidade de tensão.

Tradicionalmente, estudos de estabilidade de tensão usam análises via formulações algébricas (métodos estáticos) baseadas nas formulações convencionais de fluxo de carga. Informações obtidas a partir dessas análises são úteis para a compreensão do fenômeno, e principalmente para obter o grau de segurança de um determinado ponto de operação através de índices específicos. Entretanto, para certos cenários, o fenômeno da estabilidade de tensão está estritamente relacionado com as dinâmicas das cargas em resposta à perturbações no sistema, e geralmente nestes casos as dinâmicas inerentes ao comportamento da carga não são capturadas pelos modelos algébricos. Para tal objetivo, principalmente em análises post-mortem, análise no domínio do tempo é a forma mais apropriada de investigação. Neste caso, as cargas são modeladas por sistemas de equações diferenciais ordinárias (EDOs), ou por sistemas de equações diferenciais e algébricas (EDAs).

O objetivo principal deste projeto foi desenvolver um protótipo computacional para analisar problemas de tensão nos sistemas de transmissão de energia elétrica da ELETRONORTE. Esta primeira versão se destina à estudos off-line. Os principais aspectos desta ferramenta computacional são apresentados aqui.

II. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo usa técnicas numéricas avançadas [1-6] na solução dos sistemas de equações diferenciais e algébricas (EDAs) que representam a rede e seus componentes dinâmicos, aproveitando-se a parte algébrica do algoritmo para calcular índices que indiquem problemas de tensão. Geralmente, análises de problemas de tensão em regime permanente e no domínio do tempo apresentam objetivos específicos, sendo, portanto efetuadas por programas distintos. O programa desenvolvido agrega esses recursos sem a necessidade de recorrer à outro(s), sendo uma ferramenta muito útil para operadores e planejadores de sistemas de energia elétrica. O usuário poderá decidir de acordo com seu interesse se deseja essas duas formas de

Este trabalho foi apoiado parcialmente pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Eletronorte S.A., ciclo 2002/2003, sob o contrato No 45000044031.

J.E.O.Pessanha é Professor Associado do Departamento de Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão. (pessanha@dee.ufma.br)

Osvaldo Saavedra é Professor Titular do Departamento de Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão. (osvaldo@dee.ufma.br)

A. A. Paz é aluno de Doutorado do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. (alarpazp@gmail.com)

Fábio Mendes é engenheiro eletricitista da ELETRONORTE S.A. (fabio.mendes@eln.gov.br)

J.C.R. Buzar é engenheiro eletricitista da ELETRONORTE S.A. (juliocesar@eln.gov.br)

análise, ou apenas uma delas. O formato dos dados de entrada segue os padrões dos programas usados pela ELETRONORTE.

A fim de capturar nas simulações computacionais os efeitos relevantes aos fenômenos de interesse, esse protótipo dispõe dos seguintes modelos:

- Máquina Síncrona – Modelos Clássico e IV. Este último representa os efeitos transitórios, sub-transitórios, de campo, amortecimento e saturação.
- Regulador Automático de Tensão.
- Sinais Estabilizadores.
- Limitador de Sobre-excitação.
- Transformador de Tape Variável (contínuo).
- Acréscimo linear de carga.
- Carga estática polinomial (parcela de potência, corrente e impedância constante).

Foi desenvolvido e implementado um algoritmo de passo e de ordem variável para a solução das EDAs, de forma a garantir eficiência numérica e computacional das simulações. O programa soluciona sistemas de EDAs de grande-porte fazendo uso do método iterativo pré-condicionado GMRES (Resíduo Mínimo Generalizado) para resolver o sistema linear a cada iteração, incluindo nos seus domínios testes de erro e de convergência, e a formulação do método de Krylov para análise de sensibilidade das equações diferenciais. A metodologia desenvolvida aqui, que agrega formulações algébricas e diferenciais, possibilita ao operador:

- Identificar as barras onde as ações de controle podem apresentar o efeito esperado;
- Identificar as barras onde às ações de controle podem não apresentar o efeito esperado;
- Fornecer informações para desenvolver estratégias de controle para evitar ou reverter situações de risco;
- Ajudar na análise "post-mortem" de uma condição de operação anormal do tipo "isto nunca aconteceu" ou do tipo "isto não deveria acontecer" que resultou em colapso parcial ou total da tensão;
- Evitar interrupções inesperadas na continuidade de serviço;
- Identificar responsabilidades técnicas/operacionais pelos problemas de tensão.

Algumas das técnicas e métodos desenvolvidos para a análise de redes elétricas foram integradas em um conjunto de aplicações computacionais que consiste dos seguintes módulos:

- Análise em regime permanente: fluxo de potência, análise de contingências no estágio definição e seleção.
- Análise no domínio do tempo: simulações de fenômenos de estabilidade de tensão e transitória angular.

A linguagem de programação usada foi Fortran usando o compilador Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.1.0. O tipo de projeto usado foi o Fortran Windows Application que se caracteriza pelos projetos Windows simples e/ou múltiplos, incluindo menus, caixas de diálogos e rotinas gráficas [7]. O protótipo integra os estudos no regime permanente bem como no domínio do tempo, permitindo interação mútua na mesma plataforma. A Figura 1 apresenta a interface gráfica baseada no Windows (GUI) apresentada para o usuário. A interface visual do programa com o usuário é amigável e flexível.

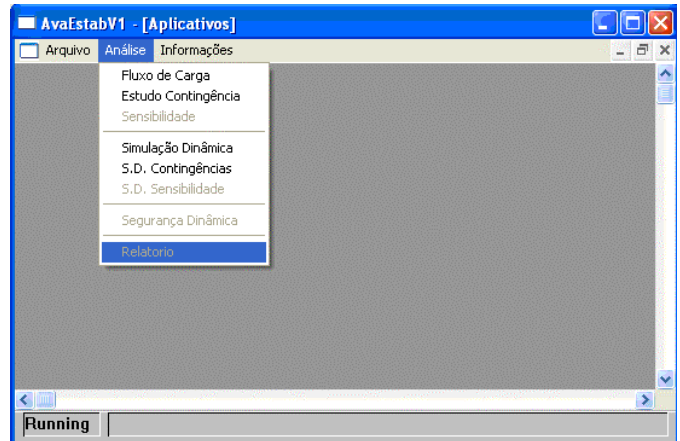


Figura 1. Interface gráfica do SIMFES

A. Regime Permanente

Como já mencionado anteriormente, estudos de fluxo de carga e análise de contingência encontram-se disponíveis no protótipo. A seguir, se apresenta resumidamente, as metodologias e estratégias numéricas usadas nestes estudos.

B. Fluxo de Carga

As metodologias propostas para resolver o fluxo de carga estão apresentadas na Figura 2. Entre as técnicas tradicionais (Newton-Rapshon e o Desacoplado Rápido) incluiu-se uma variação do subespaço de Krylov identificada ao longo deste projeto como Resíduo Mínimo Generalizado (GMRES), usado na solução do sistema linear resultante. A opção Krylov-GMRES apresenta como pré-condicionador a fatoração incompleta LU.

C. Análise de Contingência

No estágio definição e seleção de análise de contingência é usado o conhecido Teorema de Compensação [8] para representar as saídas de linhas através de injeções de potência nas barras comprometidas. A Figura 3 mostra a interface gráfica quando a análise de contingência é solicitada.

Embora as contingências consideradas sejam simples (critério N-1) do tipo retirada de circuitos e shunt, deixou-se uma opção disponível para futuras implementações, a representação de saídas de unidades geradoras e/ou de cargas através de vetores esparsos.

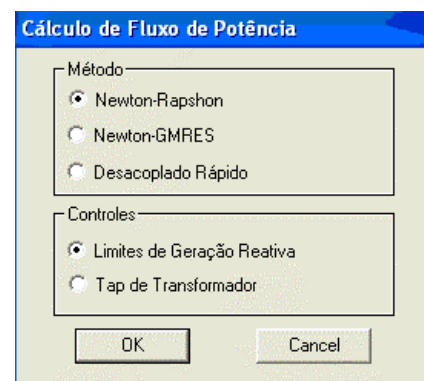


Figura 2. Caixa de diálogo usada na análise em Regime Permanente.

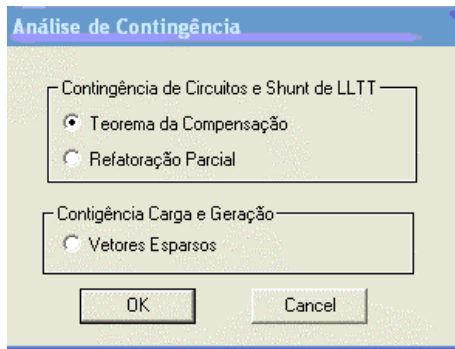


Figura 3. Caixa de diálogo usada na análise de contingência.

D. Método Direto: BDF com Fatoração LU

Em cada passo de integração considerado, uma seqüência de sistemas algébricos não-lineares é gerada. Esses são solucionados pelo método iterativo de Newton com método direto na resolução do subproblema $Ax=b$. Esses métodos diretos estão baseados na conhecida eliminação Gaussiana.

Uma segunda opção é o método Krylov-GMRES em sua completa e/ou incompleta forma e auxiliado por estratégias de escalonamento e/ou pré-condicionamento. Os pré-condicionadores apresentados a seguir podem ser aplicados à sistemas lineares. Portanto, podem ser testadas alternativas em função das premissas de eficiência numérica e computacional. Então, o método de Krylov é aplicado ao sistema na sua nova forma, mas equivalente ao sistema linear original, obtendo desempenho superior ao sem pré-condicionadores.

A estratégia conhecida como Diferenças de Quocientes aproxima as matrizes de sensibilidade e/ou Jacobiana. A tarefa é auxiliada pela avaliação das funções associadas aos sistemas de EDAs.

Já o pré-condicionador ILU (fatoração incompleta) aproxima a matriz de sensibilidade e/ou Jacobiana através de uma lógica de fatoração incompleta. Esta tarefa pode ser auxiliada pelas diferentes estratégias de normalização e escalonamento e ordenamento, além de contar com duas variações conhecidas como ILUT e ILUTP.

III. DESEMPENHO COMPUTACIONAL

A fim de atestar a eficiência dos métodos iterativos para sistemas reais, usou-se para tal fim o sistema Norte-Nordeste Brasileiro, constituído de 564 barras, 831 linhas e 56 geradores, no cenário do planejamento do mês de abril do ano de 2005, considerando carga máxima. As técnicas testadas foram:

- Sem Pré-Condicionamento e com Estratégias de Re-inicialização;
- Sem Pré-Condicionamento e com Estratégias de Re-inicialização e Diferenças de Quocientes;
- Pré-Condicionamento ILUT(p, τ) com Estratégias de Re-inicialização.

Com o objetivo de aproveitar o grande número de não-zeros da matriz Jacobiana, um esquema especial de armazenamento para matrizes esparsas foi implementado. A finalidade é representar só os elementos não-zeros e efetivar

operações mais facilmente. O esquema escolhido foi Compressed Format Row (CSR) por ser adequado aos objetivos.

Aplicaram-se algumas permutações nos pontos mais relevantes do processo GMRES(m), especificamente onde se precisa operar matrizes e vetores. Essas permutações consistem em preparar, por exemplo, o vetor resultante usado com o pré-condicionamento, seja ILU(0) ou ILUT(p, τ), através das aproximações do vetor resultante do esquema das diferenças de quocientes, já explicado anteriormente. A Figura 4 apresenta a estrutura que tipifica a configuração do sistema N-NE; foi considerado apenas a submatriz H por ser simetricamente igual às outras submatrizes, isto é L, M, N.

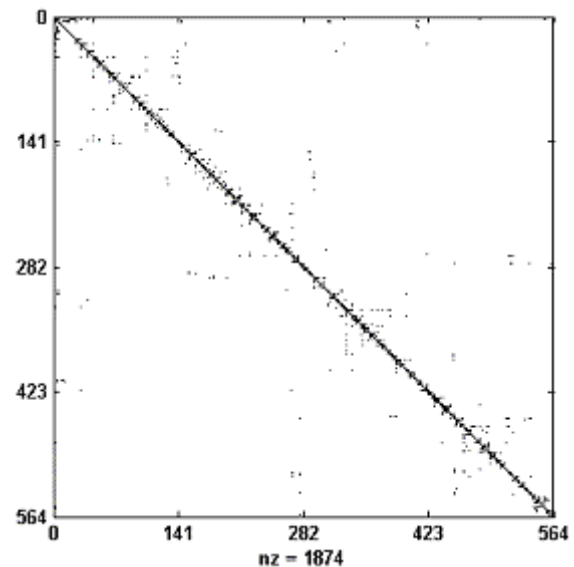


Figura 4. Estrutura típica da matriz Jacobiana do Sistema N-NE Brasileiro.

A. GMRES Sem Pré-Condicionador e com Estratégias de Re-inicialização

Usa-se um algoritmo iterativo sem nenhum tipo de pré-condicionamento do sistema original. A Figura 5 apresenta os resultados em função da norma residual do resíduo de erros, das injeções de potência, e dos números de iterações não-lineares usados no cálculo (numa escala logarítmica). Também se apresenta na seqüência os tempos de processamento computacional gasto por iteração para cada caso simulado.

Estes casos simulados são diferenciados em função do número de iterações especificadas, ou seja, considerando-se multiplicidade do parâmetro base m igual a 100. Deste ponto em diante essa seqüência de variações apresentada na Tabela 1 é considerada em todas as simulações.

TABELA 1.
NÚMERO DE ITERAÇÕES PARA CADA CASO

Legenda	m
Base	100
1x	200
2x	400
3x	800
4x	1000

B. GMRES Sem Pré-Condicionador e com Estratégias de Re-inicialização e Diferença de Quocientes

Aqui, são usadas as técnicas de diferenças de quocientes no vetor resultante da multiplicação da matriz Jacobiana e dos vetores bases como já indicado no processo. O fator de ajuste “ σ ” usado na aproximação do vetor resultante desempenha uma função fundamental. Assim, com uma escolha adequada, além das vantagens comentadas nas seções anteriores, evitam-se falsas divergências ou convergências a pontos indesejáveis, embora esse valor seja consequência da heurística da programação. Para efeitos de simulação trabalhou-se com um fator $\sigma=10^{-3}$.

A Figura 6 mostra o processo de convergência do sistema não-linear usando as estratégias indicadas. Embora estes testes tenham caráter preliminar, pode-se observar o ganho no tempo ao se realizar menos iterações do que o teste anterior. Também, pode-se perceber que a característica de convergência é maior do que a linear e menor do que a quadrática.

C. GMRES com Pré-Condicionador ILUT(p, τ), Estratégias de Re-inicialização e Threshold

A fatoração incompleta baseada nos níveis de controle do preenchimento de valores não-nulos durante a fatoração é indiferente aos valores numéricos uma vez que os elementos substituídos no processo de eliminação dependem da estrutura da matriz Jacobiana. Para problemas reais, este procedimento pode resultar em dificuldades visto que alguns métodos alternativos disponíveis se baseiam no esquema de eliminação do processo Gaussiano em função da magnitude, ao invés de sua localização. Com essas técnicas o padrão de zeros P é determinado dinamicamente. A forma mais simples de obter essa fatoração incompleta é modificar um solucionador esparsa direto para ignorar elementos “pequenos”. No entanto, esta tarefa pode ser bem complicada uma vez que a maioria dos solucionadores diretos esparsos apresenta várias camadas de estrutura de dados podendo tornar essa técnica ineficiente. A alternativa é desenvolver uma estratégia similar a ILU(0). Um pré-condicionador ILU com estratégias Threshold (ILUT) pode ser derivado da versão IKJ da eliminação Gaussiana, incluindo um conjunto de regras para desprezar elementos pequenos, ou seja, ao aplicar uma regra para este é feita a substituição do elemento por zero caso satisfaça um conjunto de critérios pré-estabelecidos. A técnica ILU(0) pode ser considerada como um caso particular do algoritmo

ILU(p, τ). A regra de eliminação para o caso ILU(0) é permutar elementos por zero que estão em posições não pertencentes à estrutura original da matriz [9].

Neste último teste, Figura 7, observa-se a rápida convergência do sistema ao ser pré-condicionado pelo ILUT. Nota-se também que os tempos gastos para cada iteração apresentam o mesmo valor, ou seja, a convergência linear atingiu o mesmo número global de iterações lineares. Esse último exemplo confirma a eficiência dos pré-condicionadores para métodos iterativos.

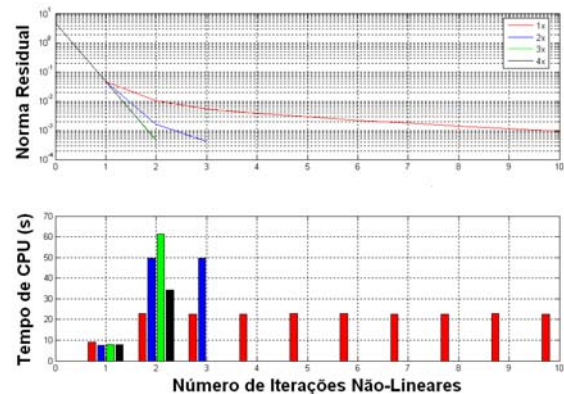


Figura 5. GMRES simples com re-inicialização

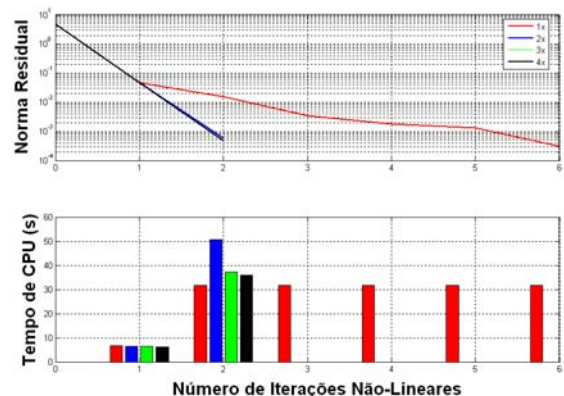


Figura 6. GMRES simples com re-inicialização e Diferenças de Quocientes

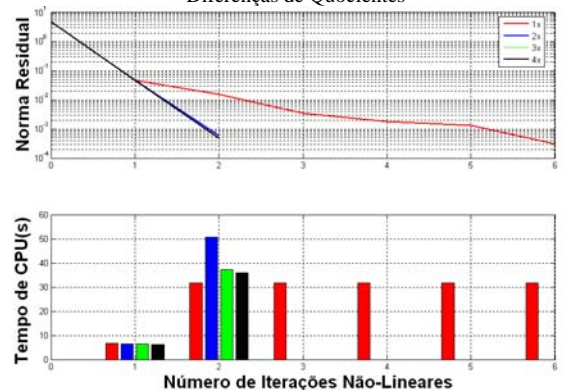


Figura 7. GMRES com Pré-Condicionador ILUT(p, τ), Estratégias de Re-inicialização e Threshold

IV. SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Encontra-se disponível duas metodologias numéricas, sendo estas o Método de Diferenciação Regressiva (BDF) em conjunto com o método direto baseado na eliminação Gaussiana e o BDF com o método iterativo GMRES baseado em técnicas de projeção Krylov. A Figura 8 apresenta a caixa de diálogo com suas respectivas opções numéricas.

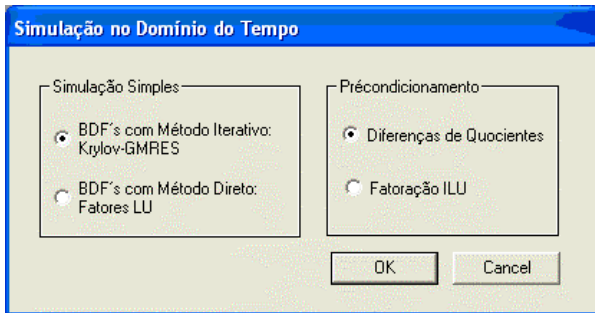


Figura 8. Caixa de diálogo usada na análise no domínio do tempo.

A opção iterativa é auxiliada por duas estratégias: Diferenças de quocientes e Fatoração LU incompleta (pré-condicionador).

A eficiência do módulo dinâmico é ilustrada através de simulações envolvendo fenômenos de curta e de longa-duração nos sistemas-teste IEEE118 e IEEE150 barras.

A. Máximo Carregamento- IEEE118

É verificada a robustez do GMRES pré-condicionado ILUT(p, τ) com estratégias de re-inicialização e diferença de quocientes no domínio do tempo. Para tal fim, é usado aqui o sistema-teste IEEE118 incluindo-se diversos dispositivos de controle, resultando em aproximadamente 1000 variáveis de estado. Os modelos dinâmicos dos geradores síncronos incluem efeitos subtransitórios e respectivos sistemas de controle (regulador de tensão e sinais estabilizadores de potência). O maior número de variáveis de estado, aproximadamente 70% do total, corresponde aos geradores, e também o número de equações diferenciais ordinárias é superior ao número de equações algébricas. As equações diferenciais são solucionadas por diferenciação regressiva (BDF).

O máximo carregamento é procurado através de um mecanismo de acréscimo contínuo de carga ativa em todas as barras de carga do sistema, usando uma função rampa com uma taxa de crescimento ($0,01 \text{ p.u.s}^{-1}$). O acréscimo de carga é iniciado no instante $t = 5(\text{s})$ e alguns níveis de tensão vão se deteriorando, até a ocorrência colapso de tensão, quando o ponto de máximo carregamento é atingido (5495,0 MW) no instante $t = 92,92(\text{s})$, como ilustra a Figura 9. O regulador de tensão de um dos geradores atingiu seu limite segundos antes da ocorrência do colapso, perdendo a habilidade de controlar sua tensão terminal, contribuindo para acelerar o processo de colapso de tensão. O tempo de CPU gasto foi de 123,94(s) e o comportamento do passo de integração está ilustrado na Figura 10.

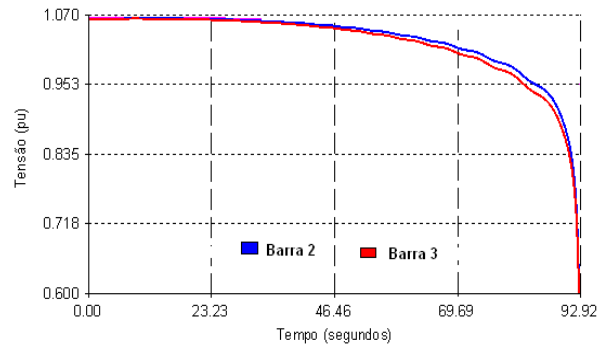


Figura 9. Tensão em barras críticas

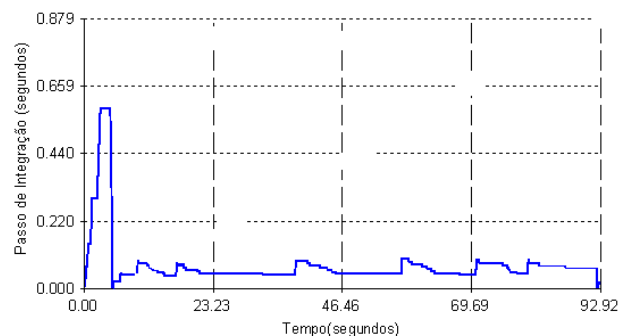


Figura 10. Variação do passo de integração

Os maiores esforços associados à avaliação das EDAs foram observados no início da simulação, no instante inicial do distúrbio, em $t = 5(\text{s})$, e no instante em que o máximo carregamento é atingido, em $t = 92,92(\text{s})$. As responsabilidades neste caso podem ser divididas entre as tarefas associadas às avaliações da matriz de iteração associada a modelagem dinâmica e/ou do pré-condicionador M , e as operações associadas às multiplicações envolvendo matrizes e vetores. Não foi registrado nenhum teste de critério de erro não atendido, indicando uma boa aproximação à solução apesar do sistema ter sido submetido continuamente a um impacto significativo de aumento de carga.

B. Estabilidade de Tensão de Longa Duração-IEEE150

Usa-se agora o IEEE150 barras, 50 geradores e 458 ramos, adaptado para estudos de estabilidade de tensão de longo-termo. Nesta nova configuração, além dos cinco transformadores de tape variável, o sistema de controle da excitação da máquina síncrona (regulador automático de tensão) passa a ser monitorado por limitadores de sobrecitação nos 50 geradores. Com isso, pretende-se capturar os efeitos relevantes ao fenômeno da estabilidade de tensão de longo-termo e aumentar a complexidade do processo de avaliação. A Tabela 2 resume os dados desta simulação.

Os resultados obtidos nesta simulação estão ilustrados nas Figuras 11(a)-(g). Neste cenário estão incluídos fenômenos rápidos, associados à estabilidade transitória angular, bem como fenômenos lentos associados, por exemplo, as ações dos transformadores de tape variável (ULTC) e dos limitadores de corrente de campo dos geradores (OXL).

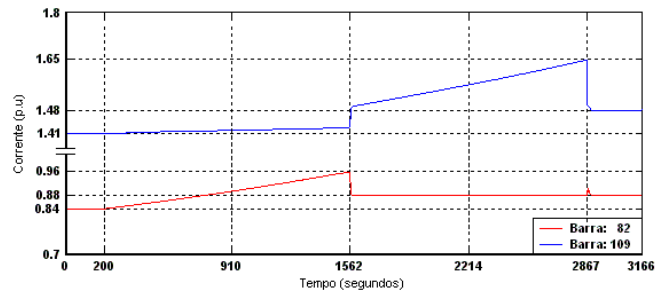
TABELA 2.
INFORMAÇÕES SOBRE A SIMULAÇÃO

SEQÜÊNCIA DE EVENTOS	
Inserção de Reator de 20 Mvar.	
Número de Barra	146
Tempo de Início do Evento (s)	5,0
Acréscimo Linear de Potência Aparente da Carga	
Número de Barras	Taxa de Aumento (p.u.s ⁻¹)
146	0,003
147	0,001
148	0,007
149	0,009
150	0,005
Tempo de Início do Evento (s)	200,0
Tempo Final da Simulação (s)	3166,0

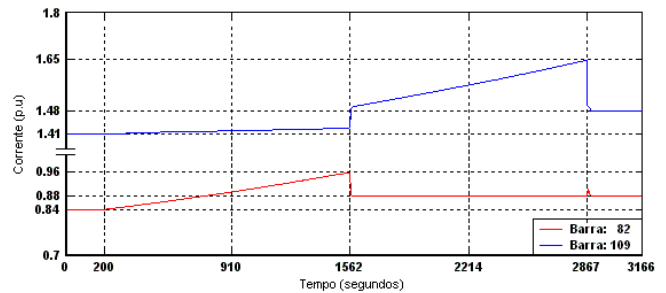
O sistema é submetido a uma primeira contingência, caracterizada pela inserção de um reator de 20 Mvar na barra 146 no instante $t = 5$ segundos, resultando numa redução no perfil de tensão nesta barra, provocando a ação do transformador de tape variável (ULTC) a partir dos 35 segundos após o dispositivo de controle do ULTC detectar níveis de tensão fora da faixa desejada. A Figura 11(f) ilustra a dinâmica do tape restaurando a tensão e a carga para níveis pré-distúrbio. Após esse primeiro evento, através da Figura 11(e) pode-se observar o comportamento oscilatório durante os primeiros 115 segundos, também de pequena amplitude. Nas Figuras 11(a) e (f) estão registradas as dinâmicas lentas associadas a ação dos limitadores de corrente de campo e aos transformadores de tape variável.

No instante $t = 200$ segundos, o sistema é submetido a um aumento progressivo de potência reativa nas barras 146, 147, 148, 149 e 150 (as taxas de incremento estão apresentadas na Tabela 2), sendo este acréscimo atendido inicialmente pelas reservas de potência reativa dos geradores e dos compensadores próximos a essas áreas.

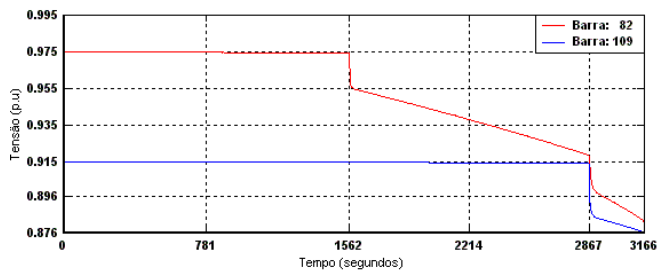
À medida que a demanda de potência reativa aumenta, os geradores vão atingindo seus limites de capacidade de geração de potência reativa, limite este imposto pelo limitador de sobreexcitação. Quando o gerador da barra 82 atingir seu limite de corrente de campo, em $t = 1562$ segundos, sua tensão terminal não é mais mantida constante, como mostram as Figuras 11 (a) e (c). O segundo gerador a atingir seu limite de capacidade de geração de potência reativa é o da barra 109 em $t = 2867$ segundos (Figuras 11 a e c). À medida que os demais geradores vão atingindo seus limites, o sistema passa a enfrentar problemas de instabilidade de tensão, onde, por consequência, a ocorrência do colapso de tensão é iminente.



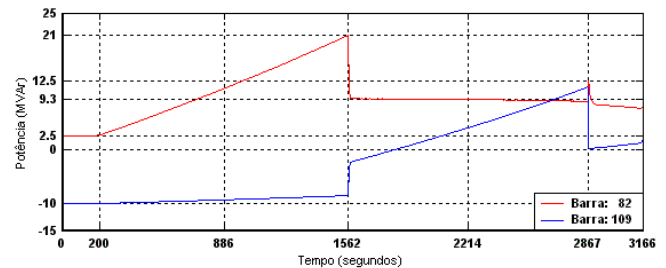
(a) Corrente de campo limitada pelos OXL



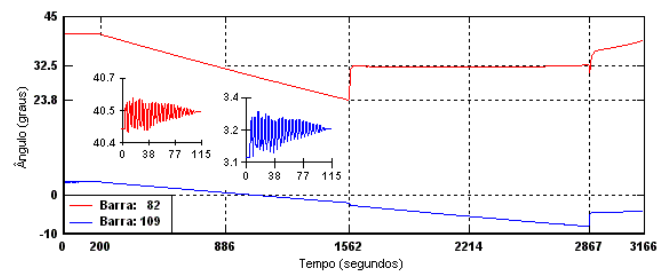
(b) Tensão de campo dos geradores



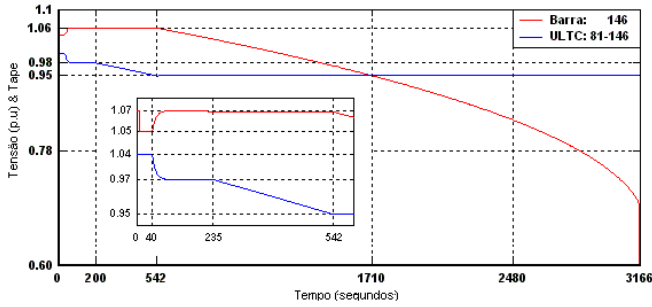
(c) Tensão Terminal dos geradores.



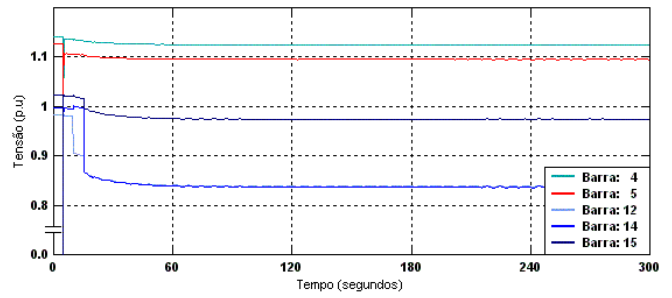
(d) Potência Reativa Gerada



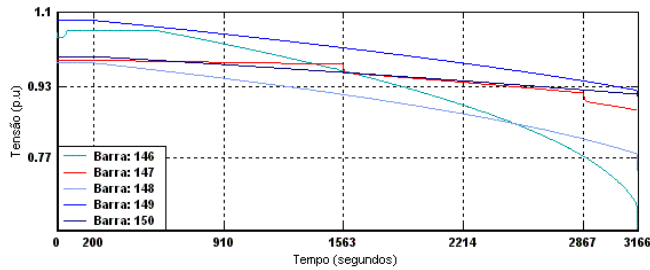
(e) Ângulo dos rotores.



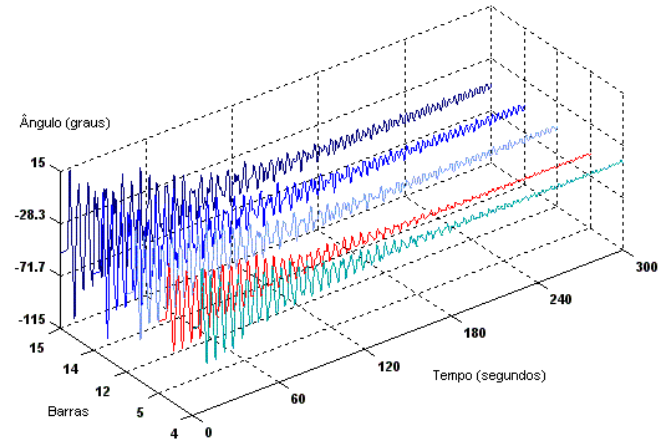
(f) Colapso de tensão e dinâmica do tape na barra controlada por ULTC



(a) Tensão em barras selecionadas



(g) Colapso de tensão nas barras em contingência



(b) Ângulo dos rotores.

Figura 11. Simulação de Fenômenos de Longa-Duração.

C. Seqüência de Eventos num Sistema real

O objetivo aqui é avaliar o desempenho do programa num sistema elétrico com características reais. Neste caso, é usado um equivalente do Sistema Elétrico Brasileiro Sul – Sudeste, possuindo 320 barras e 470 ramos, onde se simula uma seqüência de eventos (300s), conforme descrito a seguir:

1. Aplicação de curto-circuito trifásico na barra 200 em $t = 5(s)$
2. Remoção do curto-circuito trifásico e $t = 5,7(s)$ com a remoção da linha 200-206
3. Abertura total do circuito 303-308 em $t=10(s)$
4. Abertura total do circuito 308-310 em $t=15(s)$

Os tempos de remoção e abertura de circuitos foram selecionados de forma aleatória, sendo que este procedimento não compromete o objetivo desta simulação.

Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 12(a)–(b). A Figura 12(a) ilustra o comportamento dinâmico da tensão de barras selecionadas. Diferentemente dos casos anteriores, o comportamento oscilatório neste cenário é bem severo, como pode ser visto na Figura 12(b) através do comportamento angular de alguns geradores. Os impactos resultantes da seqüência de eventos são sentidos pelos geradores. O tempo de CPU gasto foi de 47,9(s).

Figura 12. Simulação de seqüência de eventos

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou os principais aspectos associados ao desenvolvimento de um protótipo computacional para análises em regime-permanente e no domínio do tempo. Com relação as técnicas algébricas, foram exploradas as características do método iterativo GMRES baseado no subespaço Krylov, sem e com pré-condicionamento. A fim de atestar a eficiência dos métodos iterativos para sistemas reais, usou-se para tal fim o sistema Norte-Nordeste Brasileiro no cenário do planejamento do mês de abril do ano de 2005, considerando carga pesada. Este exemplo confirmou a melhor eficiência numérica e computacional quando se usa Pré-Condicionamento ILUT(p,t) com Estratégias de Re-inicialização, estando de acordo com informações encontradas na literatura especializada, quando se usa este tipo de pré-condicionador. Portanto, atestou-se a grande utilidade dos métodos iterativos baseados em subespaços Krylov apresentando, dependendo da aplicação e das estratégias usadas, um bom desempenho computacional em termos de velocidade de processamento e eficiência (memória), para sistemas de dimensões elevadas.

Com relação à análise dinâmica observa-se que a eficiência computacional de simulação de fenômenos de curta e de longa-duração num mesmo programa computacional depende muito do método numérico implementado para resolver os sistemas de EDAs. Os métodos podem fornecer soluções muito precisas, mas o custo computacional para isso muitas vezes é proibitivo, mesmo para simular fenômenos rápidos (transitórios). Esta é uma característica típica dos programas convencionais de

estudo de estabilidade transitória angular, que usam passos fixos e muito pequenos. O protótipo superou estes problemas em função da sua habilidade em variar o comprimento do passo de integração sempre que possível, demonstrando uma aptidão em não poupar esforços para conseguir valores elevados, e reduzir o tempo de CPU.

Atualmente, modelos reais de equipamentos e dispositivos de controle do sistema ELETRONORTE, regional do Maranhão, estão sendo implementados no protótipo para ampliar a sua faixa de simulação.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos engenheiros da ELETRONORTE, Regional do Maranhão, em especial a Mauro Aquino, Sérgio Abreu e Eucides Carmargo, pelas informações técnicas para a realização deste trabalho, e a FSADU pelo gerenciamento administrativo.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Paz, "Implementação de um Simulador-Numérico num Programa Computacional de Estabilidade", Dissertação de Mestrado, CPGEE, UFMA, Março 2004.
- [2] U.M. Ascher, L.R. Petzold, *Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations*, Society for Industrial and Applied Mathematics, SIAM, 1998.
- [3] K.Brenan, S.Campbell, L.Petzold, *Numerical Solution of Initial-Value Problems in Differential-Algebraic Equations*, Society for Industrial and Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia, PA, 1996.
- [4] Cash, J.R., "Modified Extended Backward Differentiation Formulae for The Numerical Solution of Stiff Initial Value Problems in ODEs and DAEs", *Computer Math.*125, pp. 117-130. (1999)
- [5] Chaniotis, D., Pai, M.,A., Hiskens, I., "Sensitivity Analysis of Differential Algebraic Systems Using the GMRES method - Application to Power System", *The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, ISCAS 2001, Volume: 3, 6-9 , pp. 117 -120, May 2001.
- [6] E.Hairer and G.Wanner, *Solving Ordinary Differential Equations II - Stiff and Differential-Algebraic Problems*, Springer-Verlag, 1991.
- [7] N. Lawrence, *Compaq Visual FORTRAN: A Guide to Creating Windows Applications*. Elsevier Digital Press. 2002.
- [8] O.Alsac, B.Stott and W.F.Tinney, "Sparsity-Oriented Compensation Methods for Modified Network Solutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS, pp 1050-1060, May 1983.
- [9] Y. Saad, *Iterative Methods for Sparse Linear System*, Society for Industrial and Applied Mathematics, SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics., Philadelphia, 2003.