

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA**

**ESTUDO DE ESTABILIDADE ATRAVÉS DO
BALANÇO NODAL DE POTÊNCIA**

Autor: Paulo Eduardo Mota Pellegrino
Orientador: Dr. Sigmar Maurer Deckmann

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica da UNICAMP como parte dos
requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Paulo Eduardo Mota
Pellegrino e aprovada pela Comissão
Julgadora em 01 / 06 / 1995.

Sigmar M. Deckmann
Orientador

Maio - 1995

RESUMO

Este trabalho tem como meta descrever um método para solução dos problemas de estabilidade de médio e longo prazo utilizando o conceito de Balanço Nodal de Potência BNP. A base deste novo método é sua formulação como um problema de fluxo de potência e o uso dos conhecidos algoritmos do fluxo de potência para sua solução, especialmente um modelamento desacoplado. A necessidade da representação do barramento infinito é evitado com a utilização da abordagem do balanço de potência. O desempenho deste método é primeiramente discutido para um gerador ligado a um barramento infinito e posteriormente estendido a uma rede multinodal.

SUMMARY

The goal of this work is to describe a method to solve stability problems of mid and long terms using Nodal Power Mismatch (NPM) concept. The basis of the new method is its formulation as a power flow problem and the use of the well known power flow algorithms for the solution, using a decoupled modelling. The need of an infinite bus representation is avoided by the use of the power mismatch approach. The performance of this method is first discussed for a single generator connected to an infinite bus and then extended for a multinodal network.

**ESTUDO DE ESTABILIDADE ATRAVÉS DO
BALANÇO NODAL DE POTÊNCIA**

AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar estima e gratidão ao Prof. Dr. Sigmar pela orientação, dedicação e paciência durante o transcorrer deste trabalho.

À PETROBRÁS - REPLAN por ter permitido realizar um curso desta natureza.

Ao amigo Vitor Sued Mantecón pelas inúmeras discussões e encorajamento nos momentos difíceis que um trabalho desta natureza nos impõe.

À Eunice, Alessandra, Ana Carolina e Roberta pela compreensão das muitas horas de lazer trocadas pelo estudo.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

*Dedico este trabalho à minha mãe Rita,
meu pai Duilio Pellegrino (in memoriam)
minha esposa e filhas, Eunice, Alessandra,
Ana Carolina e Roberta.*

“ Não conseguimos encontrar respostas para todos os nossos problemas. As que encontramos apenas nos levaram a formular novas questões. Sentimo-nos hoje tão confusos como antes. Acreditamos, entretanto, que estamos confusos num nível mais alto e sobre coisas mais importantes. ”

(Cartaz encontrado na entrada do Departamento de Matemática de uma universidade escandinava)

“ Esqueçam o que escrevemos no passado, porque o mundo mudou e a realidade hoje é outra. ”

(Fernando Henrique Cardoso,
Ministro da Fazenda - Jornal
Folha de São Paulo - 06/06/93)

*“ Passarão o céu e a terra, mas
minhas palavras não passarão. ”*

(Marcos 13.14)

CONTEÚDO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Geral.....	1
1.2 Classificação dos Estudos de Estabilidade.....	1
1.3 Método de Solução dos Problemas de Estabilidade.....	1
1.4 Objetivo da Tese.....	4
1.5 Estrutura da Tese.....	5

CAPÍTULO 2 - EXTENSÃO DOS ESTUDOS DE ESTABILIDADE

2.1 Dinâmica de Curto, Médio e Longo-Prazo.....	6
2.2 Dinâmica a Grandes e Pequenas Perturbações.....	7
2.3 Modelos e Esquemas de Solução	8
2.4 Formulação Clássica e Dommel&Sato para Estabilidade Transitória.....	14

CAPÍTULO 3 - A DINÂMICA DO BALANÇO NODAL DE POTÊNCIA (BNP)

3.1 Estrutura do Modelo BNP.....	22
3.2 Equacionamento em Termos de Potência.....	25
3.3 Método de Solução do BNP.....	28

CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE DESEMPENHO E EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 Introdução.....	38
4.2 Caracterização das Simulações.....	38
4.3 Teste do Sistema I Caso A - Estável.....	43
4.4 Teste do Sistema I Caso B - Instável.....	57
4.5 Teste do Sistema II	64

CAPÍTULO 5 - SUMÁRIO E CONCLUSÕES

5.1 Sumário.....	70
5.2 Conclusões.....	70
5.3 Sugestões para Futuras Pesquisas.....	71

APÊNDICE A

- Dedução da Propriedade 2.10.....72
- Dedução da expressão 2.11.....73

APÊNDICE B

- Dedução das Expressões 3.1 e 3.2.....74

APÊNDICE C

- Dedução da Matriz Jacobiana na Forma Trigonométrica Simplificada.....76

APÊNDICE D

- Dedução das Expressões 3.15, 3.16 e 3.37.....78

APÊNDICE E

- Fluxo Concatenado do enrolamento de campo na condição inicial $t = 0^+$80
- Forma alternativa para obtenção de E'_{qo+} 81

APÊNDICE F

- Dados do sistema I.....82
- Dados do sistema II.....82

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....84

1. Introdução

1.1 Geral

Após a ocorrência de uma perturbação na rede como, por exemplo, um curto-circuito, desligamento de linha ou perda da geração, o sistema elétrico pode se tornar instável e perder o sincronismo, experimentando grandes oscilações na potência, quedas de tensão e subdivisão ou ilhamento de partes do sistema pela atuação de relés. A ferramenta adequada para estudar este cenário, que cobre os primeiros 10 segundos após o distúrbio, é o programa de estabilidade transitória.

Alternativamente, a integridade do sistema poderá ser preservada, desde que o equilíbrio entre geração e carga possa ser mantida e os dispositivos de controle consigam estabelecer um novo ponto de equilíbrio. Para este cenário, que pode se estender por vários minutos, os programas convencionais de estabilidade transitória não são apropriados pois não consideram os modelos de longo-prazo e, com os passos de integração normais, tornam proibitivo o tempo de simulação. A solução deste caso envolve a utilização de técnicas numéricas apropriadas, aplicadas na mesma estrutura de equações não-lineares algébricas e diferenciais dos problemas transitórios.

A evolução dos métodos de solução desses problemas dinâmicos foi e continua sendo estimulada pela incessante busca de uma melhor eficiência computacional para resolver problemas não só para cada um dos períodos de tempo sob estudo (curto, médio e longo-prazo), como também da solução unificada dos períodos, desde o instante da perturbação até dezenas de minutos após.

1.2 Classificação dos Estudos de Estabilidade

Objetivando melhorar a estabilidade do sistema de potência, estão sendo introduzidos sofisticados equipamentos, técnicas de controle e esquemas de proteção. Paralelamente, com o crescente número de publicações na área, novos termos técnicos foram introduzidos e os velhos termos vêm sendo interpretados de maneira diferente, de modo a acomodar as alterações nos problemas e métodos de solução. Atualmente a tendência é classificar os estudos de estabilidade de acordo com as técnicas de análise aplicáveis. Desse ponto de vista podemos definir dois tipos básicos [20]:

- **Estabilidade de Regime Permanente** - ou estabilidade a pequenas perturbações, que está ligada com a hipótese de linearização local, pois os métodos utilizados para determinar essa estabilidade se baseiam na linearização das equações do sistema de potência em torno de um ponto de operação em regime permanente.

- **Estabilidade Transitória** - esta estabilidade de curto prazo, busca avaliar a capacidade do sistema em absorver uma perturbação e encontrar um novo ponto de operação estável. Desde que o distúrbio pode ser grande, relés podem mudar a configuração do sistema de modo que a condição de regime pós-distúrbio pode ser diferente da condição de regime pré-distúrbio. O conceito de estabilidade transitória está ligado com um particular distúrbio causando uma trajetória para as variáveis do sistema, as quais permanecem sob o domínio da atração de um equilíbrio pós-distúrbio.

Outra classificação proposta, onde os conceitos se superpõem, estão relacionados com o período de tempo sob estudo:

- Estabilidade de Longo-Prazo
- Estabilidade de Médio- Prazo
- Estabilidade de Curto- Prazo

A principal diferença entre as diversas classes é que para o curto-prazo os transitórios eletromecânicos associados com o sistema multimáquinas inclui os efeitos da excitação e dos reguladores de velocidade; para o longo-prazo são incluídas as ações de controle mais lentas tais como o controle de frequência da carga, controle das caldeiras, derivações de transformadores, proteção, etc. O período médio-prazo surgiu como consequência de não estar bem definido o instante exato que separa as aplicações de longo-prazo e curto-prazo.

1.3 Métodos de Solução dos Problemas de Estabilidade

A solução do problema dinâmico, consiste em obter soluções a cada incremento de tempo, de um conjunto de equações não-lineares algébrico-diferenciais. Essas equações representam os diversos elementos componentes de um sistema de potência. A representação de um elemento passivo, com características estáticas, é feita através de equações algébricas e, portanto, responde imediatamente a qualquer ação perturbadora. Quando possuir características dinâmicas, a representação do elemento é feita através de equações diferenciais; neste caso a resposta a uma perturbação prolonga-se por um intervalo de tempo. Por último, um elemento pode ser representado por equações algébricas e diferenciais; trata-se portanto de elemento com características estáticas e dinâmicas combinadas.

Dentre as várias causas que concorrem para a natureza não-linear dessas equações, tornando complexa a solução, podemos citar os efeitos da saturação, histerese e imposição de limites pelos equipamentos ou condições operacionais, além das próprias equações ou funções que devem ser satisfeitas.

Para a solução de um problema dinâmico é extremamente importante a experiência daquele que irá modelar o sistema devido às muitas particularidades envolvidas com o processo de solução. O conhecimento que se adquire através das simulações, estando aí incluída a compreensão das restrições impostas pelos vários métodos disponíveis para a solução do sistema de equações, formará a base para os criteriosos julgamentos visando:

- a) utilizar modelos mais simples por meio de **equivalentes** de parte ou partes do sistema;

- b) estimar o tempo total para simulação confiável, considerando os erros introduzidos pelos métodos numéricos de solução;
- c) escolher o passo de integração apropriado, em função das diferentes constantes de tempo envolvidas;
- d) responder outras questões que normalmente surgem na solução de um problema dinâmico, como limites, formas de controle, tolerâncias, esquemas de solução.

Até o presente momento as técnicas mais consagradas para solucionar um problema dinâmico no domínio do tempo tem utilizado o modelo da rede na forma linear $[I]=[Y].[V]$. A adoção desse modelo está intimamente relacionado com o método utilizado para representar as máquinas síncronas, cuja formulação baseia-se nas equações de Park, com as variáveis referidas aos eixos ortogonais $d-q$. Portanto, para resolver as equações da rede, onde o sistema de coordenadas dos fasores estão dispostos segundo os eixos $\Re\text{-}\Im$ (real e imaginário), há necessidade da transformação das variáveis dq para $\Re\text{-}\Im$ e vice-versa.

Com base na estratégia da solução alternada dos conjuntos das equações algébricas e diferenciais, verifica-se uma contínua necessidade de transformação de eixos toda vez que houver troca de informações entre a rede e as máquinas. Através da aplicação direta da transformação de eixos nas equações algébricas de Park, Dommel propôs uma formulação que prescinde da contínua transformação de eixos (\Re e \Im) das equações da rede. As duas formulações anteriores, denominadas de clássica e Dommel, utilizam o mesmo modelo de injeções de corrente na rede ou seja, $[I]=[Y].[V]$.

Nos problemas analisados em função de pequenas perturbações, os quais envolvem oscilações de potência de baixa amplitude e pequenas excursões do rotor em torno de um ponto, os termos não-lineares podem ser linearizados com boa aproximação. As características físicas são usualmente investigadas e calculadas empregando dois procedimentos matemáticos:

- Análise no domínio do tempo (integração numérica).
- Análise no domínio da frequência (cálculo de autovalores).

As características de frequência são aplicáveis apenas a sistemas lineares, porém dão boa indicação do comportamento dinâmico das máquinas síncronas quando as perturbações ficarem restritas à região linear do espaço das variáveis de estado.

A Referência [15] aborda uma solução linearizada, denominada de Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP), tendo por base o princípio de que o balanço da potência ativa e reativa deve ser continuamente satisfeito em qualquer barramento e durante todo o processo dinâmico. Os resultados apresentados demonstram a potencialidade do modelo nos estudos dinâmicos de médio e longo-termo, quando as oscilações causadas pelas pequenas perturbações ficarem restritas à região linear do espaço das soluções.

Uma vez que a propriedade do balanço nodal de potência não se restringe ao sistema linearizado, surgem as seguintes questões: pode o modelo de sensibilidade de potência ser utilizado para resolver o problema não-linear da estabilidade em sistemas de potência? Haverá vantagem se for utilizado em lugar dos métodos clássicos e Dommel&Sato? Uma primeira motivação seria a semelhança de formulação com a do problema do fluxo de carga, também baseado no balanço nodal de potência.

1.4 Objetivo da Tese

O presente trabalho apresenta uma nova formulação para a solução de problemas dinâmicos não-lineares baseado no **Balanco Nodal de Potência (BNP)**, onde as equações algébricas das máquinas e da rede são expressas em termos das potências ativa e reativa (P,Q). Conseqüentemente, o modelo da rede será representado em termos do balanço de potência e a solução do sistema de equações algébricas utiliza os mesmos recursos da solução de um tradicional fluxo de carga (FC). As equações diferenciais dos geradores síncronos foram reescritas com o intuito de obter expressões em termos explícitos de P e Q.

Com essa nova abordagem é possível resolver o fluxo de carga das malhas de potência ativa e reativa de uma forma desacoplada e alternada tirando proveito da utilização de diferentes passos de integração, e levando em conta as diferentes respostas em frequência de cada uma das malhas. Consegue-se melhor eficiência na solução através da utilização da matriz Jacobiana desacoplada e constante.

Ao utilizar uma matriz de sensibilidade, essa formulação torna-se atraente na solução de problemas que envolvam a variação de parâmetros da rede, causados pela variação da frequência; neste caso não há necessidade de efetuar qualquer alteração na matriz Jacobiana, bastando calcular corretamente o balanço nodal de potências. Na formulação Dommel problemas desta natureza são resolvidos com a transformação dos efeitos causados pela variação de frequência em injeções de corrente nas barras.

Outro ponto a favor da abordagem **BNP** é decorrente dos modelos usualmente adotados para as cargas e considerados em boa parte da literatura técnica. Os modelos estáticos para as cargas são constituídos de expressões polinomiais, tendo-se P e Q como variáveis dependentes. Modelos mais complexos, que levam em conta o comportamento dinâmico, também são expressões em termos de P e Q. Desta forma, as cargas estão apropriadamente formuladas para participar do FC como injeções de potência ativa e reativa, do mesmo modo que os geradores síncronos.

Para comprovar a viabilidade do processo **BNP**, o Capítulo IV descreve simulações cujos resultados foram comparados com aqueles obtidos através da formulação Dommel&Sato. As simulações **BNP** tiveram como base três variantes do processo de solução:

- Alternado normal : o FC é solucionado até a convergência; a convergência das equações diferenciais é feita em $\Delta E_q, \Delta \delta$;
- Alternado normal com convergência ΔP e ΔQ dos geradores nas equações diferenciais: o FC é solucionado até a convergência; a convergência das equações diferenciais é feita comparando-se as injeções P e Q, relativos aos geradores, entre duas iterações sucessivas;
- Alternado entrelaçado: não se persegue a convergência do FC a cada iteração das equações diferenciais. A convergência é feita apenas através da comparação das injeções P e Q dos geradores entre duas iterações sucessivas.

As simulações apontaram o processo entrelaçado como o mais promissor entre as variantes acima, acrescido do fato de depender apenas das variáveis P e Q, relativas aos geradores, para a convergência de todo o sistema de equações. Isto torna o processo **BNP** totalmente fundamentado em termos de potência ativa e reativa.

1.5 Estrutura da Tese

O Capítulo 1 visa dar uma descrição do objetivo da tese e apresentar sumariamente os conceitos relacionados com os problemas de estabilidade e métodos de solução.

O Capítulo 2 detalha os conceitos da dinâmica dos sistemas de potência, sujeitos a grandes e pequenas perturbações, e que são utilizados na identificação do método de solução no domínio do tempo ou da frequência. Em seguida são apresentados os esquemas de solução, no domínio do tempo, encontrados na literatura e cujas técnicas numéricas envolvem a solução passo-a-passo de um sistema algébrico-diferencial de equações não-lineares. Considerando o esquema de solução denominado alternado normal, foram descritos os processos Clássico e Dommel&Sato, sendo que este último é derivado do primeiro através de manipulações algébricas.

O Capítulo 3 inicia-se mostrando que o elo de ligação entre o processo Dommel e a nova formulação BNP, reside no cálculo da potência dos geradores, obtida pelo produto da tensão terminal pelo conjugado da “corrente Dommel&Sato”. Pode-se, então, visualizar a transformação do balanço nodal de corrente (processo Dommel&Sato) em balanço nodal de potência (processo BNP). Em síntese, o processo BNP resulta na utilização do método convencional de fluxo de carga o que, por sua vez, permite dispensar as equações de interface para transformação das variáveis entre os eixos $d-q$ e $\Re-\Im$. Em seguida, os modelos da rede e dos geradores foram reescritos, tornando-os mais apropriados à nova formulação através da obtenção das respectivas equações em termos das potências P e Q. Este capítulo culmina com a descrição do algoritmo de solução da formulação BNP, utilizando o método alternado entrelaçado.

O Capítulo 4 descreve os resultados das simulações efetuadas em dois sistemas-teste. O Sistema I, mais simples, consistindo de um gerador ligado a um barramento infinito, teve como objetivo a comparação entre as formulações BNP e Dommel, submetidos a situações com diferentes tolerâncias, passos de integração e métodos de solução. O desempenho dos métodos foi analisado para um caso ESTÁVEL e outro INSTÁVEL. O Sistema II, mais complexo, consistindo de 9 barras e 3 geradores, foi simulado tendo-se por finalidade a comparação entre as formulações BNP e o modelo linearizado MSP.

No Capítulo 5 são reunidas as conclusões e são formuladas questões, como sugestão para futuras pesquisas, utilizando a metodologia BNP e que não foram consideradas para este trabalho.

2. Extensão dos Estudos de Estabilidade

2.1 Dinâmica de Curto, Médio e Longo Prazo

Um Sistema de Energia Elétrica é constituído de um número muito grande de componentes cujas características dinâmicas exibem um amplo espectro de frequências e com significativos efeitos não lineares. Após um distúrbio, haverá uma interação entre esses componentes, cujos efeitos propagam-se por vários minutos. A consideração de determinado elemento num estudo dinâmico dependerá da magnitude e do tempo de sua resposta. Assim, para os estudos dinâmicos com tempo razoavelmente longo, os componentes com controle de ação lenta, tais como caldeiras, carga-frequência, controle automático de geração (CAG), ação do operador, e outros, devem ser considerados.

A faixa entre 1 a 10 segundos é reservada aos estudos dinâmicos de curto termo, enquanto que a faixa entre alguns minutos até 1 hora é dedicada aos estudos dinâmicos de longo termo. Como consequência de não estar bem definido o período exato que separa as aplicações de longo e curto termos, alguns estudos são referidos como sendo de médio termo.

Após um distúrbio, o sistema irá comportar-se segundo uma de duas possíveis alternativas. Na primeira, o sistema poderá tornar-se instável e perder o sincronismo em poucos segundos devido ao continuado aumento do ângulo de carga de geradores. Este fato causará grandes oscilações de potências, acentuadas quedas de tensão e a atuação de relés de modo a separar a área em falta. Neste caso o período de interesse é de 1 a 10 segundos e as ferramentas de estudo são os programas convencionais de estabilidade transitória.

Na segunda alternativa o sistema poderá continuar íntegro após o distúrbio, e a ação dos controles irá procurar estabelecer novo equilíbrio entre geração e carga. Porém, no caso do isolamento da área com distúrbio, as demais áreas poderão continuar apresentando grandes variações nas potências ativa e reativa e, conseqüentemente, as quedas de tensão prolongadas darão início à atuação dos comutadores de taps ("tap changers"). Portanto, no período de poucos minutos a 1 hora, o sistema estará bastante vulnerável a subseqüentes distúrbios. Os programas de estabilidade transitória não são adequados a este tipo de estudo porque modelos de ação lenta não são incluídos e os reduzidos passos de integração tornam proibitivas as simulações de longo termo.

O blecaute ocorrido em 1983 na Suécia [2] ilustra muito bem um cenário envolvendo uma dinâmica de longo termo. O início de um curto para terra num barramento de 400 Kv e a falha do sistema de proteção fez com que toda a subestação fosse desligada; a partir daí uma série de eventos em cascata, durante um período crítico de aproximadamente 60 segundos, culminou com o colapso total do sistema. Os métodos normais de análise de estabilidade foram insuficientes para explicar o que causou o desligamento em cascata pois o programa computacional não incluía alguns modelos de equipamentos. Uma explicação satisfatória só foi possível após considerar: uma melhor modelagem das cargas nas situações de tensão abaixo de 0,8 pu; a operação dos comutadores de tap; a inclusão da proteção de subexcitação e dos limites das correntes do estator e campo.

Os requisitos que os programas computacionais devem ter para simular os efeitos por um período longo, é que sejam capazes de considerar ambas as dinâmicas de curto e longo termo e com adequado tempo de processamento. A cada distúrbio subsequente, o programa deve ser comutado para a estabilidade transitória, de forma a simular as consequências dos distúrbios causados pelas dinâmicas de curto termo. Passado esse período, o programa deve ser comutado para considerar apenas as dinâmicas de longo termo.

A referência [1] aborda a questão de um programa de estabilidade que unifica as dinâmicas de curto, médio e longo termo. Considera que a perda de sincronismo e a atuação de relés devido às oscilações de potência normalmente ocorrem no período de 10 segundos após o distúrbio. Se após esse tempo as oscilações são amortecidas, torna-se conveniente, do ponto de vista de eficiência computacional, fazer a transição para a dinâmica de longo termo que, devido aos grandes passos de integração, são de solução mais rápida. A técnica utilizada para fazer a transição de forma suave e sem considerar o amortecimento natural é através da introdução do coeficiente de amortecimento nas equações de oscilação ("swing") das máquinas, quando as oscilações caem abaixo de um determinado valor. Essa técnica acelera o processo de amortecimento das oscilações e o programa aplica e remove automaticamente o coeficiente de amortecimento, resultando numa simulação confiável e computacionalmente eficiente. Quando for observada uma instabilidade dinâmica, o amortecimento artificial é removido e o passo é reduzido, tornando mais precisa a simulação do tempo de ruptura do sistema.

2.2 Dinâmica Devido a Grandes e Pequenas Perturbações

Algumas publicações técnicas tem utilizado a intensidade da perturbação como forma de identificação do método de solução. Na dinâmica sob grandes perturbações a solução do sistema não linear é obtida no domínio do tempo; na dinâmica sob pequenas perturbações o sistema é linearizado em torno de um ponto de operação e a solução pode ser obtida no domínio do tempo ou da frequência.

A conceituação da perturbação como grande ou pequena dependerá da percepção que se tem a respeito da magnitude das variações da tensão e ângulo produzido por essas perturbações. Em outras palavras, haverá a necessidade de um julgamento a respeito da amplitude em que se encontram as oscilações de potência, de forma que os termos não lineares possam ser linearizados com suficiente aproximação na vizinhança do ponto de operação pré-perturbação, caso as oscilações de potência sejam de baixa amplitude.

A maioria dos elementos do sistema de controle apresenta não linearidades do tipo zona morta e limites. Os efeitos dessas não linearidades tornam-se bem pronunciados nos casos de grandes perturbações e dos grandes desvios de seu ponto de operação. Nos casos das pequenas perturbações as equações linearizadas possibilitam a aplicação das técnicas de análise linear. Com esse tipo de análise os modos de oscilação podem ser determinados diretamente, além de permitir o uso de eficientes ferramentas para ajuste e otimização dos parâmetros de uma malha de controle.

Os demais componentes de um sistema de potência, como as cargas, a rede, transformadores, compensadores, etc, também apresentam características não lineares. A representação da não linearidade ou a simplificação por uma linearização dependerá de um criterioso julgamento daquele que está lidando com os estudos de simulação. Isto requer um bom conhecimento dos fundamentos dos modelos e do grau de influência dos efeitos na dinâmica de um sistema de potência.

Mesmo nos casos de grandes perturbações, a maioria dos programas computacionais consideram lineares os parâmetros da rede, embora fosse mais exato representá-los por equações diferenciais, o que tornaria os programas muito ineficientes. Desde que a frequência do sistema é alta, comparada com as frequências de oscilação das máquinas, é possível considerar a rede como um sistema algébrico em cada um dos intervalos de tempo da simulação.

O curto-circuito trifásico é o distúrbio isolado mais severo que pode ocorrer num sistema de potência. Conseqüentemente esse é o tipo de falha mais freqüentemente utilizado nos estudos de estabilidade do sistema. Embora a maioria dos programas de estabilidade não simulem os curtos fase-fase e fase-terra, seus efeitos podem ser reproduzidos razoavelmente por meio de um curto trifásico e uma apropriada impedância aplicada no ponto em curto [3,4].

2.3 Modelos e Esquemas de Solução

Modelos

Formalmente a análise da dinâmica de um sistema de potência inclui a construção de um modelo matemático para o sistema físico. Esse modelo, representado por meio de um sistema de equações, deve ser desenvolvido com um mínimo de complexidade, deve prever as características do sistema, e apresentar resultados que não apenas correspondam com a realidade, como também devem ser obtidos dentro de um prazo e custo computacional condizente com a aplicação.

No domínio do tempo, as equações que representam cada um dos elementos do sistema de potência podem ser agrupados nos conjuntos das equações não lineares algébricas e diferenciais. No conjunto algébrico estão incluídos os modelos estáticos da rede, da carga e as equações algébricas das máquinas síncronas. No conjunto diferencial estão incluídas as equações que descrevem o comportamento dinâmico das máquinas e dispositivos de controle.

Na ocorrência de uma grande perturbação como o início e eliminação de um curto circuito, abertura de linhas, etc, as variáveis algébricas irão se modificar instantaneamente. Porém as variáveis das equações diferenciais não se modificam instantaneamente, tendo seus efeitos propagados ao longo do tempo através dos passos de integração.

Modelo do Sistema de Potência

Basicamente a dinâmica do sistema elétrico é constituída da interação dos elementos de potência e de controle. Os **elementos de potência** produzem (geradores), convertem (transformadores, retificadores, inversores), transmitem, distribuem (linhas de transmissão e distribuição) e absorvem (cargas) energia elétrica. Os **elementos de controle** ajustam as variáveis do sistema de potência (sistema de excitação, governadores, relés, disjuntores, etc) para uma operação adequada do sistema.

No estudo da dinâmica do sistema de potência é necessário considerar também os elementos associados aos processos mecânicos como as turbinas, caldeiras e os motores. Portanto, é necessário considerar os fenômenos eletromecânicos de conversão envolvidos.

Modelo dos Geradores

O comportamento dinâmico das máquinas síncronas é adequadamente descrito pelas equações gerais de tensão empregando a teoria dos dois eixos (transformação de Park). Esse comportamento dinâmico é influenciado pelas variações no tempo dos fluxos no rotor e estator, o que faz a máquina exibir diferentes valores de reatâncias em função do tempo. Essas reatâncias podem ser vistas nas equações gerais de Park que expressam os fluxos do estator em termos de impedância operacional $x(p)$ e de uma função de transferência $G(p)$, relacionando o fluxo do estator com a tensão de campo. As equações decompostas nos eixos d e q apresentam-se na forma [13]:

$$\begin{aligned}v_q &= -r i_q + \omega \psi_d + p \psi_d & \text{onde } p \triangleq \frac{d}{dt} \\v_d &= -r i_d - \omega \psi_q + p \psi_q \\ \psi_q &= -x_q(p) i_q \\ \psi_d &= -x_d(p) i_d + G(p) v_{fd}\end{aligned}$$

Nas equações acima as variáveis são referidas ao rotor e a equação de sequência zero não foi considerada pois serão tratados apenas os circuitos trifásicos equilibrados.

A utilização de reatâncias que variam com o tempo tornam os cálculos bastante complexos e uma simplificação é feita de modo a reduzir as equações a simples relações algébricas. Essa simplificação consiste em: a) admitir diferentes valores de reatâncias que representem o comportamento da máquina para os efeitos subtransitórios, transitórios e regime permanente; b) desprezar os termos com derivadas no estator. Isto significa que ao desprezarmos o efeito “transformador”, estaremos na realidade desprezando a componente CC que aparece na corrente da armadura durante os fenômenos transitórios. Essa hipótese é razoável para curtos ocorrendo longe dos terminais da máquina. Para curtos nos terminais da máquina a componente CC tem considerável influência no ângulo e velocidade da máquina [18]. A omissão dos termos com derivadas conduz a resultados conservativos, ou seja, o sistema pode parecer mais instável do que realmente é, e para a determinação precisa dos

limites de estabilidade é necessário considerar esse efeito, o que aumenta a ordem do modelo diferencial. A referência [6] sugere um procedimento para levar em conta esse fato.

Com essas hipóteses as equações passam a utilizar variáveis complexas e com os fasores fazendo parte das equações algébricas e diferenciais. Dependendo do estudo, mais hipóteses simplificadoras são introduzidas, sem prejuízo dos resultados. A maioria dos estudos de estabilidade concentram as hipóteses complementares em quatro modelos [18], sendo o primeiro deles normalmente denominado de modelo clássico, onde a tensão de fluxo de campo E'_q permanece constante e atrás da reatância transitória x'_d ($x_q = x'_q = x'_d$).

Neste trabalho pretendemos abordar o modelo 2, de terceira ordem, por ser o mais apropriado para as aplicações desejadas. As equações diferenciais para o gerador, considerando apenas os efeitos transitórios no estator, são dados por [5]:

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{do}} \left[E'_q - (x_d - x'_d) I_d - E_{FD} \right] \quad (2.1)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{qo}} \left[E'_d - (x_q - x'_q) I_q \right] \quad (2.2)$$

(E_{FD} = tensão de campo referida ao estator em pu)

As equações de oscilação ("swing") do rotor são dadas por:

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (2.3)$$

$$2H \frac{d\omega}{dt} + D\omega = P_m - P_e \quad (2.4)$$

sendo ω_s a velocidade síncrona em rad/seg, ω a velocidade efetiva em pu, D o coeficiente de amortecimento em pu; P_m e P_e respectivamente potência mecânica fornecida no eixo do gerador e potência elétrica fornecida pelo gerador em pu; H constante de inércia em segundos.

Modelo das Cargas

Um dos pontos críticos em qualquer estudo dinâmico tem sido o da representação das cargas. Dependendo do modelo utilizado pode-se obter resultados significativamente diferentes e, para exemplificar, citaremos simulações descritas na referência [7]. Três curvas A, B e C foram obtidas simulando-se as cargas respectivamente por impedância constante, corrente constante e carga mista constituída de 50% de potência constante e 50% de corrente constante. Sob uma mesma perturbação, as curvas de oscilação resultaram diferentes, apresentando um sistema estável para os casos A e B, e instável para o caso C. Isto mostra a necessidade de uma criteriosa investigação no modelo de carga a ser utilizado numa simulação, de forma a obter uma resposta que se aproxime da realidade. Vários fatores devem ser

considerados para se representar adequadamente as cargas durante a simulação da dinâmica de um sistema elétrico. Dentre estes fatores pode-se destacar:

1) Dimensão do Sistema Elétrico: nos sistemas interligados de distribuição de energia elétrica a representação das cargas é bastante complexa devido à sua composição de natureza comercial, industrial e residencial. Estas cargas reagem de maneira diferente perante variações de tensão e frequência, e a distribuição percentual com que cada uma delas participa na formação de uma carga mista apresenta valores diferentes para determinados períodos do ano. No caso do estudo de um sistema industrial, as cargas são bem mais conhecidas, e como os motores de indução participam com aproximadamente 70% da carga total, cuidado especial deve ser tomado para a sua modelagem dinâmica. Enquanto que a composição das cargas num Sistema de Energia Elétrica varia com a época do ano, na indústria ela é praticamente constante.

2) Variação da tensão: na maioria dos estudos de estabilidade as cargas estão sujeitas a variações bruscas de tensão, como nas operações de chaveamento, e a variações lentas devido a oscilações pós-perturbação. As cargas reagem de forma diferente a cada uma dessas situações. Quando sujeitas a variações lentas, podem ser representadas por funções estáticas da tensão e frequência. Nas variações rápidas, existem transitórios envolvidos e isto torna necessário representar adequadamente as cargas por meio de funções dinâmicas da tensão e frequência.

3) Efeito da descontinuidade: a queda da frequência pode causar desligamentos das cargas devido à atuação dos relés de subfrequência e se estes não existirem, os motores poderão operar fora da faixa normal ou mesmo parar, dependendo da característica torque/velocidade dos acionadores e acionados [8]. Descontinuidades da tensão podem surgir devido aos desligamentos dos motores pela abertura dos contatores nas baixas tensões, extinção das lâmpadas fluorescentes e demais lâmpadas de descarga. Alguns autores [8,9] consideram que uma grande perda de carga ocorrerá quando a tensão atingir cerca de 70%, muitas das quais não são reconectadas após recuperação da tensão.

De 1976 a 1980 o EPRI [10] realizou um projeto cujo objetivo foi o de desenvolver um procedimento para modelagem de carga que pudesse ser utilizado pelas concessionárias ao se estudar o fluxo de carga e a estabilidade de um sistema elétrico. Embora tal pesquisa tenha contribuído significativamente para a compreensão da modelagem das cargas, muitos problemas importantes ainda não foram resolvidos. Os testes realizados apontaram para as insuficiências dos modelos das cargas nas características de resposta dinâmica e da potência reativa; foram sugeridas pesquisas complementares para se corrigir tais defeitos. A verificação da maior sensibilidade da potência reativa versus frequência nas situações de tensão elevada e baixa frequência foi atribuído à saturação dos transformadores de distribuição.

Uma importante área de pesquisa tem sido a da representação de grupos de motores de indução por meio de modelos agregados [8]. A modelagem dinâmica das cargas é necessária nos estudos de unidades industriais ou no caso de áreas com grande concentração de motores. Para essas cargas, e nos instantes de descontinuidade de tensão, é aceitável supor modelos estáticos de impedância constante, cujo valor é calculado na condição de pré-perturbação.

A literatura tem representado a carga estática equivalente, conectada a um determinado barramento, por uma equação não linear para potência ativa e reativa como função da tensão e frequência. Em geral são expressões polinomiais da forma:

$$P = a_1 + b_1 V + c_1 V^2 + d_1 f + e_1 Vf \quad (2.5)$$

$$Q = a_2 + b_2 V + c_2 V^2 + d_2 f + e_2 Vf \quad (2.6)$$

A determinação dos coeficientes das equações 2.5 e 2.6 tem sido um dos grandes desafios na modelagem, por depender tanto do conhecimento das respostas a uma lenta variação de tensão e frequência de cada uma das cargas elementares que forma a carga composta, como do peso que cada uma delas participa na carga total. A referência [7] sugere alguns coeficientes para determinados tipos de cargas elementares, embora reconheça haver desvios ao se representar as cargas reativas.

Determinadas perturbações do sistema elétrico, principalmente aqueles que se seguem às bruscas alterações de estado, a simples representação de cargas pelo modelo estático não é suficiente. A existência de uma significativa inércia e constante de tempo da carga exige um maior detalhamento na sua modelagem dinâmica.

No caso da representação dinâmica das cargas, a literatura identifica um amplo campo de pesquisa a ser explorado, e a referência [10] sugere representar esse tipo de carga como uma combinação de componente estática e dinâmica. A componente dinâmica, sendo modelada por equações diferenciais de primeira ordem, terá os termos com derivadas se anulando nas condições de operação em regime. Nos casos de uma brusca variação de estado, predomina a resposta dinâmica.

Esquemas de Solução

A maioria dos estudos de estabilidade de um sistema de potência tem sido feito no domínio do tempo, envolvendo a solução passo-a-passo de um grande número de equações não-lineares e algébrico-diferenciais. Dependendo do tamanho do Sistema Elétrico, o número de equações a serem resolvidas é da ordem de centenas ou milhares e este fato tem incentivado o desenvolvimento de métodos de cálculo mais eficientes e confiáveis, visando a redução do tempo computacional.

Independente da classificação do problema dinâmico em estudo, ou seja, dinâmica sob grande ou pequena perturbação, os modelos dos sistemas apresentam algumas características em comum e, portanto, a maioria das técnicas numéricas [11] podem ser aplicadas às simulações. Conforme citado anteriormente, a forma geral do modelo do sistema de potência consiste de um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem:

$$\dot{y} = f(x, y) \quad (2.7)$$

e um conjunto de equações algébricas que devem ser satisfeitas:

$$0 = g(x, y) \quad (2.8)$$

A literatura [5,11,12] tem recorrido a uma classificação dos possíveis esquemas de solução ao se elaborar um programa computacional para solucionar o problema. Esses esquemas levam em consideração:

- a) método de interação entre (2.7) e (2.8) : **simultâneo** ou **alternado**;
- b) algoritmo de integração : **implícito** ou **explícito**;
- c) critério de convergência : **normal** ou **entrelaçado**.

A simples observação dos vários esquemas, que resultam das possíveis combinações dos itens acima, mostra a árdua trajetória percorrida por muitos trabalhos nesta área. Todos os esforços dispendidos tiveram como objetivo:

- diminuir o tempo computacional;
- tornar o programa flexível para incorporar novos elementos;
- precisão na resposta;
- economia de memória do computador.

Deve-se reconhecer que qualquer método numérico produz erros de truncamento, arredondamento, de aproximação ao se linearizar as equações num dado passo, e erros de interface ao se resolver separadamente os conjuntos de equações. A estabilidade numérica do método depende da propagação desses erros pelos sucessivos passos. O método torna-se instável quando o acúmulo de erros afasta rapidamente o resultado da solução buscada.

A instabilidade numérica está relacionada não apenas com o método de integração como também com a "rigidez" do sistema de equações diferenciais. Essa rigidez está associada com as constantes de tempo do sistema, de forma que um sistema é rígido se a razão entre a maior e menor constante de tempo é grande [11]. Num problema rígido e com método de integração relativamente instável, o passo de integração deve ser pequeno para manter prováveis erros em níveis seguros. Por outro lado, os métodos de integração estáveis toleram grandes passos, pois os erros não se propagam acentuadamente.

A obtenção de uma solução mais precisa e com menor tempo torna-se, portanto, um desafio para qualquer um que se propõe a desenvolver um programa que resolva o problema de estabilidade, pois esses dois objetivos são mutuamente conflitantes.

Dos vários métodos de integração disponíveis apenas alguns são adequados ao uso nos sistemas de potência. Diversos trabalhos concluíram que, via de regra, o método implícito é mais rápido que o método explícito [11]. Sempre buscando uma melhor performance, a incorporação de técnicas tais como de extrapolação de variáveis e a utilização de passos variáveis tem trazido consideráveis benefícios.

2.4 Formulação Clássica e Dommel&Sato para Estabilidade Transitória

A estrutura básica do problema de estabilidade transitória, apresentado no relatório EPRI EL-484 [12], é mostrada na figura 2.1:

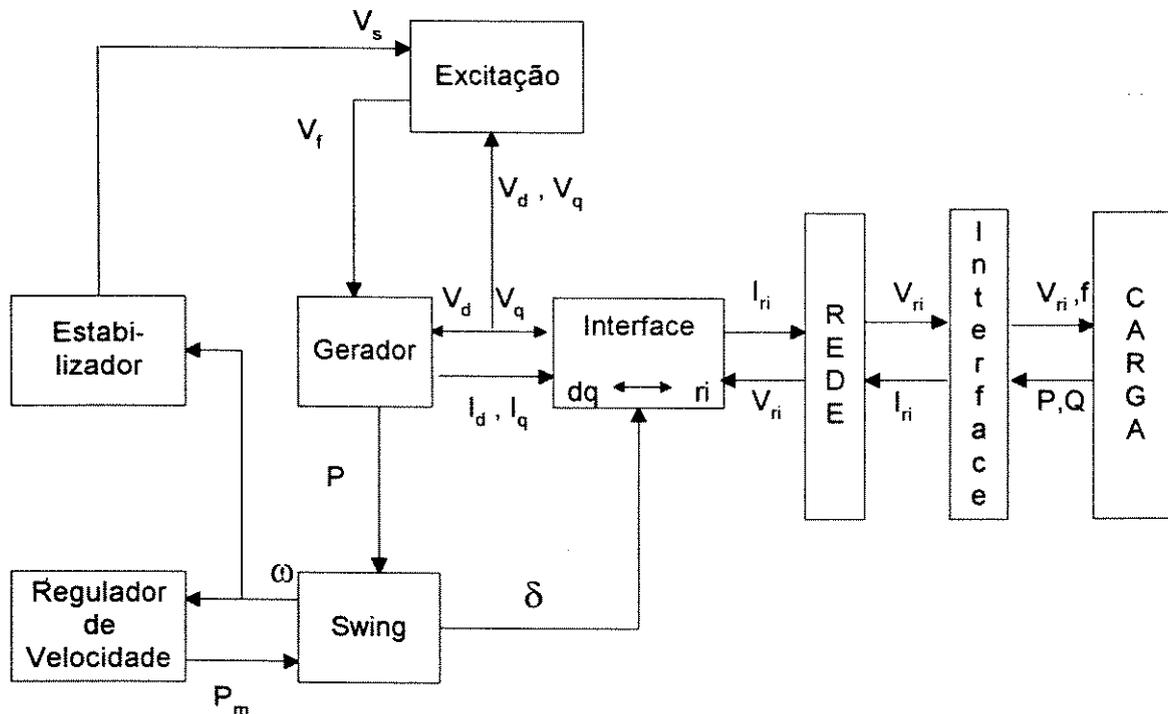


Figura 2.1 Estrutura Básica do Problema de Estabilidade

Na realidade as cargas são não lineares, e assim sendo são mostradas separadas da rede.

Por ser complexo, o sistema de geração requer uma subdivisão em seus elementos constituintes ou subsistemas: interface, oscilação (“swing”), máquina, excitação, estabilizador e regulador de velocidade. Como as equações das máquinas são referidas aos eixos **dq** e as equações da Rede são referidas aos eixos real-imaginário **ri**, haverá necessidade de uma **interface** para transformação das variáveis. Essa transformação pode ser expressa por :

$(q + jd) = e^{-j\delta} (\Re e + j\Im m)$, sendo **d**, **q**, **Re**, **Im** as variáveis referidas respectivamente aos eixos **dq** e **real-imaginário**; δ é o valor instantâneo ($\delta(t)$) do ângulo de deslocamento entre o eixo em quadratura da máquina (**q**) com o eixo real (**Re**) da Rede. Adotou-se a convenção do eixo **d** adiantado 90° do eixo **q**, em atendimento à padronização recomendada pelo IEEE [9].

Método Clássico de Solução

Será descrito o método **alternado normal**, que consiste em resolver as equações algébricas não-lineares da rede e das máquinas até obter a convergência. Em seguida resolve-se as equações diferenciais para 1 passo de integração e, caso a convergência não seja satisfeita, retorna-se às equações algébricas. A figura 2.2 ilustra este esquema de solução.

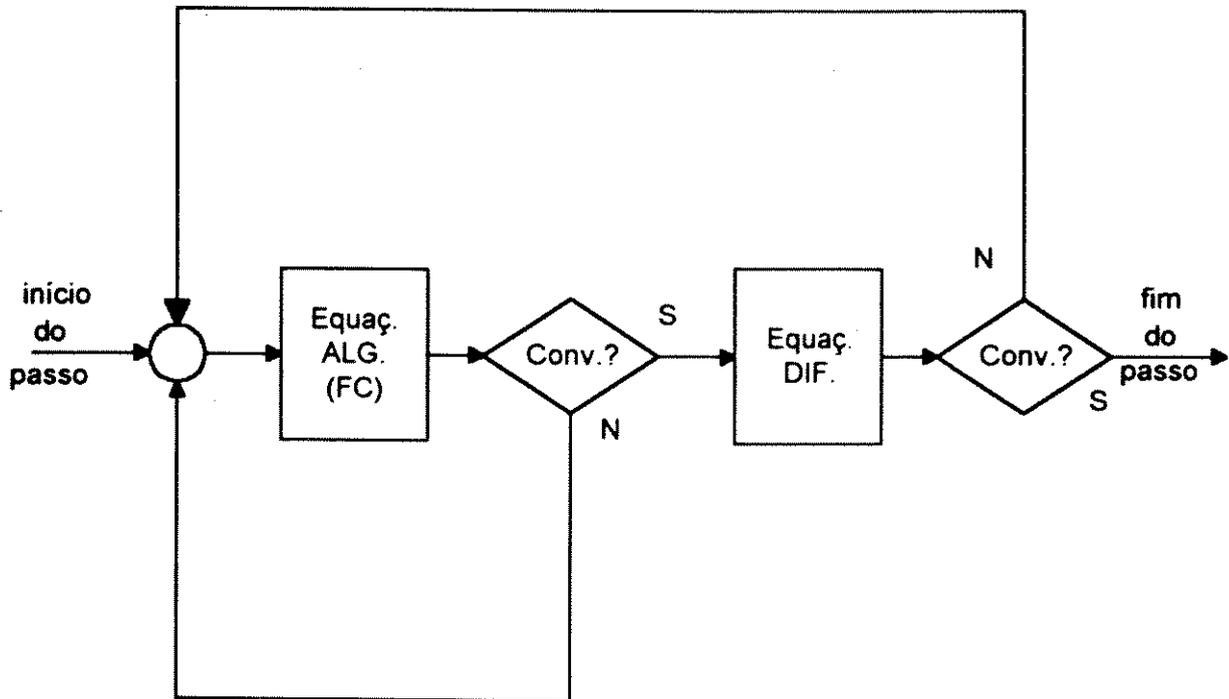


Figura 2.2 Método Alternado Normal

Na simulação dinâmica, a solução do fluxo de carga (FC) a cada passo é da forma nodal $I=YV$, onde o vetor de injeções de corrente I representa as equações algébricas (eq.2.9) do modelo do gerador segundo Park [13], após a transformação para vetor complexo; V é o vetor complexo das tensões das barras da Rede. A figura 2.3 mostra o processo de solução do fluxo de carga durante 1 passo.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{1}{r^2 + x_d' x_q'} \begin{bmatrix} r & x_d' \\ -x_q' & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_q' - V_q \\ E_d' - V_d \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

E'_d, E'_q, δ assumidas constantes no passo

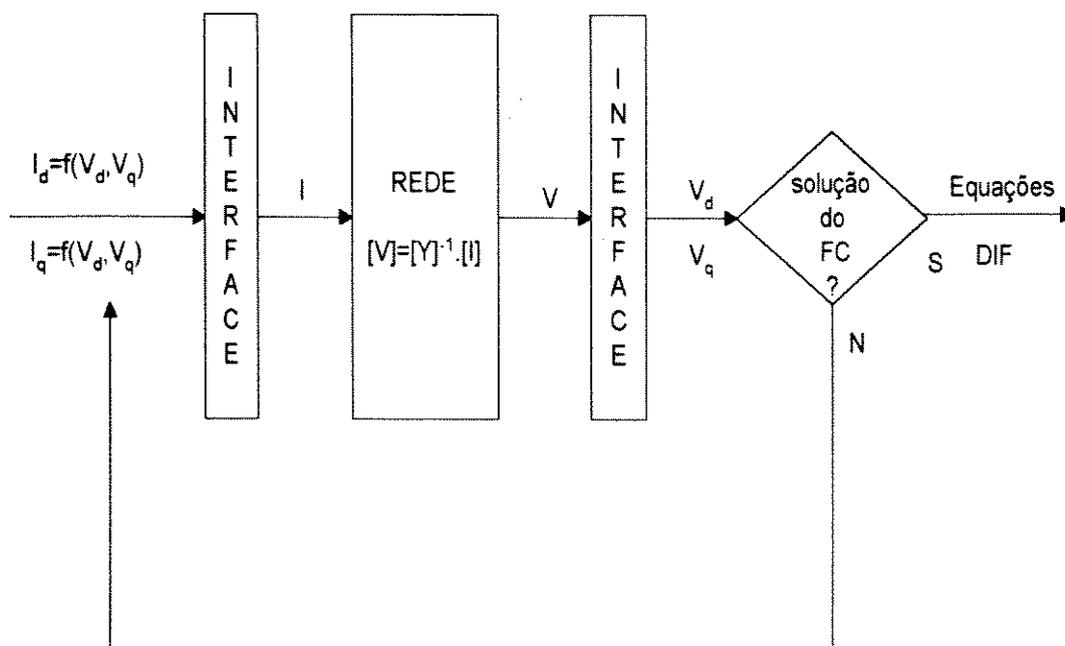


Figura 2.3 Solução do FC - Processo clássico

Na solução do **FC** considera-se as variáveis diferenciais internas das máquinas E'_q, E'_d e δ constantes, e calcula-se uma tensão terminal V para essa condição. A convergência é satisfeita quando a diferença entre as tensões calculadas em duas iterações sucessivas for menor que um erro ϵ prefixado. Após a transformação de V na **interface**, os valores V_d e V_q resultantes retornarão para o cálculo dos novos valores I_d , I_q e o processo continua até a convergência do **FC**.

Método Dommel&Sato

Após a publicação de Dommel&Sato [5], a maioria dos trabalhos de simulação dinâmica tem utilizado a regra trapezoidal para discretizar as equações diferenciais do modelo de um sistema de potência. As equações algebrizadas são combinadas com as equações da rede para uma solução **simultânea** ou resolvidas de uma forma **alternada**. Esse método permite utilizar passos de integração maiores que a menor constante de tempo do conjunto de equações, além de apresentar estabilidade numérica na solução de problemas rígidos.

Na formulação apresentada por Dommel&Sato, as equações de interface máquina-rede foram modificadas de forma que a solução do FC se tornasse mais eficiente. Durante a solução do FC não há necessidade da transformação das variáveis dos eixos $d-q$ para os eixos $\Re-\Im$ (e vice-versa). A simplificação foi obtida por manipulação algébrica da equação 2.9 utilizando-se a propriedade 2.10, cuja demonstração encontra-se no Apêndice A e de onde se obtém a expressão 2.11 utilizada por Dommel&Sato.

$$AV_q + jBV_d = \frac{1}{2} \left[(A + B)Ve^{-j\delta} - (B - A)\dot{V}e^{j\delta} \right] \quad (2.10)$$

$$I = \frac{r - \frac{1}{2}j(x'_d + x'_q)}{r^2 + x'_d x'_q} (E' - V) - \frac{\frac{1}{2}j(x'_q - x'_d)}{r^2 + x'_d x'_q} (E' - \dot{V}) e^{j2\delta} \quad (2.11)$$

(* sobre os fasores indica conjugado complexo)

No método **alternado normal** o processo de solução do FC adquire a forma mostrada na figura 2.4:

E'_d, E'_q, δ assumidas constantes no passo

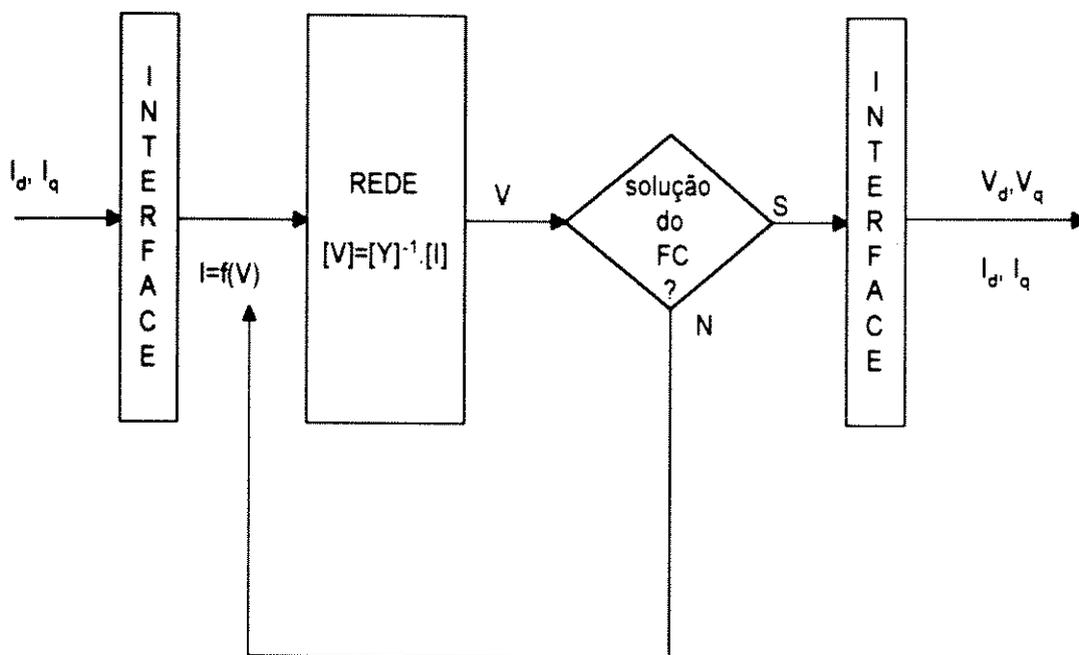


Figura 2.4 Solução do FC - Processo Dommel&Sato

A matriz $[Y]$ pode ser modificada pela introdução da denominada admitância fictícia, dada por:

$$Y_{fic} = \frac{r - j\frac{1}{2}(x'_q + x'_d)}{r^2 + x'_d x'_q} \quad (2.12)$$

e obtida do equivalente Norton da equação 2.11, indicada na figura 2.5, onde:

$$I_{saliência} = - \frac{j\frac{1}{2}(x'_q - x'_d)}{r^2 + x'_d x'_q} (\dot{E}' - \dot{V}) e^{j2\delta} \quad (2.13)$$

$$I_{fic} = E' Y_{fic} + I_{saliência} \quad (2.14)$$

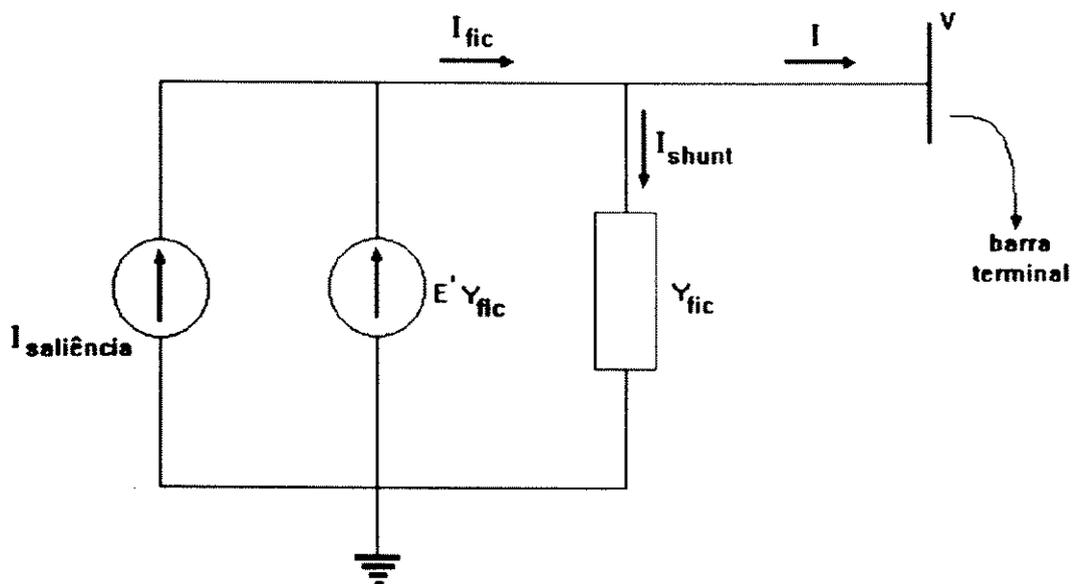


Figura 2.5 Norton equivalente

A introdução de Y_{fc} como admitância "shunt" na barra, melhora consideravelmente a convergência nos casos onde a formulação clássica falha.

As técnicas empregadas para solução do FC são baseadas na triangularização da matriz admitância e no método Newton-Raphson [5]. A preferência tem recaído sobre o primeiro método pois o Newton-Raphson requer uma retriangularização da Jacobiana a cada passo, enquanto que a matriz admitância necessita da retriangularização apenas nos eventos onde ocorrem modificações da rede. Testes indicam que a solução usando a triangularização da matriz admitância é mais rápido e requer menor capacidade de armazenamento computacional. Porém o método Newton-Raphson conta a seu favor a facilidade de lidar com redes tendo nós cujas potências e tensões são especificadas. Outra situação favorável é a inclusão da variação da frequência nas máquinas, cargas e impedâncias das linhas.

Extensão para Estudos de Médio e Longo-Prazo

Todas as técnicas utilizadas para solucionar os problemas de curto-prazo podem ser aplicadas nos casos de médio e longo-prazo. A diferença ocorre na modelagem do sistema, com a exclusão dos elementos de dinâmicas rápidas e inclusão daqueles de resposta lenta como, por exemplo, as caldeiras e comutadores de "tap" de transformadores. Técnicas mais eficientes, como linearização em torno do ponto de operação, tem sido empregadas para pequenas perturbações, evitando-se assim acumular grandes erros durante o processo de simulação.

As técnicas empregadas nas soluções dos problemas dinâmicos através da linearização em torno de um ponto de operação, podem ser aplicadas no domínio da frequência, utilizando-se os conceitos de torque de sincronismo e torque de amortecimento. Esses torques são as componentes do torque elétrico que aparecem como resposta a uma perturbação do torque mecânico, sendo que o torque de sincronismo está em fase com o ângulo do rotor e o torque de amortecimento está em fase com a velocidade [21].

O modelo é mostrado na figura 2.6 e equações 2.15 e 2.16 [14]:

$$\Delta T_m = \frac{2Hs^2}{\omega_s} \Delta \delta + \left. \frac{\partial T_e}{\partial \omega} \right|_0 s \Delta \delta + \left. \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \right|_0 \Delta \delta \quad (2.15)$$

$$\Delta T_e = \left. \frac{\partial T_e}{\partial \omega} \right|_0 s \Delta \delta + \left. \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \right|_0 \Delta \delta \quad (2.16)$$

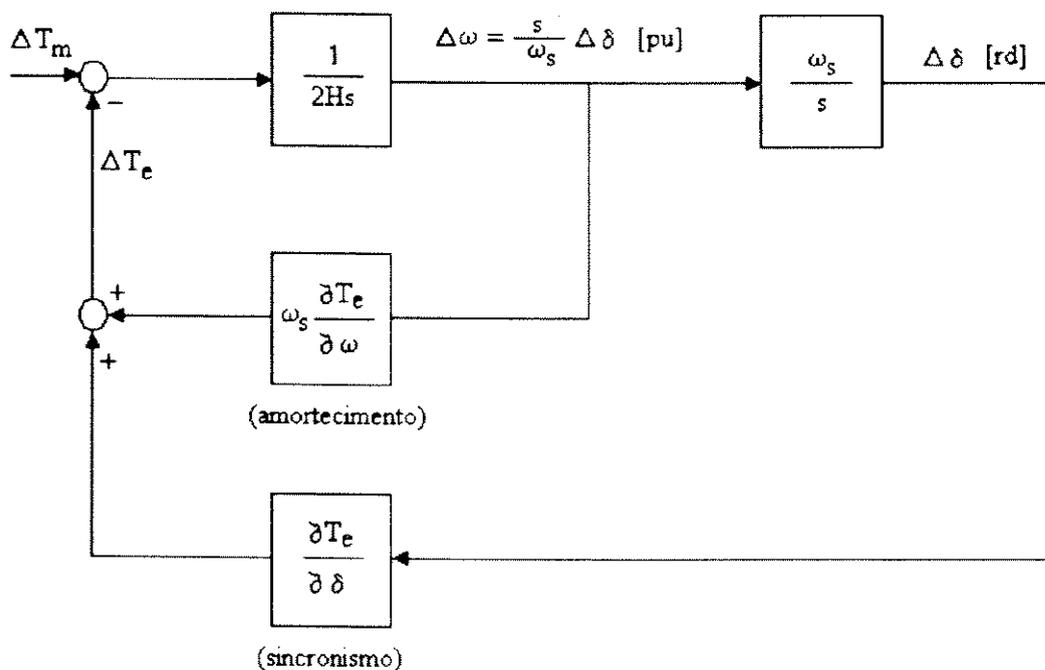


Figura 2.6 Torque de Sincronismo e Torque de Amortecimento

Embora não estejam representados no modelo, os torques elétricos produzidos pelo sistema de excitação e sinais estabilizantes do PSS ("Power System Stabilizer") podem ser decompostos nestas duas componentes do torque. Os modelos de cargas, influenciados pela variação de tensão e frequência, também afetam os torques de sincronismo e amortecimento.

Recente trabalho publicado no IEEE [15] aborda as pequenas perturbações nesta forma linearizada, porém utilizando o conceito de **Balço Nodal de Potência**, sendo denominado de **Modelo de Sensibilidade de Potência** (MSP). A hipótese utilizada no desenvolvimento deste modelo baseia-se no princípio de que durante o processo dinâmico, o balanço nodal das potências ativa e reativa deve ser continuamente satisfeito em todas as barras, ou seja:

$$P_g - P_e = 0 \quad (2.17)$$

$$Q_g - Q_e = 0 \quad (2.18)$$

onde os subscritos "g" e "e" referem-se respectivamente às potências gerada e externa.

Essa formulação, quando aplicada a um sistema de potência de muitas barras, não necessita utilizar do recurso da barra infinita como referência do sistema. Através da linearização em torno do ponto de operação em regime, o modelo estabelece duas matrizes de

sensibilidade correspondendo, respectivamente, às variações de tensão ΔV e ângulo $\Delta\theta$ das barras. Esse arranjo permite que a solução para a obtenção dessas duas grandezas seja desacoplada, e o processo se desenvolve sem a necessidade da convergência a cada intervalo de integração. Entretanto, esse modelo é aplicável apenas quando a resposta do sistema a uma perturbação ocorrer numa região que possa ser representada de forma linearizada.

Levando em conta as vantagens que o MSP proporciona na solução dos problemas dinâmicos de pequena perturbação, torna-se evidente uma questão extremamente relevante: aplicar o conceito de **Balanco Nodal** em problemas dinâmicos **não-lineares**. Esta pesquisa buscou uma resposta a esta questão, visando desenvolver programa computacional para combinar essas duas estratégias de solução e permitir a simulação por períodos longos. A utilização da matriz Jacobiana no modelo não-linear torna mais fácil lidar com redes tendo nós de potências especificadas e considerar as variações de frequência nas máquinas e impedâncias das linhas.

3. A Dinâmica do Balanço Nodal de Potência (BNP)

3.1 Estrutura do Modelo BNP

Observando-se o processo do FC proposto por Dommel&Sato (figura 2.4), verifica-se que a cada convergência é obtida uma tensão V que atende a equação 2.11. Pode-se obter então a potência do gerador através do produto (Apêndice B) :

$$S_g = VI^* = P_g + jQ_g \quad \text{onde:}$$

$$P_g = \frac{rVE'}{r^2 + x_d' x_q'} \cos(\theta - \delta) - \frac{rV^2}{r^2 + x_d' x_q'} - \frac{x_q' VE'}{r^2 + x_d' x_q'} \sin(\theta - \delta) + \frac{1}{2} \frac{(x_q' - x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} V^2 \sin 2(\theta - \delta) \quad (3.1)$$

$$Q_g = \frac{rVE'}{r^2 + x_d' x_q'} \sin(\theta - \delta) + \frac{x_q' VE'}{r^2 + x_d' x_q'} \cos(\theta - \delta) - \frac{1}{2} \frac{(x_q' + x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} V^2 - \frac{1}{2} \frac{(x_q' - x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} V^2 \cos 2(\theta - \delta) \quad (3.2)$$

Estas equações tornam-se mais familiares se fizermos $r = 0$:

$$P_g = \frac{VE'}{x_d'} \sin(\delta - \theta) + \frac{1}{2} \frac{(x_d' - x_q')}{x_d' x_q'} V^2 \sin 2(\delta - \theta) \quad (3.3)$$

$$Q_g = \frac{VE'}{x_d'} \cos(\delta - \theta) - \frac{1}{2} \frac{(x_q' + x_d')}{x_d' x_q'} V^2 + \frac{1}{2} \frac{(x_d' - x_q')}{x_d' x_q'} V^2 \cos 2(\delta - \theta) \quad (3.4)$$

Dessa forma o balanço nodal de corrente do processo Dommel&Sato transformou-se em balanço de potência, que pode ser estendido para todas as barras da rede. Como esse balanço de potência deve ser satisfeito ao longo do tempo, o problema de estabilidade poderá ser formulado em termos de **balanço dinâmico de potência** conforme ilustrado na figura 3.1. A figura 3.2 mostra a solução do FC dessa estrutura. Comparando-se as figuras 2.1 e 3.1, observa-se que nessa última não há necessidade das equações de interface.

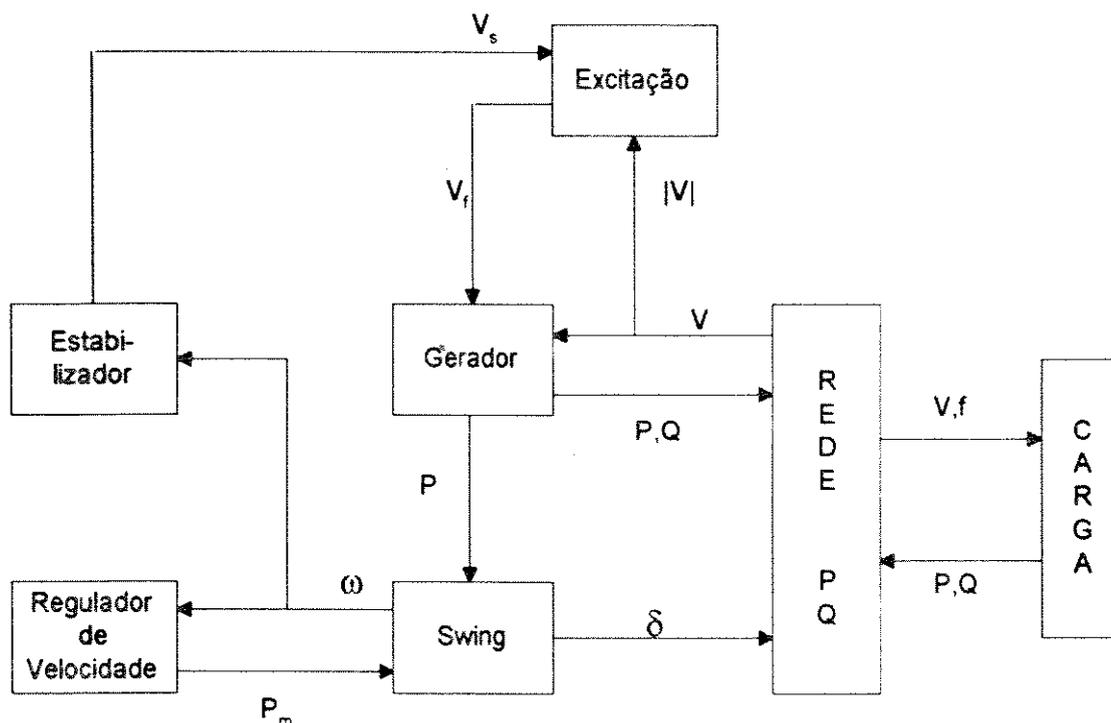


Figura 3.1 Estrutura de solução por Balanço de Potência

Na formulação **BNP** as equações do FC assumem a forma convencional e podem ser resolvidas pelo método de Newton-Raphson. O fato de se poder utilizar os métodos tradicionais para a solução do fluxo de carga, em especial o método **desacoplado** (designado por **BNP desacoplado**), apresenta o atrativo de também poder manter **constante a matriz de sensibilidade** (Jacobiana) durante um ou mais passos de integração. Esse fato põe em evidência um ambiente propício para considerar as variações de frequência nos parâmetros da rede bem como sua influência nas cargas, através do cálculo preciso do Balanço Nodal de Potência, sem perder a eficiência na solução global. No método Dommel&Sato a consideração da variação da frequência altera continuamente a matriz admitância, e para se evitar essas alterações utiliza-se a técnica que transforma o efeito das variações de frequência em injeções de corrente nas barras [11].

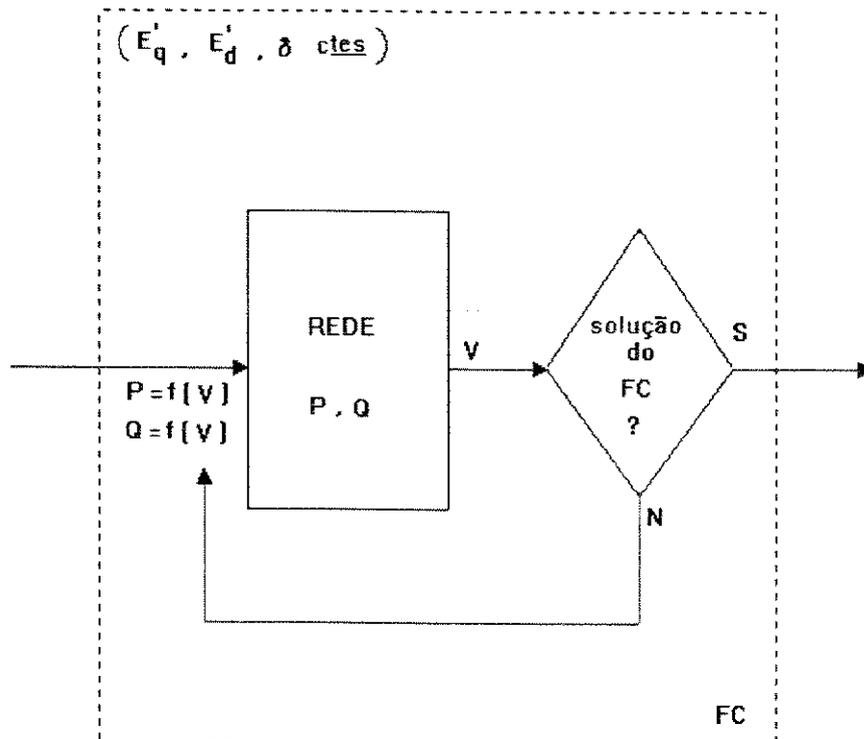


Figura 3.2 Solução do FC - Processo por Fluxo de Potência (BNP)

A matriz admitância na formulação Dommel&Sato é uma matriz complexa $NB \times NB$ (NB =número de barras) e, com a expansão nas partes real e imaginária, cada elemento deve ser substituído por um bloco real 2×2 [11]. Na formulação **BNP** desacoplado, considera-se apenas duas submatrizes reais $NB \times NB$ da Jacobiana. As duas formulações podem fazer uso das técnicas que tratam esparsidade, pois as matrizes apresentam a mesma estrutura.

Boa parte da literatura técnica ignora o efeito da saturação das máquinas. A justificativa tem se baseado no fato de que a saturação tem pequeno efeito na estabilidade, e sua omissão está na direção de um resultado mais conservativo. Contudo, em casos onde se torna necessária essa representação, uma das maneiras é alterar as impedâncias do estator x'_d e x'_q por um fator de saturação que depende da tensão de Potier [11]. Desta forma, o **BNP** trata da saturação igual à formulação Dommel&Sato.

3.2 Equacionamento em Termos de Potência

No modelo **BNP** o balanço nodal das potências ativa e reativa deve ser continuamente satisfeito em todas as barras e durante todo o processo dinâmico, ou seja:

$$P_{\text{maq}} - P_{\text{rede}} = 0 \quad (3.5)$$

$$Q_{\text{maq}} - Q_{\text{rede}} = 0 \quad (3.6)$$

onde o subscrito “maq” refere-se às potências dos geradores e das cargas, expressas em termos de injeções de potência ativa e reativa; o subscrito “rede” refere-se às potências nodais requeridas pela rede.

O método de solução das equações 3.5 e 3.6 segue os métodos adotados na solução do **FC** tradicional [16], diferindo apenas no tratamento dado a P_{maq} e Q_{maq} . No **FC** convencional P_{maq} e Q_{maq} são valores especificados (constantes) enquanto que no **BNP** essas potências seguem uma dinâmica própria e, portanto, podem contribuir na formação dos elementos diagonais das submatrizes da Jacobiana.

A seguir serão considerados alguns componentes da estrutura da figura 3.1 para se obter as equações adequadas à nova formulação por fluxo de potência.

Modelo da Rede

Ao invés da formulação clássica por corrente, a nova abordagem, objeto deste trabalho, considera injeções de potência ativa e reativa e, portanto, utiliza as equações de fluxo de potência entre os nós da rede. Por se tratar de um problema tradicional de fluxo de carga, será enfatizada a formação da matriz Jacobiana pois o objetivo pretendido é a solução pelo método Newton-Raphson, em especial o **desacoplado**.

A matriz Jacobiana comumente utilizada nos cálculos de fluxo de carga [16] é representada na forma compacta por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

onde as funções consideradas no cálculo dos erros e da Jacobiana correspondem às equações de potência nodal ativa e reativa da rede:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.8)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.9)$$

Se expressarmos a condutância e susceptância série das linhas na forma polar, ou seja:

$$G_{km} = -\lambda_{km} \text{sen } \varphi_{km} \quad (3.10)$$

$$B_{km} = \lambda_{km} \text{cos } \varphi_{km} \quad (3.11)$$

onde

$$\varphi_{km} = \text{tg}^{-1} \frac{r_{km}}{x_{km}} \quad (3.12)$$

$$\lambda_{km} = \frac{1}{\sqrt{r_{km}^2 + x_{km}^2}} \quad (3.13)$$

então os termos das submatrizes do Jacobiano, conforme indicado no Apêndice C, assumem as formas de seno e cosseno.

$$[J] = \begin{array}{|c|c|} \hline \text{cos } \varphi_{km} & \text{sen } \varphi_{km} \\ \hline (H) & (N) \\ \hline \text{sen } \varphi_{km} & \text{cos } \varphi_{km} \\ \hline (M) & (L) \\ \hline \end{array} \quad (3.14)$$

Essa formulação mostra mais claramente em que condições se pode fazer o desacoplamento e manter as submatrizes constantes.

Modelo dos Geradores

O modelo de máquinas síncronas considerado neste trabalho baseia-se no modelo IEEE tipo 2, de terceira ordem, descrito na referência [17], por ser apropriado para as aplicações desejadas.

As equações diferenciais para o gerador, considerando apenas os efeitos transitórios no estator, expressas em termos de P e Q são dadas por (Apêndice D):

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{do}} \left\{ E'_q + (x_d - x'_d) \left[\frac{P \text{sen}(\delta - \theta) + Q \text{cos}(\delta - \theta)}{V} \right] - E_{FD} \right\} \quad (3.15)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{qo}} \left\{ E'_d + (x_q - x'_q) \left[\frac{P \text{cos}(\delta - \theta) - Q \text{sen}(\delta - \theta)}{V} \right] \right\} \quad (3.16)$$

Na máquina de pólos salientes, modelo 2, sendo $E'_d = 0$, considera-se apenas a equação 3.15, e nas equações 3.1 a 3.4 E' pode ser substituído por E'_q . Então, para $r = 0$ as potências fornecidas pelo gerador na barra k são dadas por:

$$P_{gk} = \frac{V_k E'_q}{x_d} \sin(\delta - \theta_k) + \frac{1}{2} \frac{(x'_d - x'_q)}{x'_d x'_q} V_k^2 \sin 2(\delta - \theta_k) \quad (3.17)$$

$$Q_{gk} = \frac{V_k E'_q}{x_d} \cos(\delta - \theta_k) + \frac{1}{2} \frac{(x'_d - x'_q)}{x'_d x'_q} V_k^2 \cos 2(\delta - \theta_k) - \frac{1}{2} \frac{(x'_d + x'_q)}{x'_d x'_q} V_k^2 \quad (3.18)$$

Na formação da matriz Jacobiana as derivadas das potências geradas poderão contribuir como elementos "shunt" nas diagonais das submatrizes e assim melhorar a convergência do FC. Esses elementos diagonais são:

$$H_{gkk} = \frac{\partial P_{gk}}{\partial \theta_k} = -\frac{E'_q V_k}{x_d} \cos(\delta - \theta_k) + \frac{x'_q - x'_d}{x'_d x'_q} V_k^2 \cos 2(\delta - \theta_k) \quad (3.19)$$

$$N_{gkk} = \frac{\partial P_{gk}}{\partial V_k} = -\frac{E'_q}{x_d} \sin(\delta - \theta_k) - \frac{x'_q - x'_d}{x'_d x'_q} V_k \sin 2(\delta - \theta_k) \quad (3.20)$$

$$M_{gkk} = \frac{\partial Q_{gk}}{\partial \theta_k} = \frac{E'_q V_k}{x_d} \sin(\delta - \theta_k) + \frac{x'_q - x'_d}{x'_d x'_q} V_k^2 \sin 2(\delta - \theta_k) \quad (3.21)$$

$$L_{gkk} = \frac{\partial Q_{gk}}{\partial V_k} = \frac{E'_q}{x_d} \cos(\delta - \theta_k) - \frac{x'_q - x'_d}{x'_d x'_q} V_k \cos 2(\delta - \theta_k) - \frac{x'_q + x'_d}{x'_d x'_q} V_k \quad (3.22)$$

Modelo das Cargas

O modelo de carga utilizado no programa computacional deste trabalho consiste das equações estáticas 2.3 e 2.4 e representadas na forma simplificada:

$$P_c = a_1 + b_1 V + d_1 f \quad (3.23)$$

$$Q_c = a_2 + c_2 V^2 + e_2 V f \quad (3.24)$$

A frequência pode ser calculada pela variação no tempo do ângulo das barras onde as cargas estão conectadas. Ao invés da frequência local será utilizada a frequência média do sistema, calculada a cada instante pela ponderação das frequências de todos os geradores:

$$\bar{f}_m \text{ (pu)} = \frac{\sum H_i \frac{\omega_i}{\omega_s}}{\sum H_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_{\text{ger}} \quad (3.25)$$

ω_s = velocidade síncrona em rad/seg,

H_i = constante de inércia dos geradores em segundos.

As cargas também poderão contribuir para a formação dos elementos diagonais das submatrizes da Jacobiana, da mesma forma que os geradores - representados pelas equações 3.19 a 3.22. A dificuldade para se determinar essas parcelas irá depender da complexidade das equações utilizadas no modelo. Para representar dinamicamente os motores de indução, equações diferenciais poderão ser acrescentadas para calcular o escorregamento e a fcm, e assim estimar a evolução da potência absorvida.

3.3 Método de Solução do BNP

Qualquer que seja o método escolhido para resolver as equações diferenciais da máquina e controle, a solução separada das equações algébricas tem sido a tradicionalmente adotada. Do ponto de vista da flexibilidade da estrutura do programa computacional esta forma de solução é a que traz mais facilidade nos instantes em que se deseja alterar o sistema de potência, através da inclusão/exclusão/alteração de máquinas e controles. Outro ponto a favor da solução **alternada** das equações diferenciais e algébricas é a possibilidade de se utilizar diferentes passos de integração entre as equações diferenciais.

A figura 2.2 identifica dois blocos de convergência quando se utiliza o esquema **alternado normal**. Somente após a convergência das variáveis V, θ das equações algébricas é que o processo é desviado para a malha externa. Esse processo continua até obter a convergência das variáveis δ, E_q das equações diferenciais. Portanto, para cada passo de integração, o número total de iterações desse esquema de solução é igual ao produto do número de iterações das equações algébricas pelo número de iterações das equações diferenciais.

A solução precisa do **FC** a cada reintegração não é uma estratégia computacionalmente eficiente. É conveniente executar uma única iteração do **FC** a cada ciclo, de modo que a solução dos dois sistemas de equações torna-se **entrelaçado** [11].

A figura 3.3 mostra o método **alternado entrelaçado** com a formulação **BNP**, que será aplicado nos testes de simulação de um sistema de 9 barras, no capítulo 4. Com algumas alterações, essa estratégia de solução é a que mais se aproxima daquela utilizada no modelo linearizado **MSP** [15], onde tanto a iteração do **FC** quanto a integração são realizadas uma única vez a cada passo, e sem necessidade de perseguir a convergência.

A extrapolação de variáveis também pode ser aplicada nesta nova formulação visando obter melhor eficiência computacional. Este trabalho não aborda extrapolações para o processo **BNP**, porém para as formulações clássica e Dommel&Sato a Referência [12] fornece uma importante observação de que a variável **V** deve ser extrapolada na forma polar ao invés da forma retangular, pois a amplitude e o ângulo tendem a mudar de uma maneira independente.

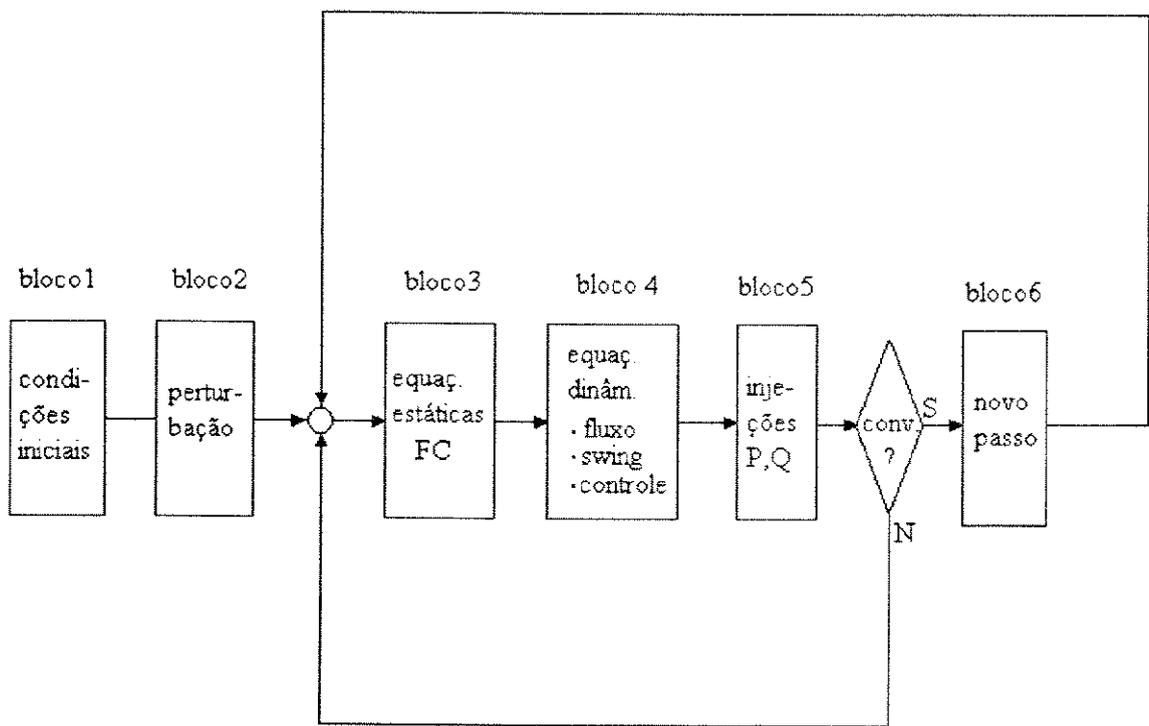


Figura 3.3 Método Alternado Entrelaçado - **BNP**

A seguir será feita uma descrição resumida, e logo após uma mais detalhada, de cada um dos blocos que compõem o algoritmo de solução da figura 3.3:

Algoritmo

i - partindo do bloco 1 calcula-se as condições iniciais da rede, máquinas e controle, utilizando-se para tanto os resultados do FC para a operação em regime;

ii - no segundo bloco ocorre a perturbação no sistema. Essa perturbação, por exemplo, poderá refletir-se como uma variação nas injeções de potência ΔP , ΔQ na(s) barra(s);

iii - com ΔP e ΔQ , a solução do FC no bloco 3 em uma iteração fornecerá ΔV , $\Delta\theta$. Os novos valores estimados para V e θ serão:

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V \quad (3.26)$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta \quad (3.27)$$

iv - a seguir o bloco 4 irá resolver as equações dinâmicas e obter novos valores estimados para as variáveis diferenciais, utilizando V^{v+1} e θ^{v+1} .

v - com as novas estimativas ($v+1$) das variáveis algébricas e diferenciais, no bloco 5 são calculadas as novas estimativas das injeções de potência P_{maq}^{v+1} e Q_{maq}^{v+1} e em seguida verificar as condições abaixo:

$$\bullet \quad P_{maq}^{v+1} - P_{maq}^v \leq \varepsilon_p \quad (3.28)$$

$$Q_{maq}^{v+1} - Q_{maq}^v \leq \varepsilon_q \quad (3.29)$$

sendo ε_p e ε_q respectivamente os erros admitidos para as injeções de potência ativa e reativa entre duas iterações consecutivas.

• se as condições acima não foram atendidas, retorne ao bloco 3 (item **iii**) onde se calcula o novo balanço das potências do sistema, utilizando-se as novas estimativas ($v+1$):

$$\Delta P^{v+1} = P_{maq}^{v+1} - P_{rede}^{v+1} \quad (3.30)$$

$$\Delta Q^{v+1} = Q_{maq}^{v+1} - Q_{rede}^{v+1} \quad (3.31)$$

Com os novos ΔP^{v+1} e ΔQ^{v+1} dá-se seqüência ao processo de calcular os próximos ΔV e $\Delta\theta$.

vi - se as condições 3.28 e 3.29 forem atendidas, no bloco 6 é dado início ao novo passo $t^{v+1} = t^v + \Delta t$. A seguir as variáveis são reinicializadas:

$$(\text{variáveis})^v = (\text{variáveis})^{v+1} \quad (3.32)$$

Deve-se observar que retornando ao bloco 3, o primeiro cálculo do balanço de potência é praticamente zero pois estamos em um ponto solução do problema. O desequilíbrio ocorrerá após passar pelo bloco 4 das equações diferenciais devido aos novos valores calculados para as respectivas variáveis. Portanto, maior eficiência pode ser conseguida efetuando-se extrapolações de algumas variáveis da equação 3.32, de modo que o primeiro cálculo do balanço de potência seja suficiente para fornecer ΔV e $\Delta \theta$ significativos. Este trabalho não considera as extrapolações, deixando que essa questão seja abordada em futuras pesquisas.

Na figura 3.3 não estão representadas a finalização do processo de simulação e as perturbações subseqüentes porventura existentes.

Condições Iniciais - Bloco 1

Antes da ocorrência de qualquer perturbação, o sistema de potência encontra-se em regime permanente e a solução do FC fornecerá as condições iniciais V_{o-} e θ_{o-} da rede. O subscrito $o-$ identifica o estado inicial antes da perturbação. A seguir, as condições iniciais dos geradores síncronos serão determinadas em termos de P e Q :

a) ângulo de carga (δ)

O ângulo de carga δ_{o-} pode ser determinado a partir das equações de potência ativa e reativa na condição de regime. Desprezando-se a resistência interna da máquina de polos salientes temos, em regime :

$$P_{o-} = \frac{V_{o-} E_{qo-}}{x_d} \sin(\theta_{o-} - \delta_{o-}) + \frac{1}{2} \frac{(x_q - x_d)}{x_d x_q} V_{o-}^2 \sin 2(\theta_{o-} - \delta_{o-}) \quad (3.33)$$

$$Q_{o-} = \frac{V_{o-} E_{qo-}}{x_d} \cos(\theta_{o-} - \delta_{o-}) - \frac{1}{2} \frac{(x_q + x_d)}{x_d x_q} V_{o-}^2 - \frac{1}{2} \frac{(x_q - x_d)}{x_d x_q} V_{o-}^2 \cos 2(\theta_{o-} - \delta_{o-}) \quad (3.34)$$

Isolando E_{qo-} das equações 3.33 e 3.34 e igualando-se as equações assim obtidas, teremos :

$$\delta_{o-} = \theta_{o-} + \text{tg}^{-1} \left[\frac{P_{o-}}{Q_{o-} + \frac{V_{o-}^2}{x_q}} \right] \quad (3.35)$$

Esta expressão também é válida para máquinas de polos lisos, lembrando-se que em regime $E_d=0$ e $x_d=x_q$.

b) tensão de campo (E_{FD})

Em regime, a tensão de campo E_{FD} corresponde à tensão induzida no eixo q (E_q) na mesma base, ou seja :

$$E_{FD_{o-}} = E_{q_{o-}} \quad (3.36)$$

Combinando as equações 3.33 e 3.34 (ver Apêndice D) obtemos a expressão 3.37 válida para as máquinas de polos lisos e salientes. Utilizando o subscrito $o-$, indicativo da condição em regime, temos:

$$E_{FD_{o-}} = E_{q_{o-}} = V_{o-} \cos(\delta_{o-} - \theta_{o-}) + \frac{x_d}{V_{o-}} [P_{o-} \sin(\delta_{o-} - \theta_{o-}) + Q_{o-} \cos(\delta_{o-} - \theta_{o-})] \quad (3.37)$$

c) fluxo concatenado com o enrolamento de campo (E'_q)

Como mostrado no Apêndice E, basta substituir x_d por x'_d na equação 3.37 para se obter a condição inicial $E'_{q_{o+}}$. Outra maneira de se obter $E'_{q_{o+}}$ é através da equação da potência, desde que $x_q = x'_q$:

$$P_{o-} = \frac{-V_{o-} E'_{q_{o+}}}{x'_d} \sin(\theta_{o-} - \delta_{o-}) + \frac{1}{2} \frac{(x'_q - x'_d)}{x'_q x'_d} V_{o-}^2 \sin 2(\theta_{o-} - \delta_{o-}) \quad (3.38)$$

ou,

$$E'_{q_{o+}} = \frac{(x'_q x'_d) P_{o-} - \left[\frac{1}{2} (x'_d - x'_q) V_{o-}^2 \sin(\delta_{o-} - \theta_{o-}) \right]}{V_{o-} x'_q \sin(\delta_{o-} - \theta_{o-})} \quad (3.39)$$

No programa computacional, para simulação do sistema de 9 barras, foi utilizada esta última equação. O modelo escolhido para o sistema de excitação, mostrado na figura 3.4, é do **Tipo 1**, de acordo com a designação sugerida na Referência 17. Para este sistema e na condição de regime tem-se que $V_{REF} = V_{o-}$ e k_e é escolhido com sinal contrário à função de saturação S_e , obtida para o valor inicial $E_{FD_{o-}}$ [19].

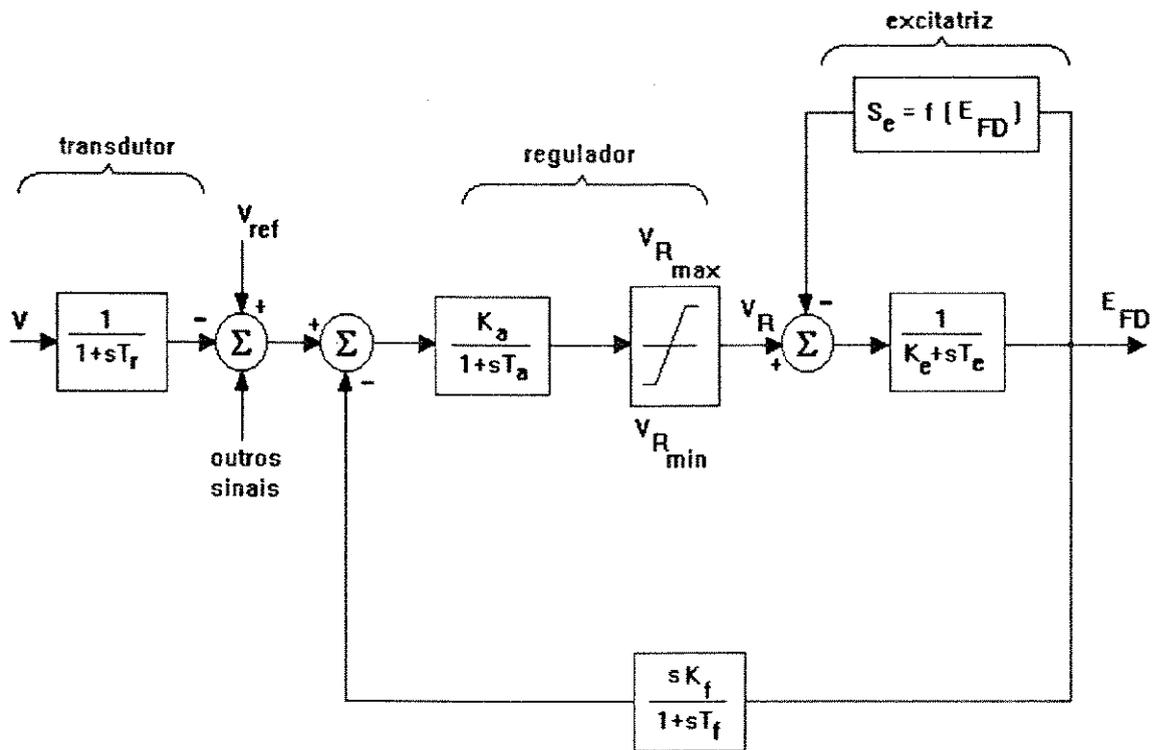


Figura 3.4 Sistema de Excitação Tipo 1

Perturbação - Bloco 2

As perturbações consideradas neste trabalho simulam entrada/saída de carga ou geração. Perturbações como curto-circuito, abertura e/ou fechamento de linhas não foram simulados.

Para o caso de perturbações nas cargas, considerou-se as seguintes equações de potência:

$$P_L = A + D_1 \bar{f} + D_2 V + \Delta P_L \quad (3.40)$$

$$Q_L = B + D_3 V \bar{f} + D_4 V^2 + \Delta Q_L \quad (3.41)$$

onde: ΔP_L e ΔQ_L são os incrementos de carga simulando as perturbações; os coeficientes D_1 a D_4 são dados e dependem das características de cada carga; \bar{f} é a frequência média do sistema de acordo com a equação 3.25; A e B serão determinados a partir da condição em regime, com:

$$\begin{aligned}
P_L &= P_{Lo-} & Q_L &= Q_{Lo-} \\
\bar{f} &= 1 \text{ pu} & V &= V_{o-} \\
\Delta P_L &= 0 & \Delta Q_L &= 0
\end{aligned}$$

e portanto

$$A = P_{Lo-} - D_1 - D_2 V_{o-} \quad (3.42)$$

$$B = Q_{Lo-} - D_3 V_{o-} - D_4 V_{o-}^2 \quad (3.43)$$

Durante o processo de simulação pode-se admitir que as potências absorvidas pelas cargas permanecerão constantes e iguais aos valores correspondentes à tensão e frequência do passo anterior. Em outras palavras, ao se calcular o estado do sistema no ponto $n+1$, as potências injetadas pelas cargas (P_L , Q_L) permanecerão constantes naquele passo e dependentes de V_n e \bar{f}_n do passo anterior:

$$P_{L(n+1)} = A + D_1 \bar{f}_n + D_2 V_n + \Delta P_L = K1_{(n+1)}$$

$$Q_{L(n+1)} = B + D_3 V_n \bar{f}_n + D_4 V_n^2 + \Delta Q_L = K2_{(n+1)}$$

onde $K1$ e $K2$ permanecerão constantes durante todo o passo ($n+1$)

Para o caso de perturbação na potência mecânica da turbina, a modificação ocorrerá na equação de oscilação ("swing").

Solução do Fluxo de Carga - Bloco 3

No processo convencional de solução de fluxo de carga, as expressões que representam o sistema são [16]:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k(\underline{V}, \underline{\theta}) = 0 \quad (3.44)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k(\underline{V}, \underline{\theta}) = 0 \quad (3.45)$$

onde P_k^{esp} e Q_k^{esp} são respectivamente as potências líquidas ativa e reativa injetadas na barra k , com valores especificados e constantes. P_k e Q_k são as funções básicas do fluxo de carga.

Durante a simulação dinâmica e a cada iteração, as potências especificadas relativas aos geradores são funções de V, θ, E'_q, δ . Para as cargas, a hipótese adotada para simulação

computacional foi a de que em um passo de integração as potências especificadas permanecem constantes e funções de V, \bar{f} do passo anterior. Com isso estamos admitindo que a cada iteração e até o instante da convergência, ao se corrigir as variáveis V, θ, E'_q, δ , apenas as injeções P_g^{esp} e Q_g^{esp} dos geradores irão se ajustar de acordo com a seqüência do processo abaixo:

sendo o vetor \underline{x} e a função vetorial $g(\underline{x})$,

$$\underline{g}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_g \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_g^{esp}(V, \theta, E'_q, \delta) - P(V, \theta) \\ P_L^{esp}(cte.) - P(V, \theta) \\ Q_g^{esp}(V, \theta, E'_q, \delta) - Q(V, \theta) \\ Q_L^{esp}(cte.) - Q(V, \theta) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

o método de Newton consiste em resolver $g(\underline{x})$ e obter o vetor de correção $\Delta \underline{x}$ dado pela equação linearizada, onde $J(\underline{x}^v)$ é o Jacobiano calculado no ponto:

$$g(\underline{x}^v) + J(\underline{x}^v)\Delta \underline{x}^v = 0 \quad (3.48)$$

obtendo-se a nova solução $\underline{x}^{v+1} = \underline{x}^v + \Delta \underline{x}^v$

O uso da barra de referência, conforme o FC convencional, não é necessário para o FC dinâmico pois estas barras estão incluídas nas equações P e Q dos geradores através da tensão e ângulo $E'_q \angle \delta$, onde a evolução do ângulo δ é calculada pela equação “swing” e E'_q é obtido pela equação de controle do fluxo. A singularidade das matrizes é evitada através da inclusão do modelo dos geradores na diagonal principal das sub-matrizes de sensibilidade [H] e [L].

Equações Dinâmicas - Bloco 4

Na seqüência, com os novos valores V, θ obtidos no bloco 3, resolve-se as equações dinâmicas: a) o sistema de excitação fornecerá a tensão de campo E_{FD} ; b) as equações de oscilação (“swing”) fornecerão o novo valor de δ (equações 2.3 e 2.4); c) a equação de fluxo 3.15 fornecerá o novo E'_q . A ação do PSS (“Power System Stabilizer”) pode ser incluída através da adição do sinal estabilizante ao controle da excitação. Também a ação do governador, controles primário e suplementar do CAG, pode ser representado na equação de oscilação através da potência mecânica P_m .

Injeções de Potência- Bloco 5

Neste bloco são calculadas as novas injeções de potência utilizando-se as variáveis obtidas nos blocos anteriores. A convergência é verificada comparando-se as novas potências com as calculadas na iteração anterior. Durante o processo de cálculo, as variáveis algébricas V, θ vão seguindo uma trajetória direcionada pelas submatrizes da Jacobiana e corrigidas com ΔV e $\Delta \theta$ que, a cada iteração, vão se tornando cada vez menor à medida que se aproxima da solução do passo. As equações diferenciais são resolvidas pelo método trapezoidal implícito em que o estado inicial é aquele do início do passo.

Novo Passo - Bloco 6

Havendo convergência, inicia-se o novo passo. Todas as variáveis, que constituem a solução do problema no tempo t (estado 1), serão consideradas como variáveis iniciais (estado 0) do próximo passo $t+\Delta t$, ou seja:

$$\begin{aligned} V_0(t + \Delta t) &= V_1(t) \\ \theta_0(t + \Delta t) &= \theta_1(t) \\ \delta_0(t + \Delta t) &= \delta_1(t) \dots \text{etc.} \end{aligned} \tag{3.49}$$

De forma esquemática, a figura 3.5 mostra a seqüência de solução das equações, identificando entre parênteses as equações envolvidas em cada bloco, e entre chaves as variáveis de entrada/saída dessas equações. Deve-se observar a importância da solução das equações em determinada seqüência pois as variáveis de saída de uma equação são as variáveis de entrada da próxima equação. Com relação às equações de sistema de excitação (Tipo 1 do IEEE) seguiu-se o procedimento da Referência [5] onde a tensão de campo E_{FD} é obtida em função da tensão terminal V . Na figura 3.5 observa-se que a convergência do método é feita sobre as potências dos geradores, que devem se ajustar às condições impostas pela rede e pelas cargas.

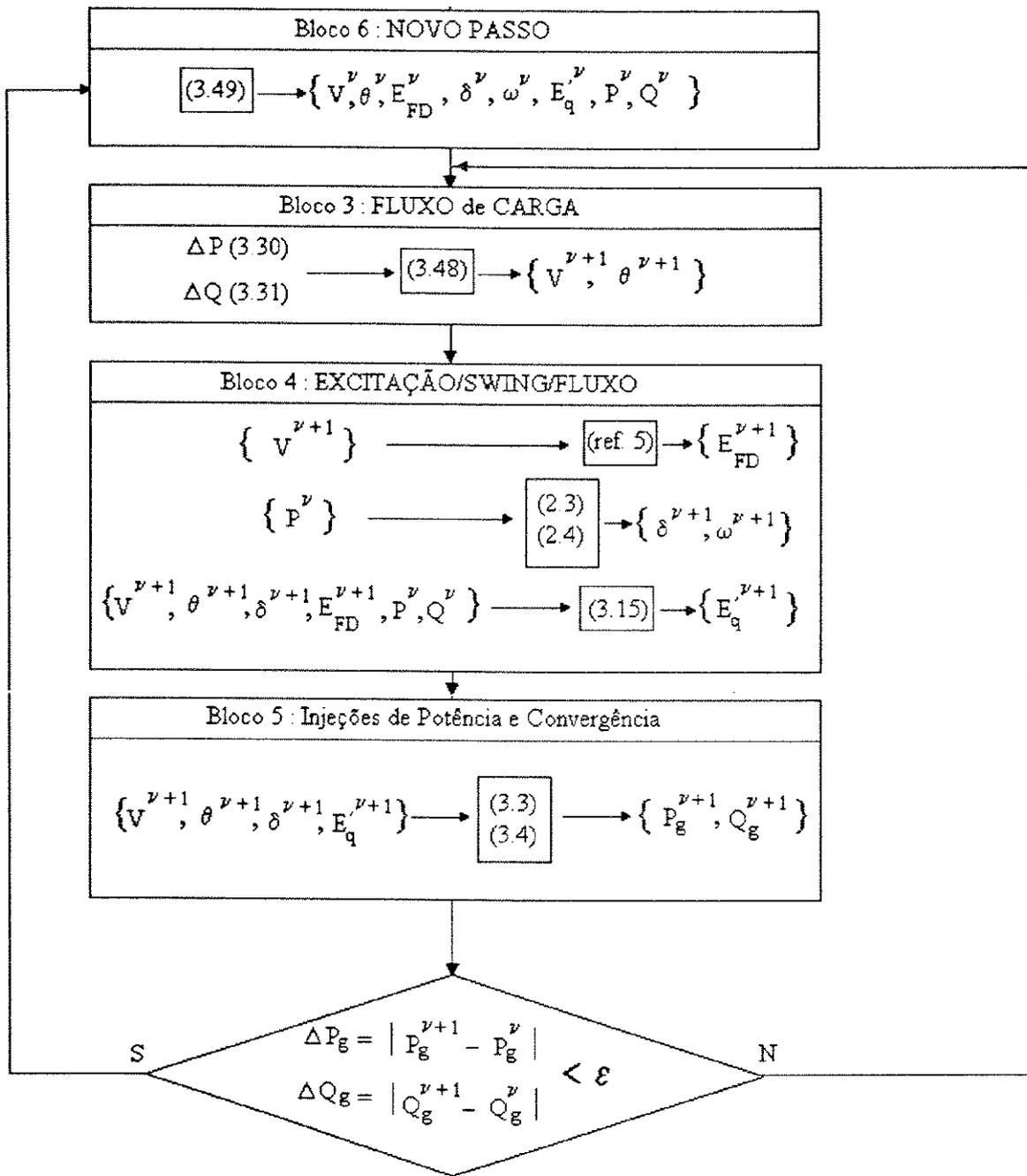


Figura 3.5 Sequência de Solução das Equações do Processo BNP Desacoplado Entrelaçado

4. Análise de Desempenho e Exemplos de Aplicação

4.1 Introdução

A formulação pelo balanço nodal de potência, apesar de muito utilizada para o cálculo do fluxo de carga e na análise estática de contingências, praticamente não tem sido explorada para aplicações dinâmicas. Pode-se atribuir isso em grande parte ao extraordinário sucesso alcançado pela formulação Dommel&Sato para o cálculo rápido da estabilidade transitória, aplicável a sistemas multimáquinas, conforme descrito no Capítulo 2. Tal método se ajusta perfeitamente ao estudo das condições transitórias pós-falha tipo curto-circuito devido à formulação por corrente, porém não se adequa igualmente bem para as análises relacionadas com o balanço dinâmico de potência sob médio e longo prazos, como o controle da geração, a ação dos estabilizadores e dos dispositivos de controle de fluxo de potência e de compensadores reativos.

Com algumas adaptações pode-se utilizar a formulação Dommel&Sato para obter a resposta de sistemas teste de forma a poder comparar os resultados com o método do Balanço Nodal de Potência (**BNP**) proposto nesse trabalho. Essas comparações são o objeto de estudo do presente Capítulo. Os testes propostos visam basicamente avaliar as características de convergência e precisão com respeito à escolha das tolerâncias, método de convergência e passos de integração. A vasta gama de curvas apresentadas procura reunir esses resultados da melhor forma possível.

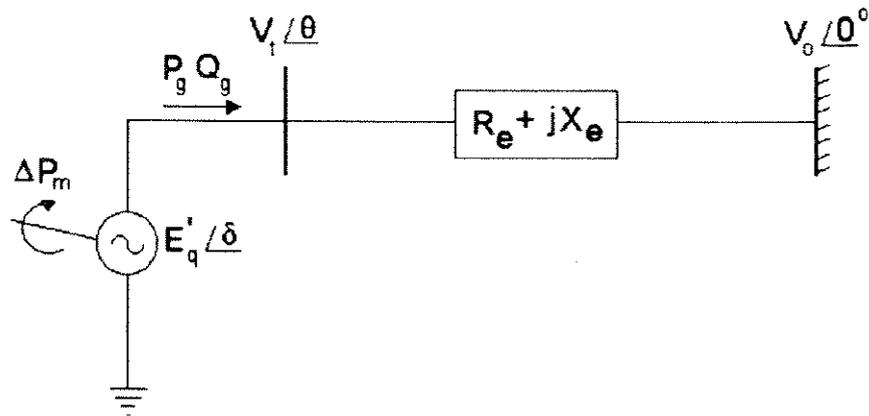
4.2 Caracterização das Simulações

Os Sistemas Teste

Para testar o desempenho da formulação **BNP** foram feitas simulações em dois sistemas, cujos dados encontram-se no Apêndice F:

a) O sistema I, conforme indicado na figura 4.1, consiste de um gerador conectado a uma **barra infinita**. Este sistema foi testado para duas diferentes condições de operação: um caso onde o sistema se mantém **estável** após a perturbação e outro onde o sistema torna-se **instável** após a perturbação. A perturbação consiste na redução brusca do torque mecânico (ΔP_m) aplicado no eixo da turbina.

As condições iniciais e as magnitudes das perturbações utilizadas nas simulações do Sistema I encontram-se na tabela 4.1.



sistema de excitação

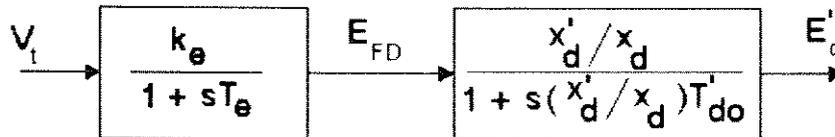


Figura 4.1 - Sistema I

Tabela 4.1 - Condições para Simulação do Sistema I

Caso em Estudo	Condições Iniciais (pu)	Perturbação (pu)	Característica do Sistema
A	$P_g=0.5$ $Q_g=0$ $k_c=25$	$\Delta P_m = -0.1$	Estável
B	$P_g=1.0$ $Q_g=-0.5$ $k_e=12.5$	$\Delta P_m = -0.1$	Instável

b) O Sistema II foi extraído da referência 12 e consiste de 9 barras, 9 linhas, 3 geradores e 3 cargas como mostra a figura 4.2. Foi simulada uma perturbação correspondente a um degrau aplicado na carga da barra 8. Simulação semelhante encontra-se na Referência 15 porém utilizando a versão linearizada do Balanço Nodal de Potência, denominada de Modelo de Sensibilidade de Potência (**MSP**). As condições iniciais para a realização dos ensaios estão listadas no Apêndice G. Os testes com esse sistema visam comparar os resultados do modelo não linear (**BNP**) com o linearizado (**MSP**).

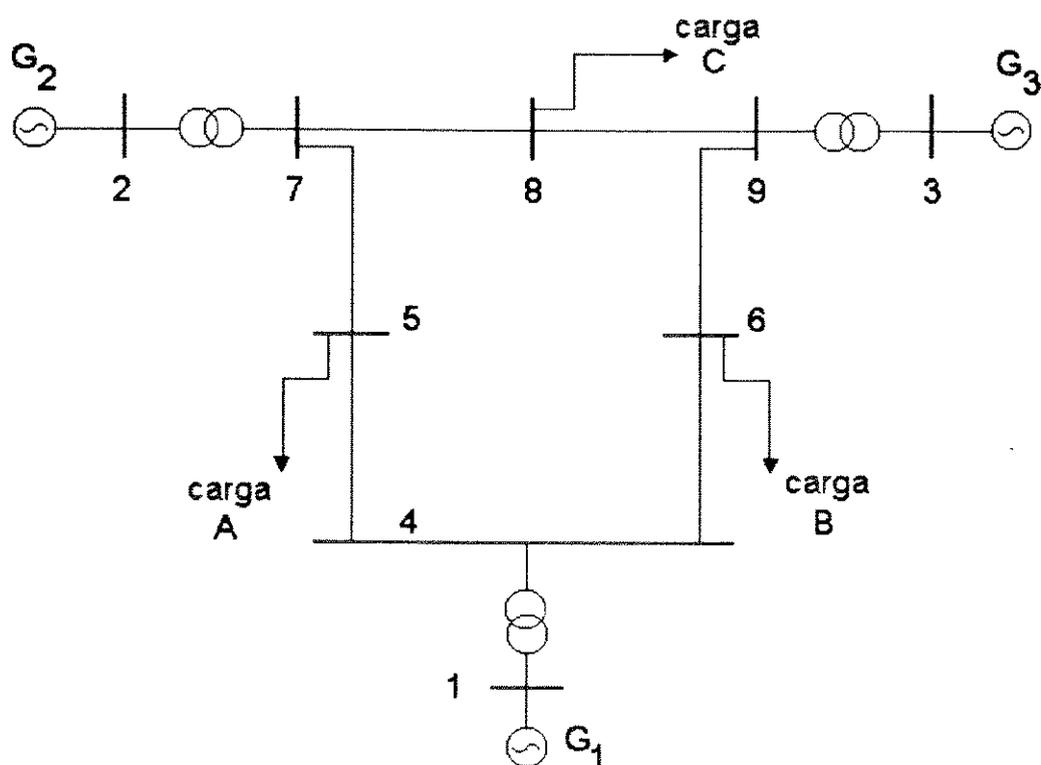


Figura 4.2 - Sistema II

Métodos de Solução Aplicados nas Simulações

a) Dommel&Sato

As simulações realizadas com esta formulação tiveram como objetivo servir de padrão de comparação com as demais formulações. Foi escolhido o método **alternado normal**, onde as equações algébricas e diferenciais são resolvidas separadamente e, a cada passo de integração, o processo de solução do fluxo de carga (FC) é resolvido até a convergência segundo um critério pré-fixado.

Conforme descrito no item 2.4 e esquematicamente indicado na figura 2.4, a convergência do FC tem sido tradicionalmente feita através da comparação da tensão terminal V_i entre duas iterações sucessivas. Convém salientar que a comparação é feita apenas nas barras onde as injeções de corrente são funções da tensão terminal, como é o caso dos geradores. Esse procedimento também deve ser adotado quando as cargas forem representadas por equações, funções da respectiva tensão terminal. Simulações envolvendo cargas podem seguir as recomendações expostas no item 3.3 onde, por hipótese e a cada passo de integração, as cargas mantêm-se constantes e com valores dependentes da tensão e frequência do passo anterior. Nesse esquema, o processo iterativo de solução do FC indicado na figura 2.4 envolve apenas as injeções de corrente dos geradores, pois as injeções de corrente das cargas permanecem constantes durante a convergência.

Para que as curvas obtidas nas simulações Dommel-Sato e BNP possam ser comparadas, a convergência do FC da formulação Dommel foi alterada de ΔV_g , $\Delta \theta_g$ para ΔP_g , ΔQ_g , respectivamente tensões terminais nas barras dos geradores e potências dos geradores entre duas iterações sucessivas. A convergência na malha das equações diferenciais (ED) continua sendo feita sobre ΔE_q e $\Delta \delta$.

b) BNP :

O algoritmo adotado para solução das equações algébricas teve por base o esquema de solução do FC desacoplado, através da consideração apenas das submatrizes H e L da matriz Jacobiana. Com a opção pelo processo de solução Newton-modificado, os valores dessas submatrizes permanecerão constantes durante todo o processo de simulação e calculadas utilizando-se as condições iniciais do sistema, antes da perturbação. Com esse critério foi possível obter não somente o estado do sistema na condição pós-perturbação, como também todos os estados correspondentes a cada passo de integração.

Conforme citado no item 3.2, a maneira como as cargas participam do processo de solução depende em parte da complexidade das equações que descrevem seu modelo. Cargas com equações facilmente diferenciáveis nas variáveis V participam na formação dos elementos diagonais das submatrizes da Jacobiana e, portanto, em nada diferem do tratamento dado aos geradores. Neste caso, a cada iteração as injeções de potência das cargas são atualizadas em consequência das novas variáveis de estado do sistema.

O mesmo critério adotado para as cargas nas simulações Dommel pode ser aplicado na simulação BNP, ou seja, são consideradas constantes durante cada passo de integração e por conseguinte não sofrem os efeitos decorrentes das iterações que ocorrem a cada ciclo de convergência. A contribuição das cargas (potência ativa e reativa) é atualizada ao final de cada passo de integração, através da substituição das novas variáveis de estado do sistema nas equações que descrevem o modelo das cargas. Neste tipo de consideração, as cargas não participam dos elementos diagonais das submatrizes da Jacobiana.

Das várias possibilidades de solução empregando a formulação **BNP** com FC desacoplado, foram escolhidas e simuladas apenas três delas:

- a primeira adota o esquema **alternado normal**, onde as equações algébricas e diferenciais são resolvidas separadamente. A convergência é feita sobre ΔP , ΔQ durante a solução do **FC** e sobre $\Delta E'_q$, $\Delta \delta$ na malha das equações diferenciais (**ED**).
- a segunda alternativa mantém o esquema **alternado normal**, porém a convergência nas equações diferenciais é substituída, passando de $\Delta E'_q$, $\Delta \delta$ para $\Delta P'_g$ e $\Delta Q'_g$. Convém mais uma vez enfatizar que a comparação das potências entre duas iterações sucessivas (v e $v+1$), faz uso do índice "g" para realçar que, nas simulações em questão, apenas as equações dos geradores participam do teste de convergência; as cargas permanecem constantes durante cada ciclo de integração.
- a terceira e última alternativa escolhida para testar a viabilidade da formulação **BNP** consiste no método **entrelaçado** e convergência apenas em $\Delta P'_g$ e $\Delta Q'_g$. No método entrelaçado apesar de continuar existindo a estrutura de solução do FC desacoplado, não é necessário resolvê-lo até a convergência. A cada passo de integração a solução do sistema será garantida pela convergência das injeções de potência, que no caso continua sendo apenas dos geradores devido aos motivos expostos anteriormente.

Qualquer que seja a formulação ou método de solução empregado nos instantes de uma perturbação, ou seja nas descontinuidades, por hipótese, apenas a rede responde rapidamente. Devido à inércia das máquinas, ao princípio do fluxo constante e às constantes de tempo do sistema de excitação, os valores de δ , E'_q e E_{FD} mantêm-se inalterados nestes instantes.

□ Estratégias de Simulação

A seguir serão feitas simulações com a finalidade de determinar a sensibilidade que cada formulação apresenta perante diferentes valores para as tolerâncias das convergências do fluxo de carga (FC) e equações diferenciais (ED), e diferentes valores para os passos de integração (h). A estratégia adotada para verificar para qual das tolerâncias (FC ou ED) o processo é mais sensível, consistirá em manter constante uma delas e variar a outra.

Para reduzir o número de simulações as tolerâncias das convergências FC e ED serão variadas de 10^{-5} a 10^{-1} na razão de 10^{-1} , e os passos de integração simulados com 10^{-3} e 10^{-2} .

Convém salientar que tolerância do $FC \leq 10^{-5}$ significa $\Delta P \leq 10^{-5}$ pu e $\Delta Q \leq 10^{-5}$ pu. Da mesma forma, tolerância das $ED \leq 10^{-5}$ significa $\Delta E_q \leq 10^{-5}$ pu e $\Delta \delta \leq 10^{-5}$ rd.

A utilização dos mesmos critérios de simulação para cada uma das técnicas de solução permitirá obter conjuntos de curvas comparáveis entre si. Esse modo de proceder, juntamente com a definição de uma curva “padrão” que será considerada como a solução desejada, formarão as bases para estabelecer a eficiência e eficácia destas técnicas.

As curvas obtidas referem-se à variação do ângulo de carga δ do gerador em função do tempo de simulação. Embora não esteja indicado nos gráficos, deve-se considerar o tempo (segundos) nas abscissas e $\Delta \delta = \delta - \delta_0$ (radianos) nas ordenadas, sendo δ_0 o valor do ângulo de carga na condição inicial ou seja, na condição pré-perturbação.

4.3 Teste do Sistema I Caso A - Estável

Neste teste a perturbação é um degrau (em pu) de potência mecânica no acionamento do gerador conforme indicado na tabela 4.1, e a resposta é a oscilação angular do rotor.

□ Simulação Dommel&Sato

a) Efeito do passo de integração

As simulações indicadas na figura 4.3 tiveram como propósito verificar a influência do passo de integração na solução com tolerância apertada (10^{-5}) no **FC** e **ED**. No caso em estudo verifica-se pequena diferença entre as curvas, mesmo para passo $h=10^{-2}$.

b) Sensibilidade às tolerâncias do **FC** e **ED**

b.1) Mantendo a tolerância do **FC** igual à tolerância das **ED**, a figura 4.4 mostra o efeito de relaxar o critério de convergência ao variar seus valores de 10^{-5} a 10^{-1} , porém mantendo o passo de integração igual a $h=10^{-2}$.

b.2) Os efeitos causados por diferentes valores para a tolerância das equações diferenciais (**ED**) encontram-se na figura 4.5. As simulações foram realizadas com 10^{-5} para a tolerância do **FC** e variando a tolerância das **ED** conforme indicado nas curvas. Notar a alta sensibilidade à tolerância das **ED**.

b.3) A figura 4.6 mostra o efeito causado por diferentes valores para a tolerância do **FC**, mantendo constante e igual a 10^{-5} o valor da tolerância das **ED**. Notar a baixa sensibilidade à tolerância do **FC**.

c) Sensibilidade ao passo de integração

Variando conjuntamente os valores para as tolerâncias **FC** e **ED**, a figura 4.7 mostra o efeito resultante com passo $h=10^{-3}$. A sensibilidade ao passo de integração pode ser comprovado pela comparação com a figura 4.4, ou seja, menores passos de integração leva a soluções mais precisas e menos sensíveis à tolerância.

d) Observações : A formulação Dommel&Sato, alternado normal, :

d.1) apresenta soluções praticamente iguais (fig. 4.3) para pequenas tolerâncias de **FC** e **ED** (10^{-5}), independente do passo de integração ($h=10^{-4}$ a 10^{-2});

d.2) apresenta soluções praticamente iguais (fig. 4.7) ao se utilizar pequenos passos de integração (10^{-3}), independente das tolerâncias de **FC** e **ED**;

d.3) para maiores passos de integração (10^{-2}) as soluções são sensíveis às tolerâncias do **FC** e **ED** (fig. 4.4), sendo mais sensíveis à tolerância das **ED** (fig. 4.5 e 4.6);

d.4) um bom compromisso resulta adotando-se 10^{-3} para as tolerâncias **FC** e **ED**, e 10^{-3} para o passo de integração. Por essa razão esses valores serão escolhidos como **padrão** comparativo para as demais simulações.

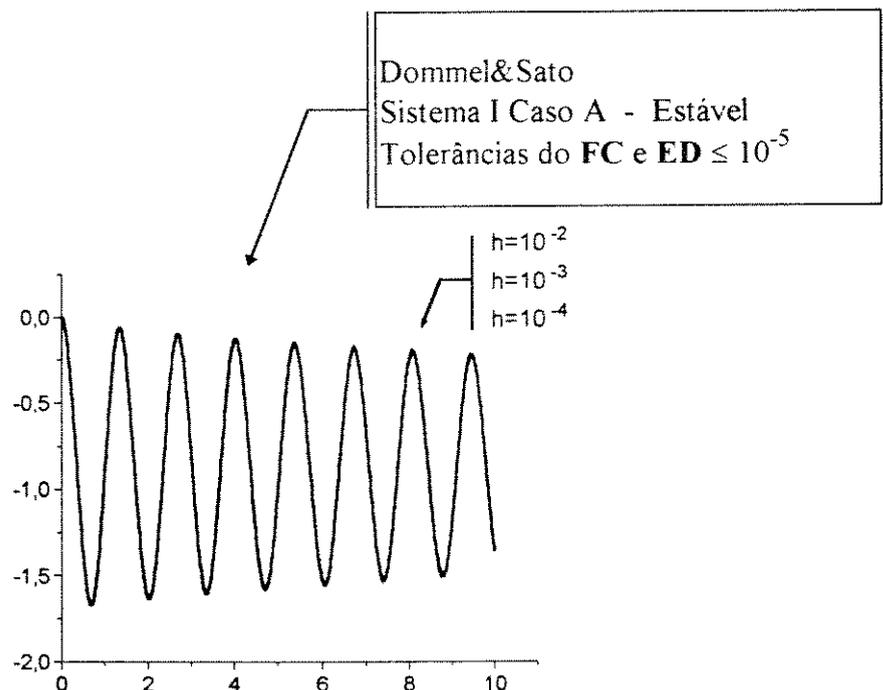
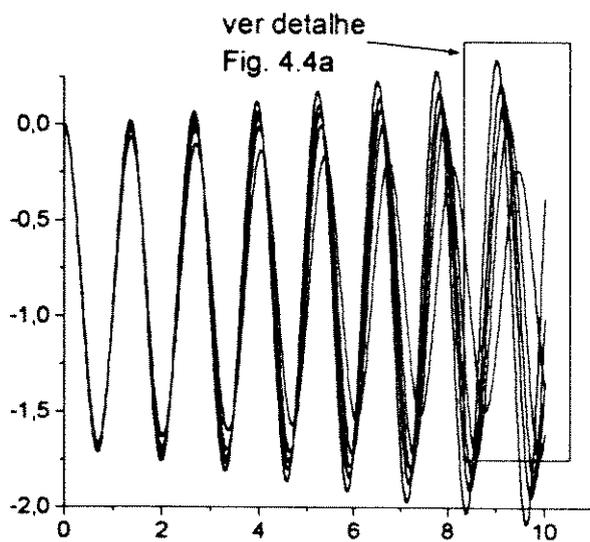


Figura 4.3



Dommel&Sato
 Sistema I Caso A - Estável
 Tolerâncias iguais para FC e ED
 Passo $h=10^{-2}$

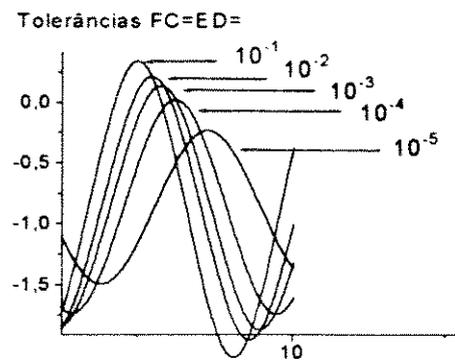
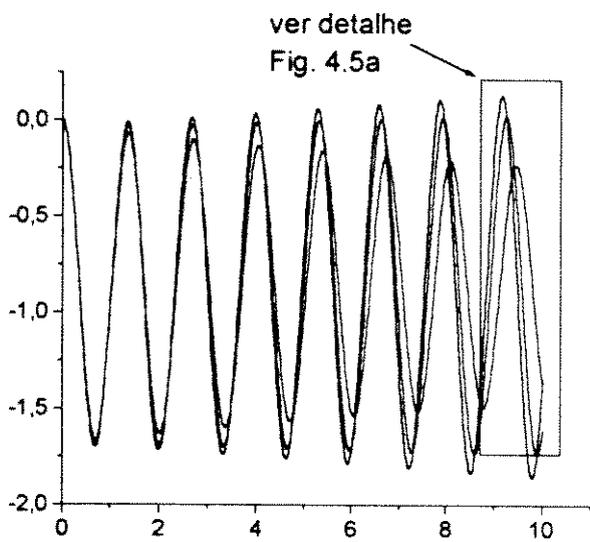


Figura 4.4 - Sensibilidade às tolerâncias de FC e ED

Figura 4.4a



Dommel&Sato
 Sistema I Caso A - Estável
 Tolerância do FC $\leq 10^{-5}$
 Passo $h = 10^{-2}$

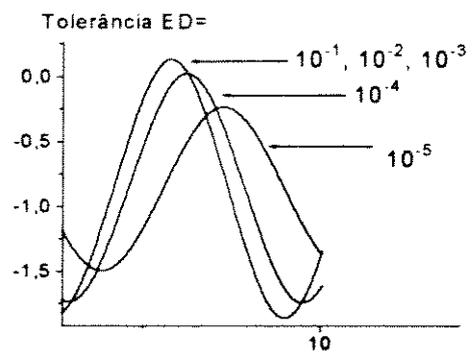


Figura 4.5 - Sensibilidade às tolerâncias de ED

Figura 4.5a

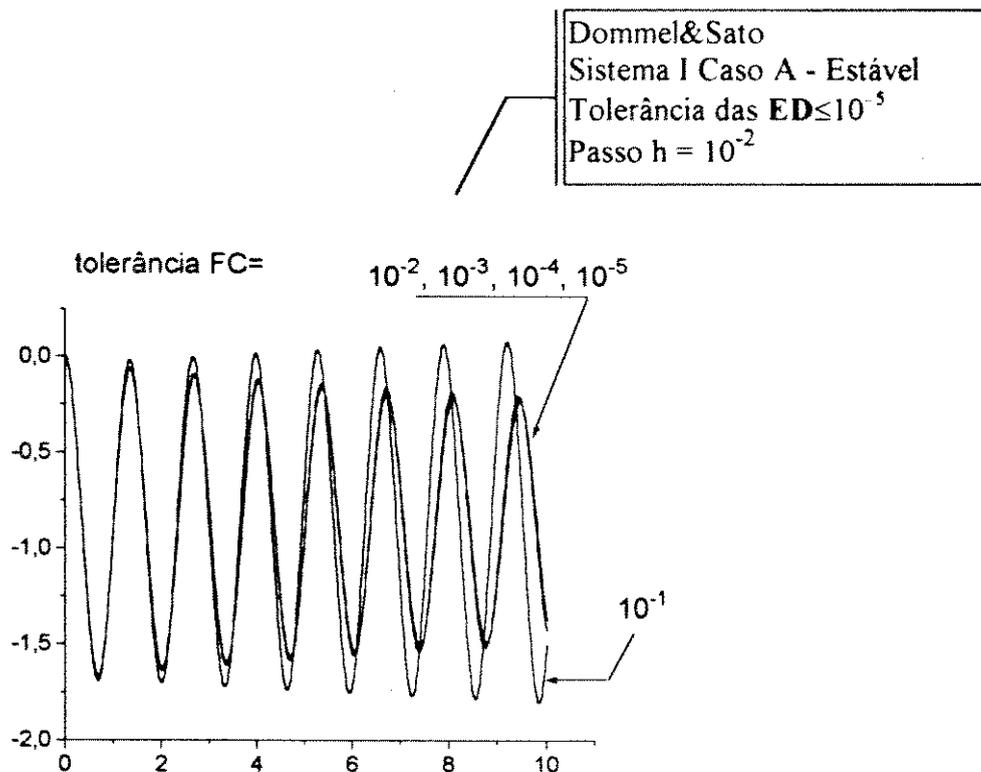


Figura 4.6 Sensibilidade às tolerâncias do FC

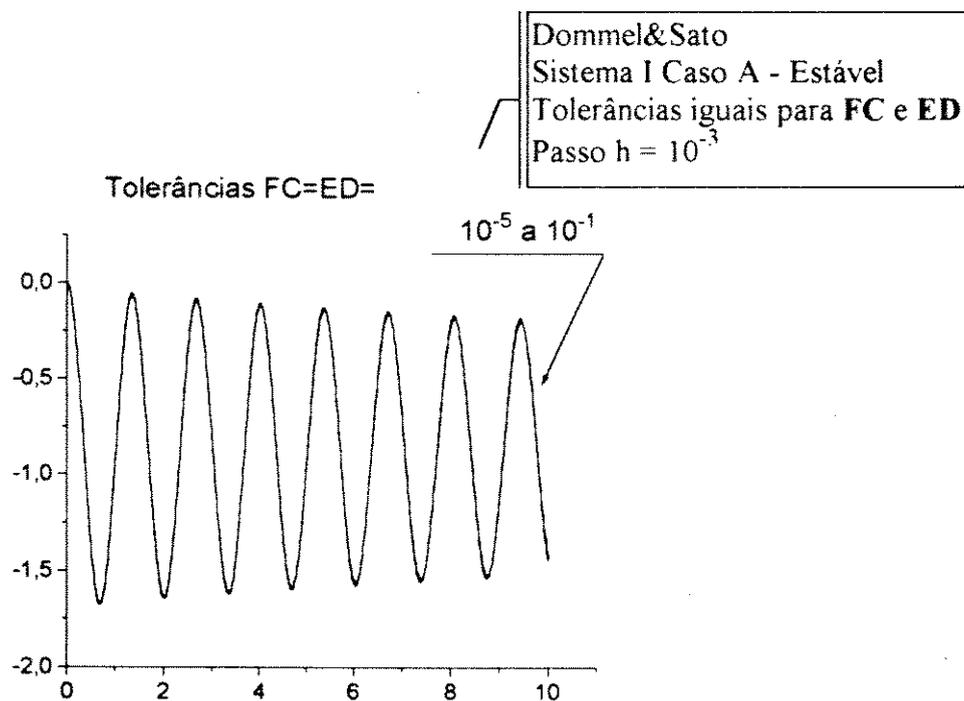


Figura 4.7 Sensibilidade ao passo de integração ($h = 10^{-3}$)

□ Simulação BNP Desacoplado, Alternado Normal

Em todas as figuras seguintes aparece a curva padrão obtida pelo processo Dommel.

a) Sensibilidade às tolerâncias do FC e ED

a.1) A figura 4.8 mostra o efeito do relaxamento do critério de convergência, semelhante às condições da simulação Dommel&Sato da figura 4.4. com passo $h=10^{-2}$. Comparando as duas figuras, o processo **BNP** tende a aglutinar as curvas e estreitar a envoltória do conjunto de curvas. Porém, diferente do processo Dommel, o **BNP** com $h=10^{-2}$ não apresenta a tendência de soluções mais precisas à medida que as tolerâncias diminuem. Valores grandes para a tolerância (10^{-1}) exercem forte influência no resultado, acarretando maior amortecimento.

a.2) Mantendo constante a tolerância do **FC**, a figura 4.9 mostra o efeito causado pela variação da tolerância de **ED**. Comparando com o processo Dommel (figura 4.5), o **BNP** (figura 4.9) tende a aglutinar as curvas, mantendo um erro devido ao passo $h=10^{-2}$.

a.3) Com a tolerância **ED** constante e variando a tolerância do **FC**, a figura 4.10 comparada com a figura 4.9 mostra que o **BNP** é mais sensível às tolerâncias das **ED**, introduzindo amortecimento para tolerâncias $\geq 10^{-2}$ pu.

b) Sensibilidade ao passo de integração

Comparando as figuras 4.7 e 4.11, observa-se que para passos de integração da ordem de $h=10^{-3}$ o **BNP alternado normal** continua apresentando amortecimento para tolerâncias grandes (10^{-1} no **FC** e **ED**).

c) Número de iterações do FC e ED

c.1) Nas figuras 4.12 e 4.13 estão representados o número de iterações do **FC** e **ED** dos processos **Dommel** e **BNP** alternado normal, simulados com passo de integração $h=10^{-2}$ e tolerâncias $\leq 10^{-5}$ para **FC** e **ED**. A figura 4.13a registra o total acumulado do número de iterações em função do tempo. O número total de iterações a cada passo é obtido pelo produto do número de iterações da malha do **FC** pelo número de iterações da malha das **ED**. Para as condições de passo de integração e tolerâncias acima referidas, o tempo de simulação foi de 10,38 segundos para o **Dommel** e 8,90 segundos para o **BNP**.

c.2) Testes complementares realizados com $h=10^{-3}$ e tolerâncias $\leq 10^{-5}$ indicaram uma troca na posição relativa das curvas nas figuras 4.12, 4.13 e 4.13a, ou seja, para exemplificar utilizando a figura 4.12, com $h=10^{-3}$ o acumulado **BNP** fica acima da curva acumulada **Dommel**. Mesmo assim, a vantagem do tempo de simulação recai sobre o **BNP** (46,46 seg.), contra 56,73 segundos do **Dommel**.

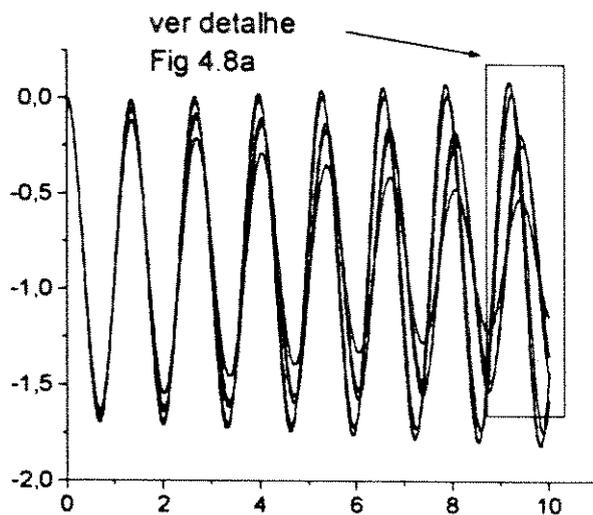


Figura 4.8 Sensibilidade às tolerâncias de **FC** e **ED**

Formulação BNP desacoplado,
alternado normal
Sistema I Caso A - Estável
Tolerâncias iguais para FC e ED
Passo $h = 10^{-2}$

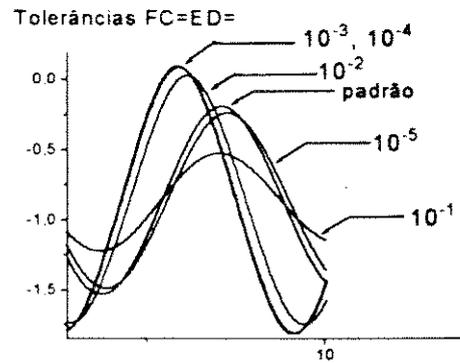


Figura 4.8a

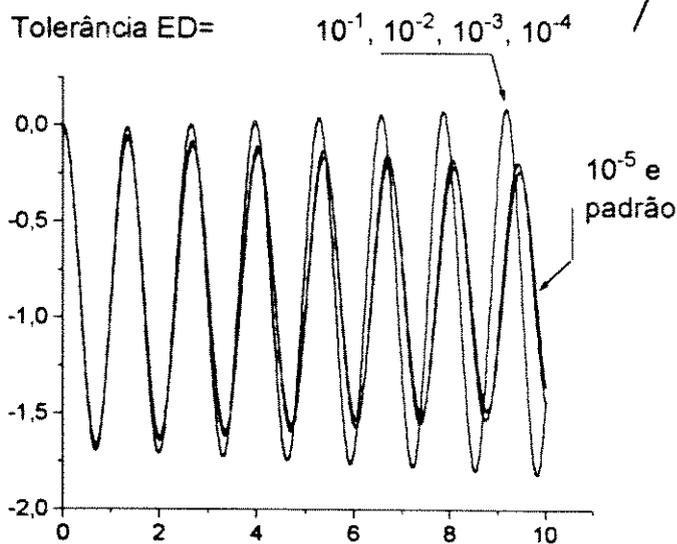


Figura 4.9 Sensibilidade às tolerâncias das **ED**

Formulação BNP desacoplado,
alternado normal
Sistema I Caso A - Estável
Tolerância do FC $\leq 10^{-5}$
Passo $h = 10^{-2}$

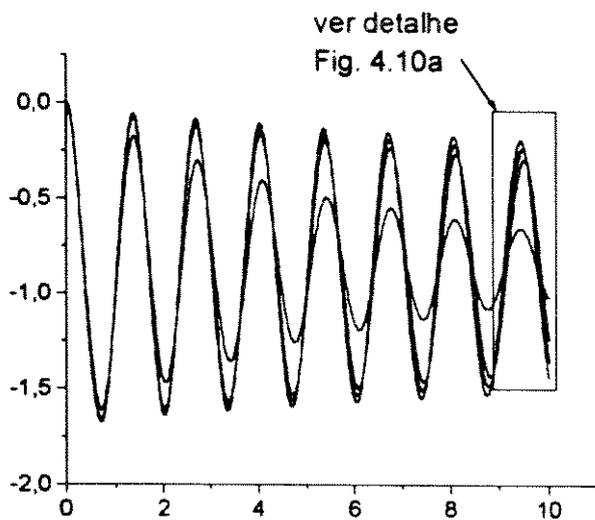


Figura 4.10 Sensibilidade às tolerâncias do FC

Formulação BNP desacoplado,
alternado normal
Sistema I Caso A - Estável
Tolerância das ED $\leq 10^{-5}$
passo $h = 10^{-2}$

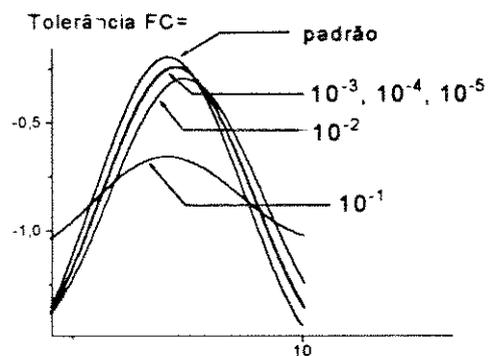


Figura 4.10a

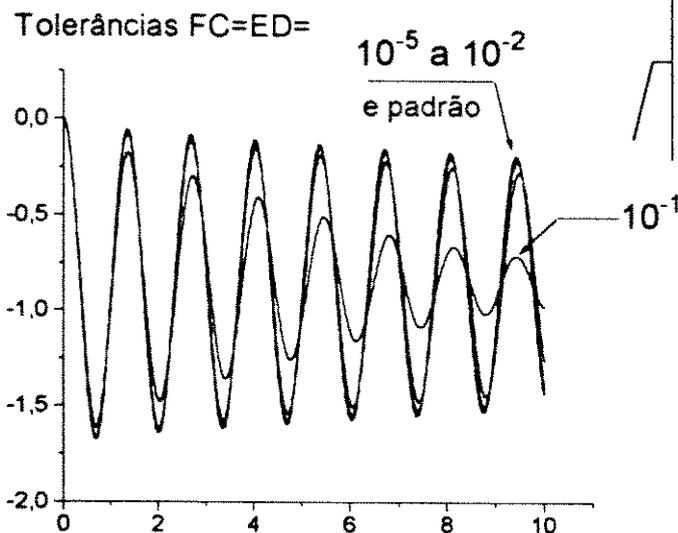


Figura 4.11 Sensibilidade ao passo de integração ($h=10^{-3}$)

Formulação BNP desacoplado,
alternado normal
Sistema I Caso A - Estável
Tolerâncias iguais para FC e ED
 $h = 10^{-3}$

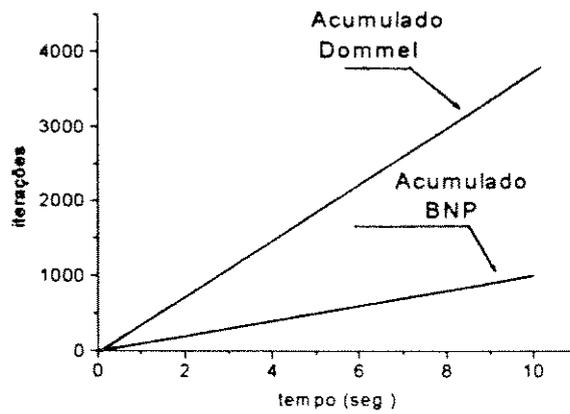


Figura 4.12 Acumulado do número de iterações das equações ALGÉBRICAS

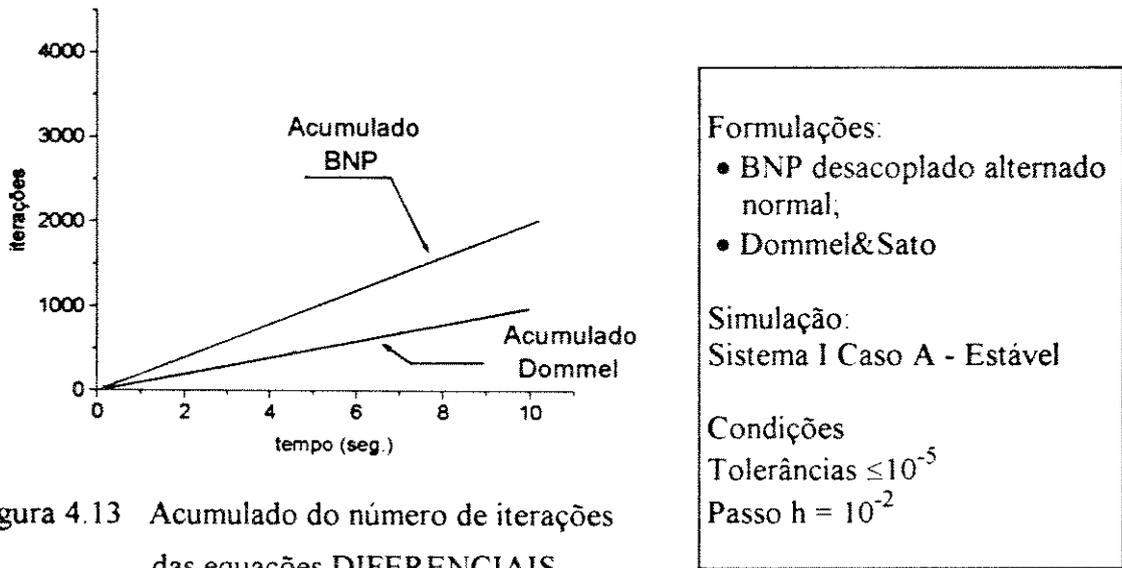


Figura 4.13 Acumulado do número de iterações das equações DIFERENCIAIS

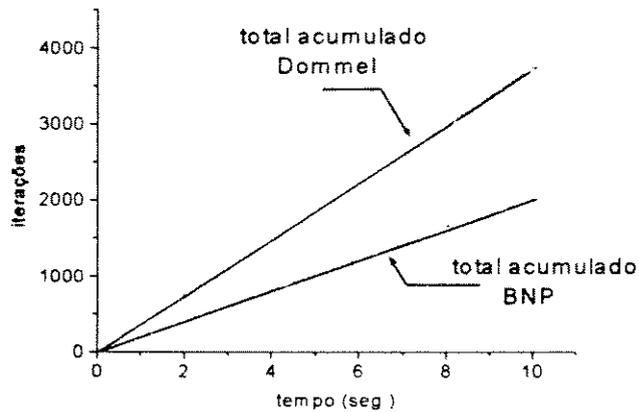


Figura 4.13a Número de iterações total acumulado

c.3) Testes realizados com a condição $h=10^{-3}$ e tolerâncias $\leq 10^{-3}$ apresentaram o mesmo resultado conforme descrito no item c.2 acima, porém apresentando os seguintes tempos de simulação: **BNP** (20,54 seg.), **Dommel** (28,56 seg.).

c.4) As figuras 4.14 e 4.15 mostram que a diferença no número de iterações entre os dois processos pode ser explicada pela forma de solução do **FC**: enquanto que no **Dommel** a solução é do tipo relaxação ($I=YV$), no **BNP** é do tipo gradiente pelo uso do método Newton-Raphson modificado (com Jacobiana constante).

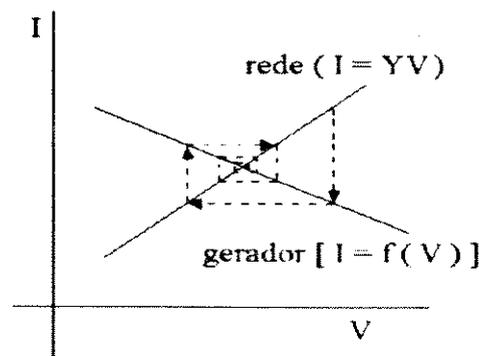


Figura 4.14 - Convergência do
FC (Dommel)

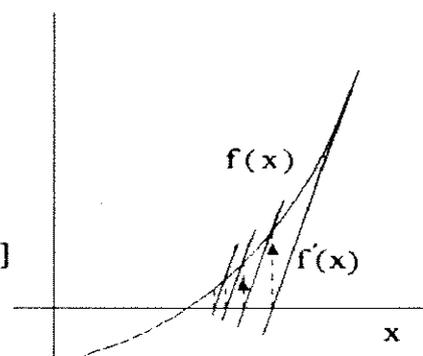


Figura 4.15 - Convergência do
FC (BNP)

Embora o método adotado para solução das **ED** seja o mesmo (trapezoidal) para ambas as formulações, o número de iterações em cada passo é diferente devido às diferentes soluções parciais do **FC** entre cada ciclo de iterações das **ED**.

d) Observações: Na formulação **BNP**, desacoplado, alternado normal, tem-se que:

d.1). Segundo as figuras 4.8 e 4.11, menores passos de integração ($h=10^{-3}$) melhoram a solução, exceto para tolerâncias da ordem de 10^{-1} , cujas oscilações aparecem amortecidas.

d.2) Para maiores passos de integração (10^{-2}) as soluções são sensíveis às tolerâncias do **FC** e **ED** (figura 4.8), sendo particularmente sensíveis à tolerância das **ED** (figura 4.9 e 4.10).

d.3) Os testes do item c indicam que com maiores passos de integração (10^{-2}) o processo **BNP** apresenta menor número de iterações que o **Dommel**. Porém, nos casos simulados ($h=10^{-3}$), mesmo que o número de iterações do **BNP** seja maior, o tempo de simulação ainda é menor que o **Dommel**.

□ **Simulação BNP Desacoplado, Alternado Normal com Tolerâncias ΔP_g e ΔQ_g nas ED.**

Como a sensibilidade maior está na tolerância das ED, foi testada a convergência sobre ΔP_g e ΔQ_g na solução das ED em lugar de $\Delta E'_q$ e $\Delta \delta$. Com o objetivo de comparação, a curva padrão obtida pelo processo Dommel está indicada em todas as figuras seguintes:

a) Sensibilidade às tolerâncias do FC e ED

a.1) Comparando a figura 4.16 com as figuras 4.4 e 4.8 obtidas nas mesmas condições de tolerâncias e passo h , observa-se a superioridade deste novo processo comparado aos dois processos anteriores. Porém continua existindo o problema causado por tolerâncias da ordem de 10^{-1} ;

a.2) A figura 4.17 mostra a sensibilidade às tolerâncias ED. A tolerância do FC foi mantida constante e igual a $\leq 10^{-5}$, ou seja, adotando-se as mesmas condições das figuras 4.5 (Dommel) e 4.9 (BNP normal). Comparado com a formulação Dommel, este processo é menos sensível às tolerâncias ED;

a.3) A figura 4.18 mostra a sensibilidade à tolerância do FC. A tolerância das ED foi mantida constante e igual a 10^{-5} e o passo de integração $h=10^{-2}$. Comparando com as figuras 4.6 (Dommel) e 4.10 (BNP normal), obtidas nas mesmas condições, observa-se a mesma insensibilidade às tolerâncias FC, exceto para a tolerância 10^{-1} , que introduz amortecimento.

b) Sensibilidade ao passo de integração

A figura 4.19 mostra o mesmo resultado da figura 4.11 referente ao processo BNP do item anterior.

c) Observações : Na formulação BNP com convergência em ΔP_g e ΔQ_g nas ED tem-se que :

c.1) Comparando as figuras 4.16 e 4.19 obtidas respectivamente com passos de integração 10^{-3} e 10^{-2} as soluções são praticamente iguais à solução padrão, com excessão da tolerância 10^{-1} ;

c.2) Comparando as figuras 4.16 e 4.8 observa-se que a utilização das tolerâncias ΔP_g e ΔQ_g na malha das equações diferenciais, melhora sensivelmente o resultado;

c.3) Para altas tolerâncias (10^{-1}) continua ocorrendo amortecimento excessivo das oscilações.

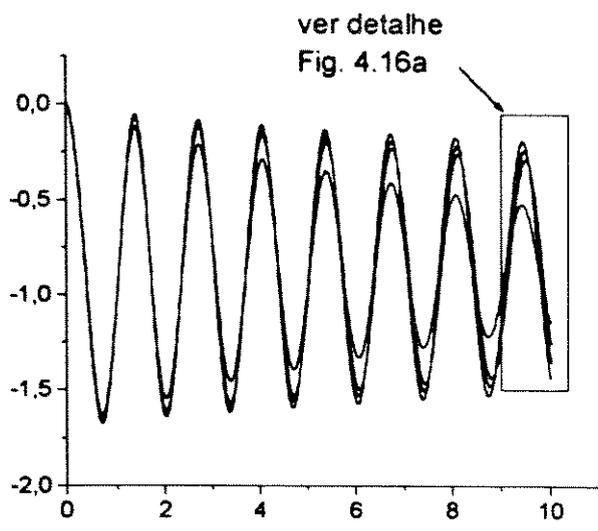


Figura 4.16 Tolerâncias iguais para FC e ED

Formulação BNP desacoplado
alternado normal
Sistema I Caso A - Estável
Tolerâncias ΔP_g e ΔQ_g nas ED
Tolerâncias iguais para FC e ED
Passo $h = 10^{-2}$

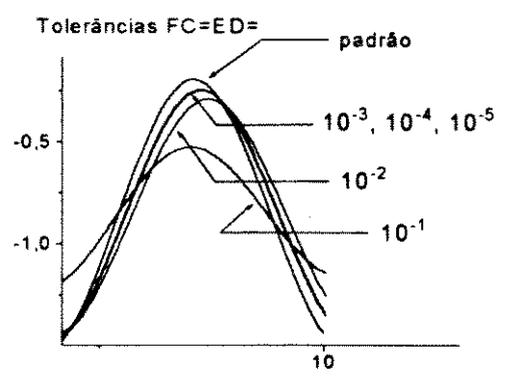


Figura 4.16a

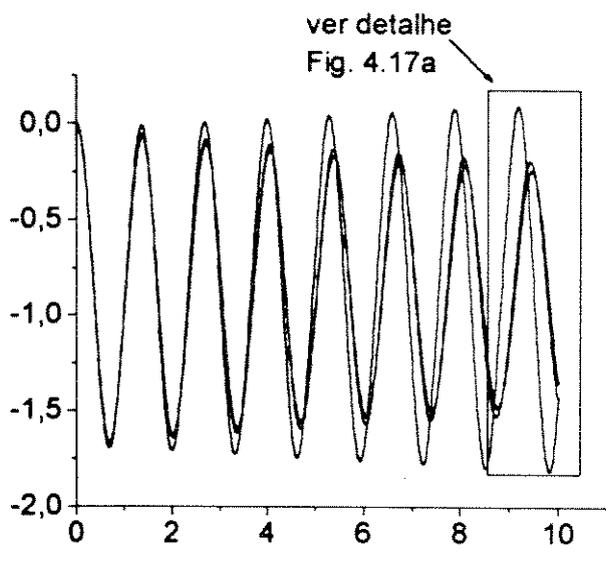


Figura 4.17 Sensibilidade às tolerâncias das ED

Formulação BNP desacoplado
alternado normal
Sistema I Caso A - Estável
Tolerâncias ΔP_g e ΔQ_g nas ED
Tolerâncias do FC $\leq 10^{-5}$
Passo $h = 10^{-2}$

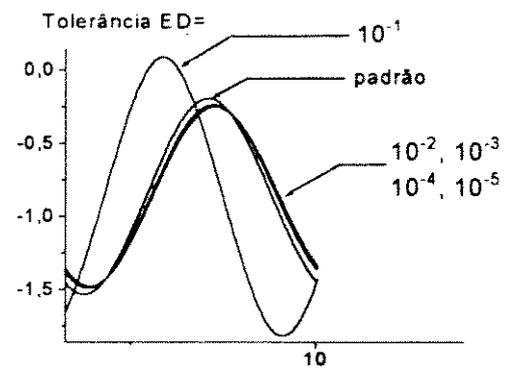


Figura 4.17a

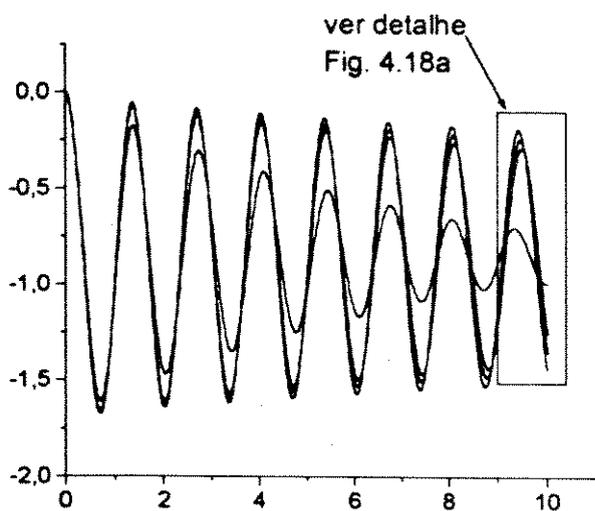


Figura 4.18 Sensibilidade às tolerâncias do FC

Formulação BNP desacoplado
alternado normal
Sistema I Caso A - Estável
Tolerâncias ΔP_g e ΔQ_g nas ED
Tolerâncias do ED $\leq 10^{-5}$
Passo $h = 10^{-2}$

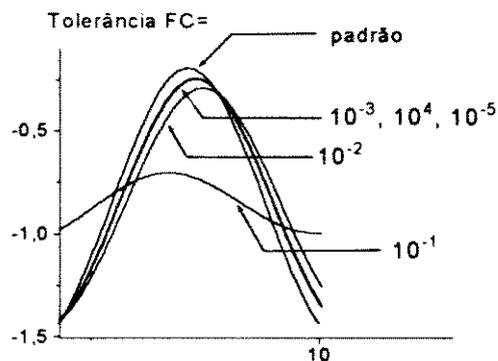


Figura 4.18a

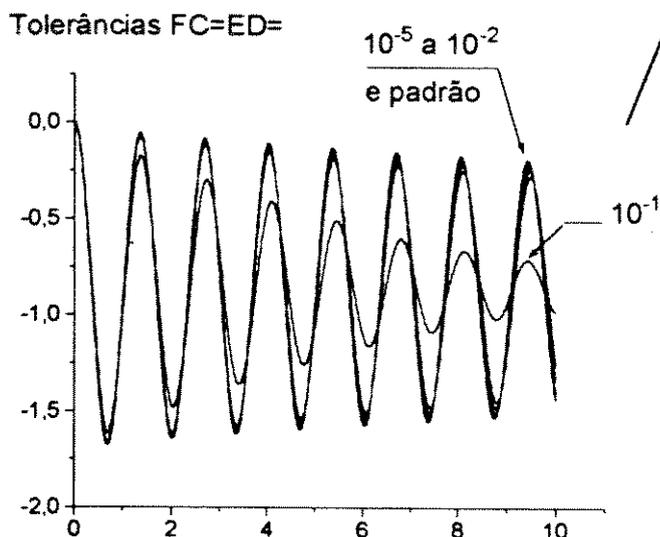


Figura 4.19 Sensibilidade ao passo de integração ($h=10^{-3}$)

Formulação BNP desacoplado
alternado normal
Sistema I Caso A - Estável
Tolerâncias ΔP_g e ΔQ_g nas ED
Tolerâncias iguais para FC e ED
Passo $h = 10^{-3}$

□ Simulação BNP, Desacoplado, Alternado Entrelaçado

Devido aos melhores resultados produzidos pela convergência em ΔP_g e ΔQ_g nas ED, testou-se o método entrelaçado, que consiste na solução alternada do FC e ED. No processo entrelaçado o FC não é resolvido até a convergência e, portanto, será analisado apenas a sensibilidade quanto ao passo de integração. Nas figuras aparece a curva padrão obtida pelo processo Dommel e o tempo de simulação de cada curva.

a) Sensibilidade ao passo de integração

Para o passo de integração $h=10^{-2}$, a solução (figura 4.20) difere da curva padrão apenas para a tolerância 10^{-2} . Essa diferença desaparece com o passo $h=10^{-3}$.

b) Observações : Na formulação BNP entrelaçado tem-se que :

b.1) Com exceção da tolerância 10^{-2} , o BNP entrelaçado com passo de integração $h=10^{-2}$ (figura 4.20) apresenta soluções praticamente coincidentes com a curva padrão. Com $h=10^{-3}$ todas as curvas são coincidentes (figura 4.21).

b.2) O BNP entrelaçado registrou tempo de simulação de 8,24 segundos nas condições de tolerância $\leq 10^{-5}$ e $h=10^{-2}$; e 23,67 segundos nas condições de tolerância $\leq 10^{-3}$ e passo $h=10^{-3}$. Dommel registrou respectivamente 10,38 segundos para as tolerâncias FC e ED $\leq 10^{-5}$ e $h=10^{-2}$, e 28,57 segundos para tolerâncias FC e ED $\leq 10^{-3}$ e $h=10^{-3}$ (curva padrão).

b.3) A tabela abaixo resume o tempo gasto na simulação do Caso A-Estável, utilizando cada um dos processos descritos até agora. O processo Dommel e as tres variantes do BNP desacoplado estão indicadas por:

- A : BNP alternado normal com tolerâncias $\Delta E_q, \Delta \delta$ nas ED;
- B : BNP alternado normal com tolerâncias $\Delta P_g, \Delta Q_g$ nas ED;
- C : BNP alternado entrelaçado.
- D : Dommel alternado normal

As simulações foram feitas com passos de integração $h=10^{-2}$, 10^{-3} e tolerâncias iguais para FC e ED ($\leq 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$). Os asteriscos indicados na tabela identificam as soluções diferentes da curva padrão (Dommel: $h=10^{-3}$, tolerâncias $\leq 10^{-3}$), conforme visto nas figuras das simulações.

Tabela 4.2 : Tempo de Simulação (segundos) Caso A - Estável

	Passo de integração $h=10^{-2}$					Passo de integração $h=10^{-3}$				
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
A	*	*	*	*	7,85	*	15,60	20,54	33,01	46,47
B	*	2,70	4,23	5,60	8,90	*	15,59	27,90	42,51	56,13
C	1,48	2,25	4,12	6,05	8,24	15,00	15,05	23,67	41,63	61,02
D	*	*	*	*	10,38	21,97	21,97	28,56	41,96	56,73

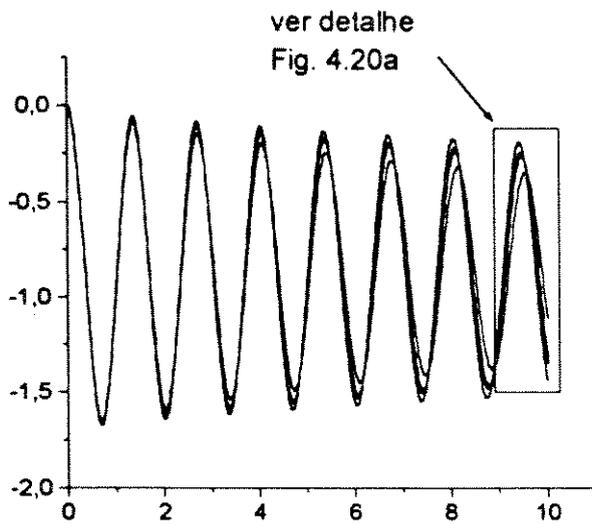


Figura 4.20 Sensibilidade às tolerâncias. ($h=10^{-2}$)

Formulação BNP desacoplado
entrelaçado;
Sistema I Caso A - Estável
Passo $h = 10^{-2}$
Obs.: entre parenteses está
indicado o tempo de simulação

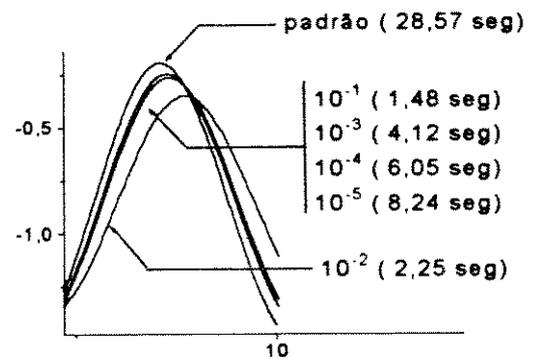


Figura 4.20a

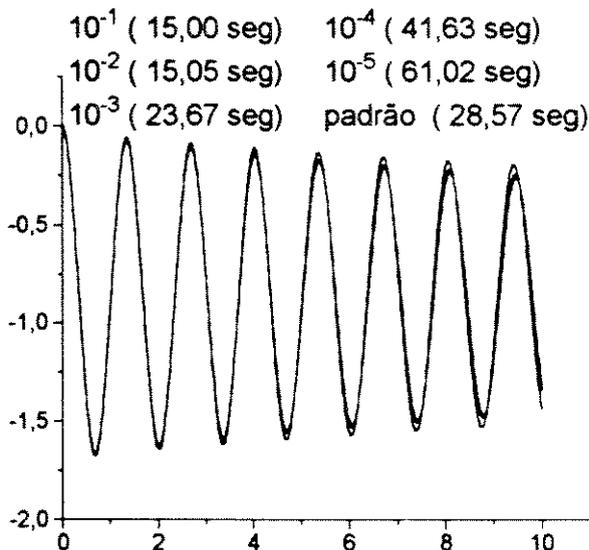


Figura 4.21 Sensibilidade às tolerâncias. ($h=10^{-3}$)

Formulação BNP desacoplado
entrelaçado;
Sistema I Caso A - Estável
Passo $h = 10^{-3}$
Obs.: entre parenteses está
indicado o tempo de simulação

4.4 Teste do Sistema I Caso B - Instável

Este teste visa demonstrar que mesmo no caso instável, o método **BNP** entrelaçado pode ser utilizado para estudos dinâmicos. Seu desempenho será comparado com o método **Dommel**, considerando a seqüência de ensaios similar ao caso estável.

□ Simulação Dommel&Sato

a) Efeito do passo de integração

No caso **Estável** (figura 4.3) visto anteriormente, as simulações realizadas com tolerâncias de **FC** e **ED** $\leq 10^{-5}$ e passos de integração $h=10^{-4}$, 10^{-3} e 10^{-2} conduziram a soluções praticamente coincidentes. Na simulação do sistema **Instável**, conforme a figura 4.22, cada passo de integração resulta numa curva diferente.

b) Sensibilidade às tolerâncias do **FC** e **ED**

b.1) Mantendo a tolerância do **FC** igual à tolerância das **ED**, a figura 4.23 mostra o efeito de relaxar o critério de convergência variando seus valores de 10^{-5} a 10^{-1} , porém mantendo o passo de integração igual a $h=10^{-2}$. Deve-se observar que no **Caso Instável** (figura 4.23) não se verifica a alteração das curvas num único sentido.

b.2) Os efeitos causados por diferentes valores das tolerâncias **ED** estão na figura 4.24. As simulações foram realizadas com $h=10^{-2}$ mantendo constante a tolerância $FC \leq 10^{-5}$, enquanto que a tolerância das **ED** varia de 10^{-5} a 10^{-1} . Aqui também se verifica que o posicionamento das curvas varia de acordo com as tolerâncias.

b.3) A figura 4.25 mostra o efeito causado por diferentes tolerâncias do **FC**, porém mantendo constante e igual a 10^{-5} a tolerância das **ED**, e passo de integração $h=10^{-2}$.

c) Sensibilidade ao passo de integração

c.1) Mantendo a tolerância do **FC** igual a das **ED**, porém variando seus valores de 10^{-5} a 10^{-1} e com $h=10^{-3}$, a figura 4.26 comparada com a figura 4.23 (obtida com $h=10^{-2}$) mostra o efeito da variação do passo de integração. Diferente do Caso Estável com passo $h=10^{-3}$ (figura 4.7) onde todas as curvas coincidem, a curva do Caso Instável, com o mesmo passo $h=10^{-3}$ e tolerâncias $\leq 10^{-5}$, está separada das demais curvas (figura 4.26).

c.2) Da mesma forma que no Caso Estável, um bom compromisso resulta adotando-se tolerâncias **FC** e **ED** $\leq 10^{-3}$ e passo de integração $h=10^{-3}$. Essa condição será escolhida como padrão de comparação para as demais simulações.

c.3) Testes complementares indicaram que a coincidência das curvas ocorre com passo $h=10^{-4}$, independente da tolerância. As curvas sobrepõem-se à curva padrão

d) Observações : A formulação Dommel&Sato, alternado normal, Caso Instável

d.1) Apresenta soluções ligeiramente diferentes (figura 4.22) ao se utilizar pequenas tolerâncias (10^{-5}) para **FC** e **ED** e passos de integração variando de 10^{-4} a 10^{-2} .

d.2) Apresenta soluções praticamente iguais (figura 4.22) com tolerâncias de 10^{-4} a 10^{-1} e passo $h=10^{-3}$.

d.3) Para passos de integração da ordem de 10^{-2} as soluções são sensíveis às tolerâncias do **FC** e **ED** (figura 4.23). Através da comparação das figuras 4.24 e 4.25 é difícil determinar para qual das tolerâncias (**FC** ou **ED**) o processo é mais sensível.

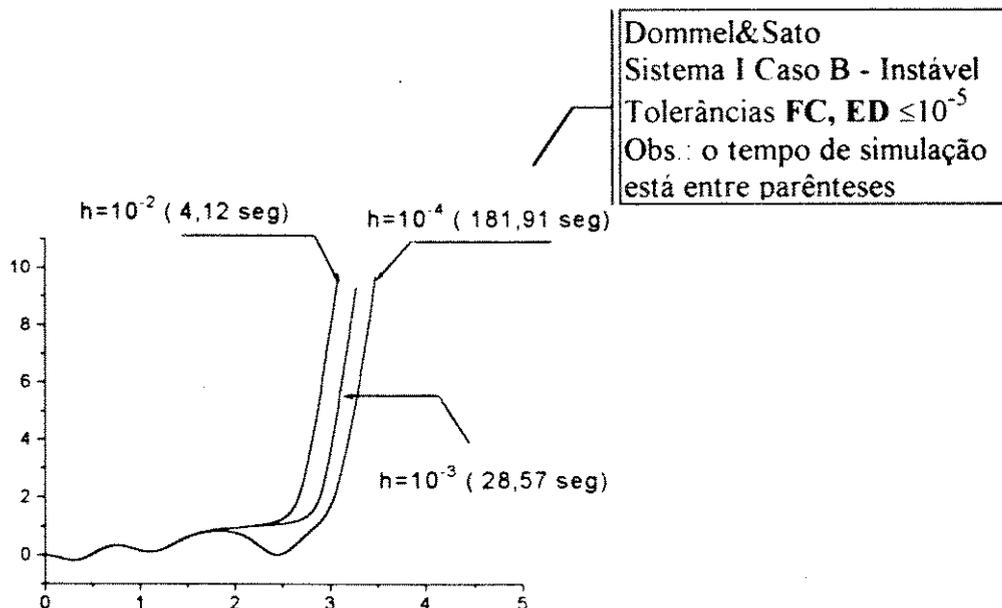


Figura 4.22 Sensibilidade ao passo h (**FC,ED** $\leq 10^{-5}$)

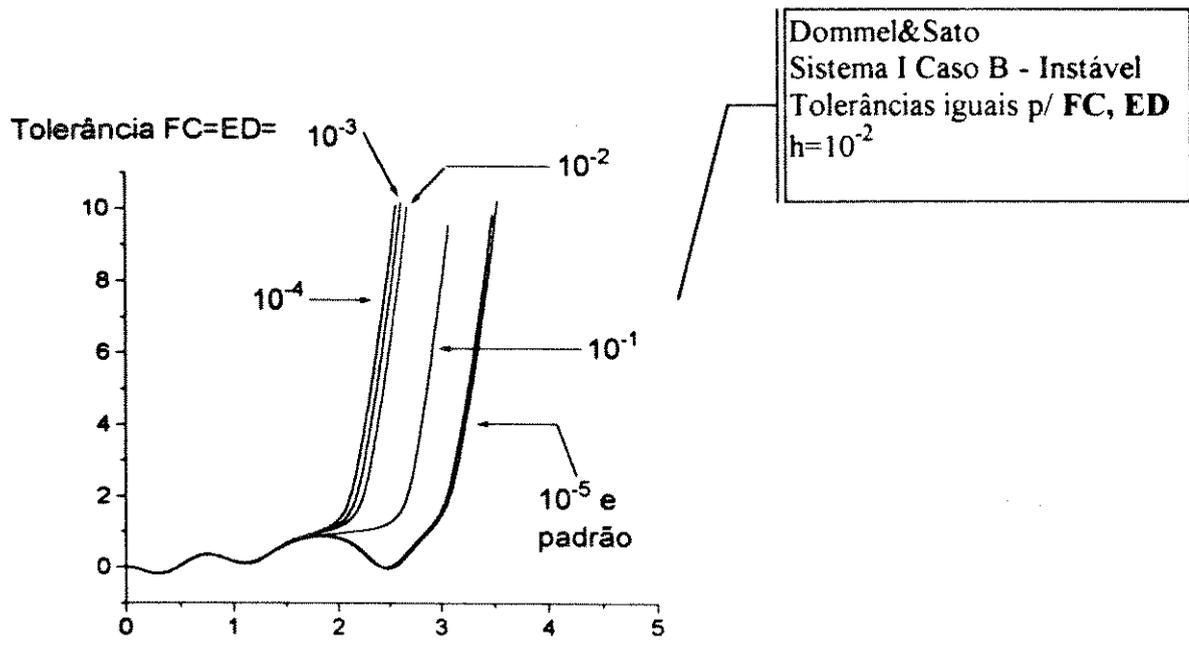


Figura 4.23 Sensibilidade às tolerâncias FC e ED

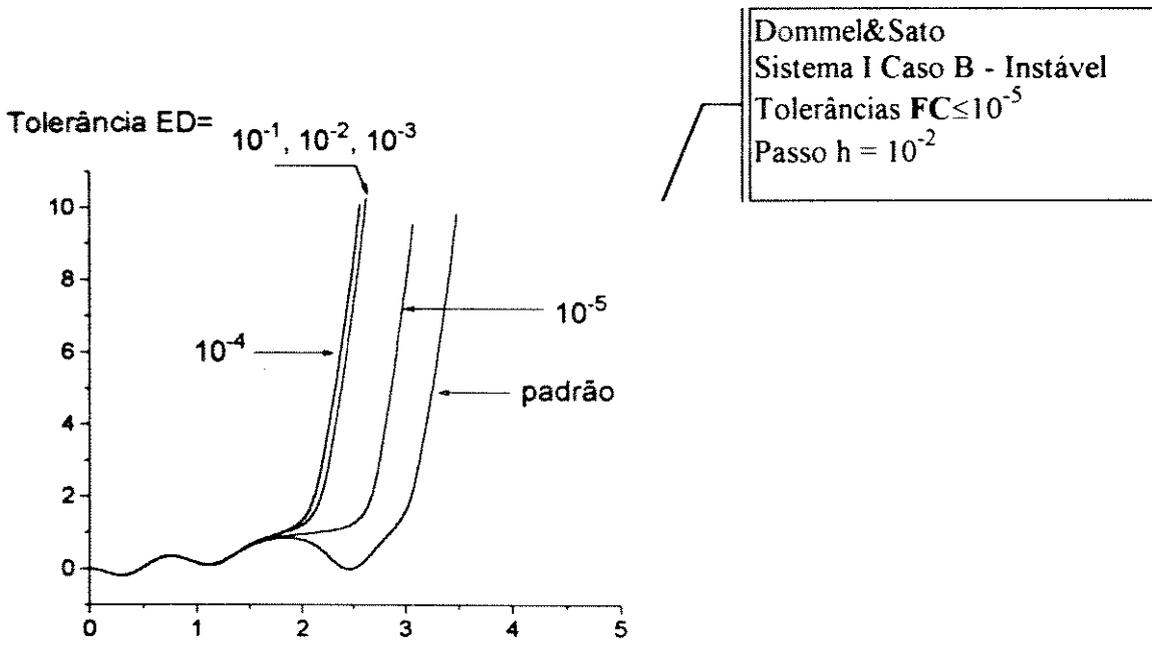


Figura 4.24 Sensibilidade às tolerâncias das ED

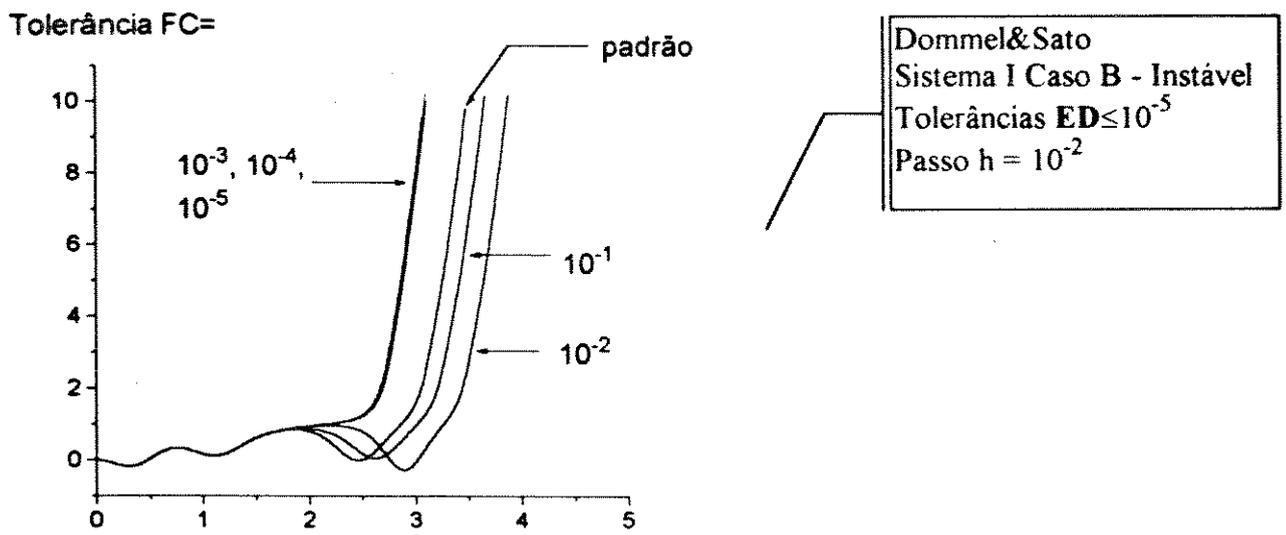


Figura 4.25 Sensibilidade às tolerâncias do FC

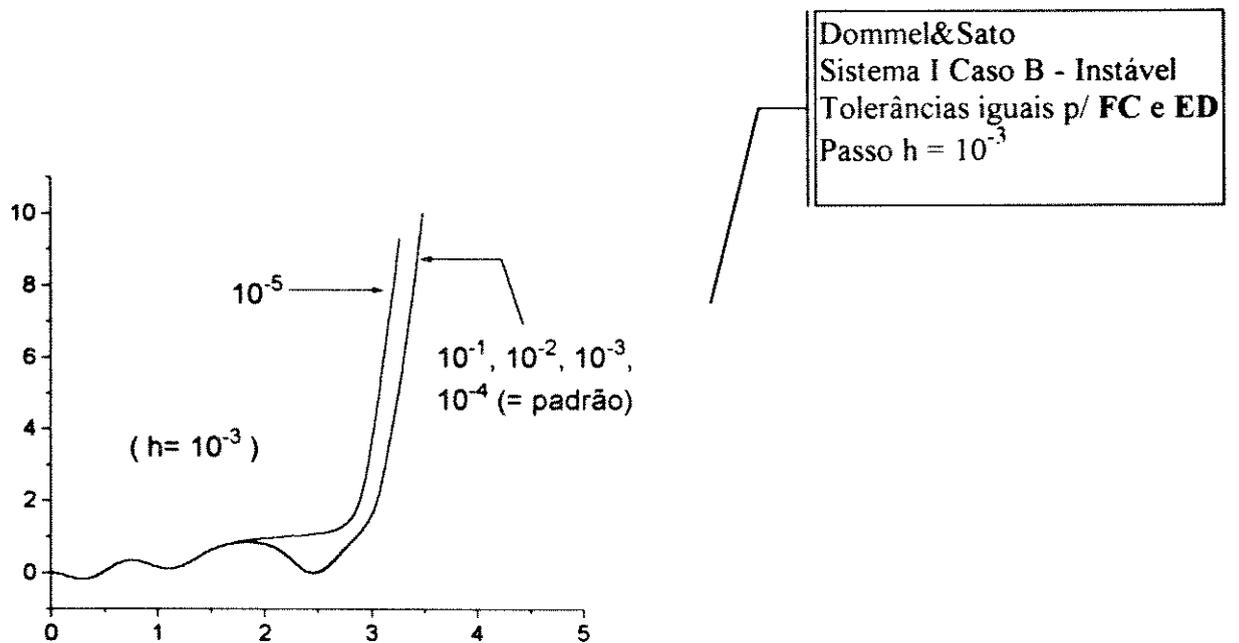


Figura 4.26 Sensibilidade ao passo de integração $h=10^{-3}$

□ Simulação BNP Desacoplado, Entrelaçado

Para o Caso **Instável**, a formulação **BNP** apresentou problema na convergência do **FC**. Verificou-se que o problema residia nas correções excessivas de ΔV e $\Delta \theta$ resultantes na solução do **FC**, inibindo o processo de simulação. Para corrigir essa distorção foi utilizado um fator de redução k , dividindo-se os valores de ΔV e $\Delta \theta$ calculados na etapa do **FC**, ou seja, os novos V e θ corrigidos serão dados pelas equações:

$$V^{v+1} = V^v + \frac{\Delta V}{k} \quad (4.1)$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \frac{\Delta \theta}{k} \quad (4.2)$$

Através de testes complementares verificou-se que o fator k deve ser aplicado durante todo o tempo de simulação. Sua supressão, em qualquer tempo, acarreta instabilidade numérica ("overflow") decorrente do mau condicionamento da matriz Jacobiana. O menor número inteiro encontrado para k , na simulação do Caso **Instável** em questão, é $k=3$. Para $k=2$ aparece o efeito ciclico na solução do **FC**. Por outro lado, altos valores de k , tais como $k=500$, acarretam aumento no tempo de simulação.

a) Sensibilidade ao passo

Com passo de integração $h=10^{-2}$ as curvas da figura 4.27 apresentam o mesmo resultado das curvas das figuras 4.19 (**Dommel**) e 4.23(**BNP normal**) ; exceto com a tolerância 10^{-1} , cujo desvio da solução é mais pronunciado. Com $h=10^{-3}$ as soluções praticamente independem da tolerância (figura 4.27).

b) Influência do fator de redução k

b.1) Na figura 4.28, além da curva padrão, estão indicadas duas curvas coincidentes, obtidas com fator de redução $k=3$ e 50 , tolerâncias= 10^{-5} e $h=10^{-2}$. Embora não estejam indicadas, simulações efetuadas com outros valores para o fator k demonstram a obtenção dos mesmos resultados, interferindo apenas no tempo de simulação.

b.2) A figura 4.29 mostra a influência de k no tempo de simulação, podendo-se observar a existência de um valor para k que resulta num tempo mínimo de simulação. A tabela 4.2 reproduz o resultado próximo à região do tempo mínimo.

Tabela 4.2 - Fator k versus tempo de simulação (segundos)

fator k	2,5	2,8	3,0	3,5	3,8	4,0	5,0
tempo (seg.)	Nota 1.	19,22	6,26	4,06	3,96	4,06	4,88

Nota 1 : Aparece o processo ciclico do **FC** no primeiro passo

c) Observações : Na formulação **BNP** entrelaçado para o Caso Instável :

c.1) Para $h=10^{-2}$, e exceto para a tolerância 10^{-1} , as curvas são coincidentes (figura 4.27). Para $h=10^{-3}$ as curvas são coincidentes, inclusive para a tolerância 10^{-1} (figura 4.27a).

c.2) O tempo de simulação da curva **Dommel** $h=10^{-2}$ e tolerância 10^{-5} foi de 4,12 segundos , enquanto que no **BNP** entrelaçado e mesmas condições de passo e tolerância foi de 6,28 seg. para $k=3$ e 3,96 seg. para $k=3,8$

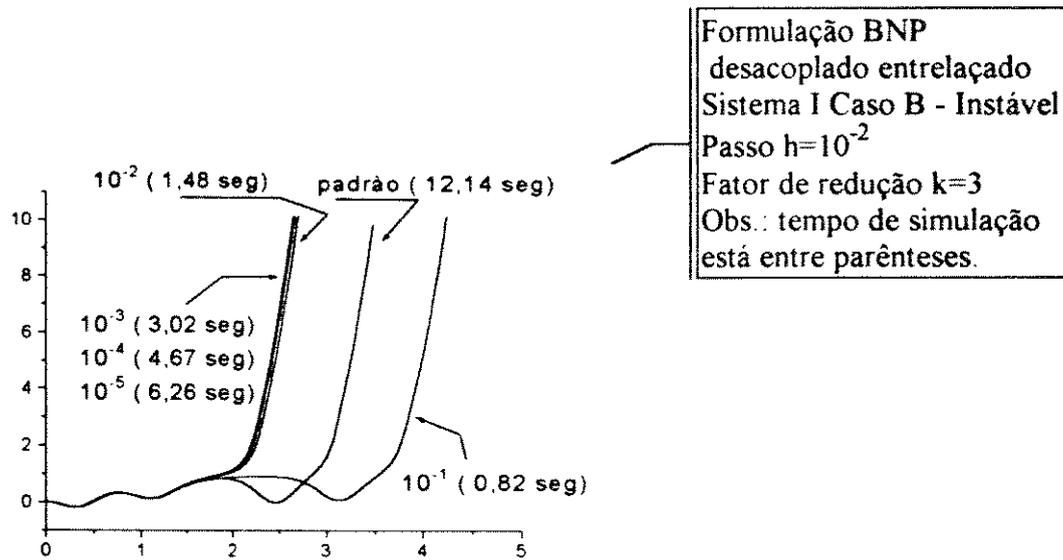


Figura 4.27 Passo de integração $h=10^{-2}$

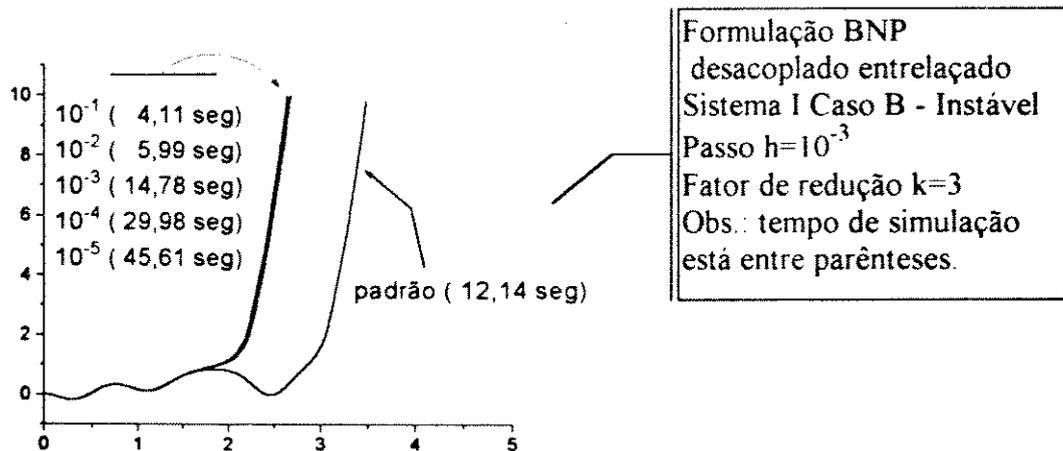


Figura 4.27a Passo de integração $h=10^{-3}$

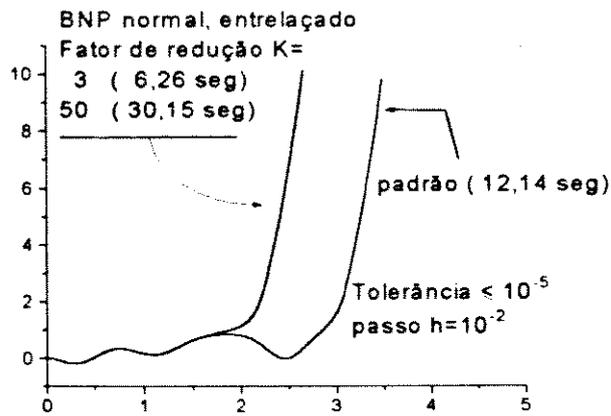


Figura 4.28 FC com fator de redução

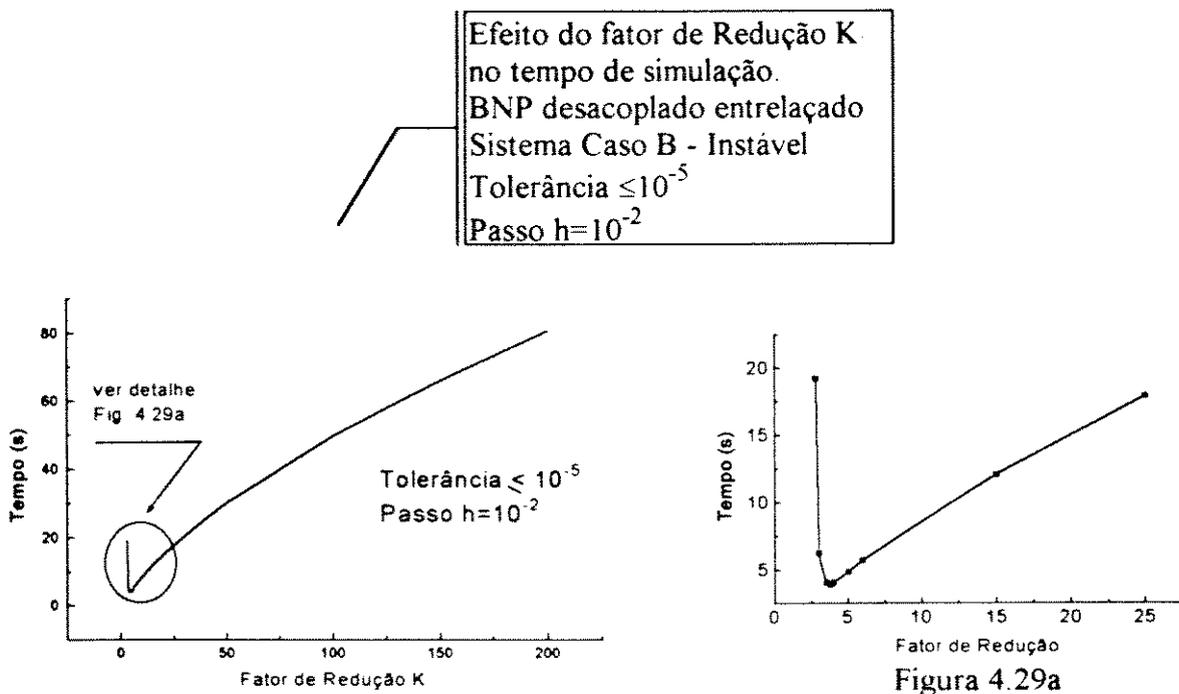


Figura 4.29a

Figura 4.29 Fator de Redução X tempo de simulação

c.3) Comparando-se as simulações que utiliza a formulação Dommel&Sato observa-se que as curvas, obtidas sob diferentes tolerâncias, são coincidentes até aproximadamente 1,75 segundos. A partir deste “tempo crítico para instabilidade” as curvas seguem caminhos diferentes. Deste ponto de vista, a simulação BNP apresenta um comportamento melhor, principalmente com o passo $h=10^{-3}$ onde, independente da tolerância, a coincidência das curvas vai além do tempo crítico.

4.5 Teste do Sistema II

Os testes realizados a seguir visam aplicar a formulação **BNP** num sistema multimáquinas, sendo escolhido aquele utilizado pelo EPRI [12], consistindo de 9 barras, 9 linhas, 3 geradores e 3 cargas, cujos dados encontram-se no Apêndice F.

As simulações foram efetuadas considerando-se sistema de excitação Tipo 1 [20] para o gerador 2 e excitação constante para os demais. Para as cargas, o modelo utilizado será representado pelas equações 3.40 e 3.41, cujos valores para os coeficientes D_1 a D_4 estão indicados nas curvas.

O comportamento da formulação **BNP** foi verificado para duas diferentes condições operacionais do sistema:

- a) **Sistema Leve** : as condições iniciais de carregamento do sistema estão indicadas no Apêndice F, na tabela referente aos “Dados de entrada para o fluxo de carga”.
- b) **Sistema Pesado** : as condições iniciais são aquelas da tabela do item acima, porém multiplicando-se por 1.5 as potências de geração e carga.

Cada um desses sistemas foi submetido a duas perturbações de mesma natureza, mas com diferentes magnitudes. A primeira delas submete a barra 8 a um acréscimo de carga ativa e reativa de respectivamente 0.1 pu e 0.0175 pu; a segunda perturbação submete a mesma barra a um impacto maior de potência ativa igual a 0.5 pu.

As simulações foram realizadas com passo de integração $h=10^{-3}$ e tolerância para as convergências $\Delta P_g \leq 10^{-3}$, $\Delta Q_g \leq 10^{-3}$. Para simulação do **Sistema Pesado** foi necessário utilizar o fator de redução k (ver item 4.4), cujos valores são:

- a) $k=10$ para simulação com $\Delta P_g=0.1$ pu e $\Delta Q_g=0.0175$ pu,
- b) $k=20$ para simulação com $\Delta P_g=0.5$ pu e $\Delta Q_g=0.0$.

A seguir, as figuras 4.30 a 4.38 retratam os resultados das simulações de acordo com os procedimentos descritos anteriormente, com as ordenadas referidas a E_{FD} em pu. Com objetivo de comparação, foram realizadas simulações utilizando-se a formulação **MSP** [15], cujos resultados indicados nas figuras 4.32 e 4.33 podem ser confrontados respectivamente com as figuras 4.30 e 4.31 da formulação **BNP**, que mostram boa concordância para pequenas perturbações.

A influência dos coeficientes da carga poderá ser observada nas figuras 4.34 a 4.38 onde, através da simulação realizada no sistema pesado e com a formulação **BNP**, os coeficientes da **curva 1** foram mantidos constantes e variou-se cada um deles para formar a **curva 2**.

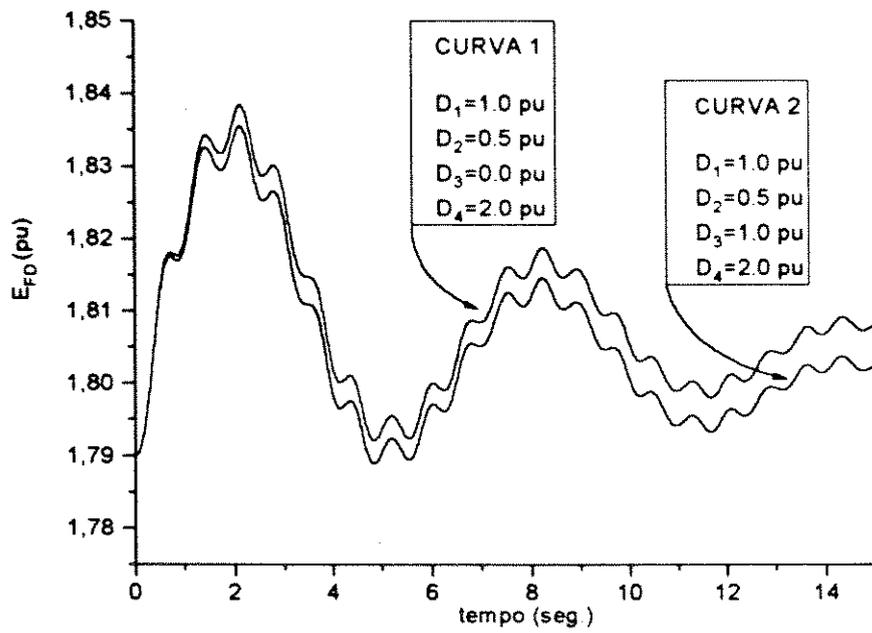


Figura 4.30 BNP Sistema Leve $\Delta P=0.1$ pu $\Delta Q=0.0175$ pu

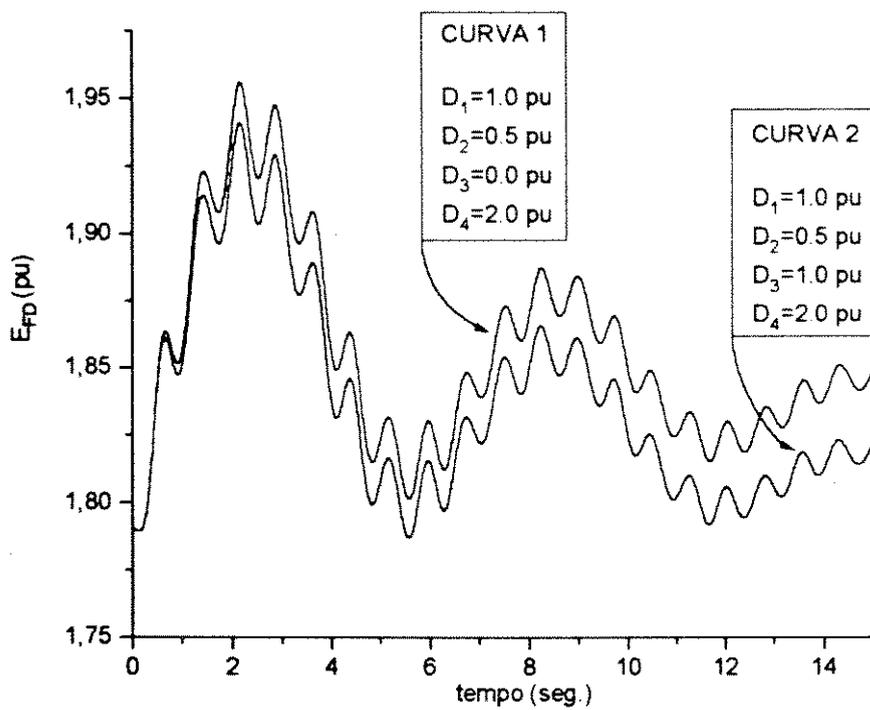


Figura 4.31 BNP Sistema Leve $\Delta P=0.5$ pu $\Delta Q=0.0$

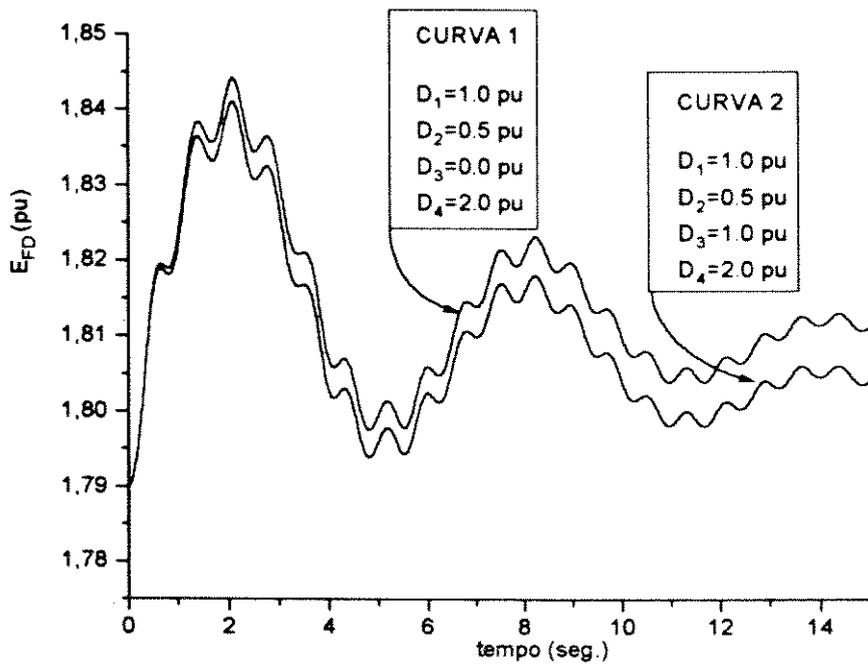


Figura 4.32 MSP Sistema Leve $\Delta P=0.1$ pu $\Delta Q=0.0175$ pu

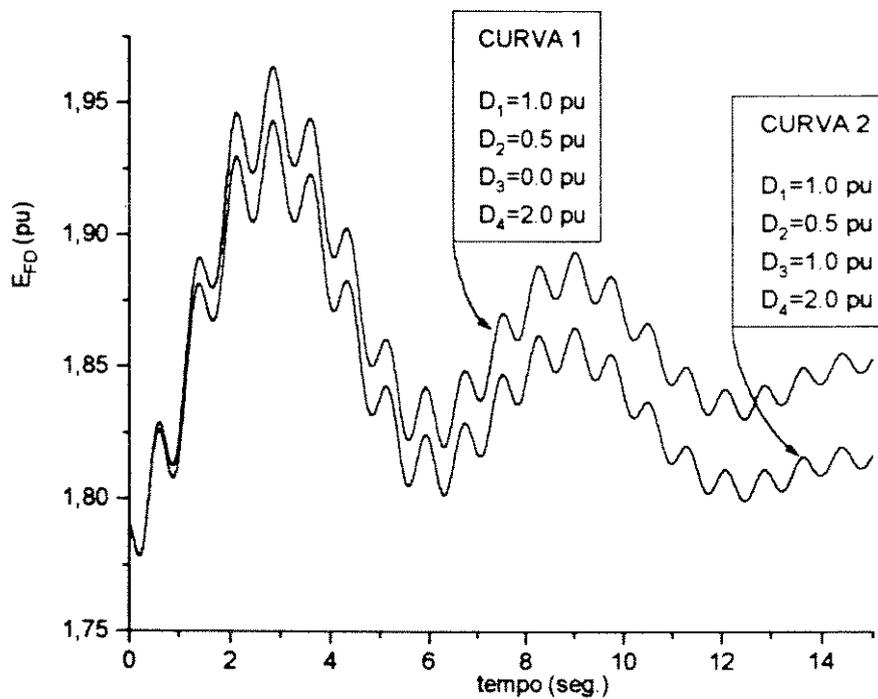


Figura 4.33 MSP Sistema Leve $\Delta P=0.5$ pu $\Delta Q=0.0$

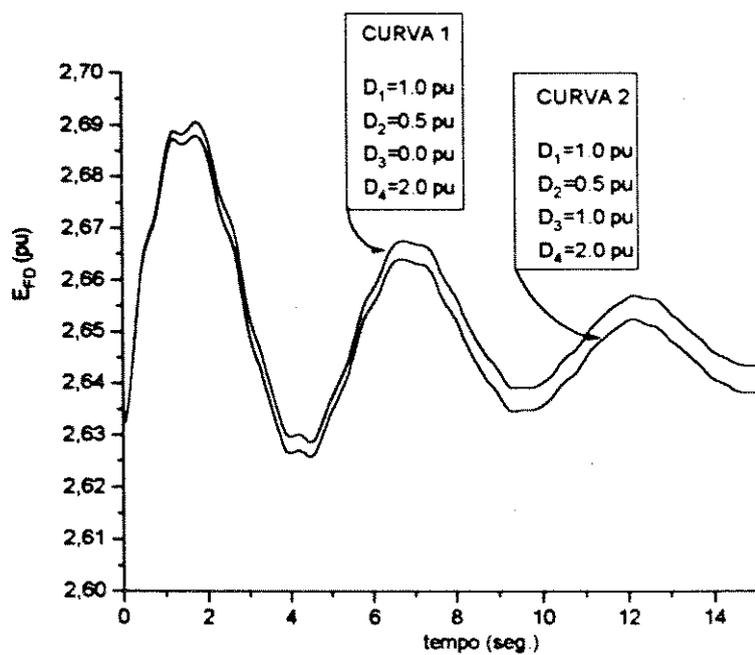


Figura 4.34 BNP Sistema Pesado $\Delta P=0.1 \text{ pu}$ $\Delta Q=0.0175 \text{ pu}$

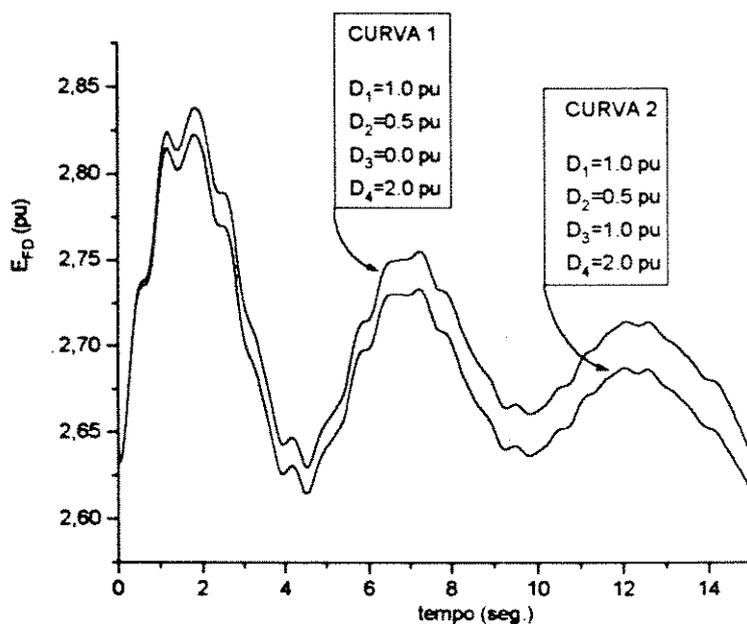
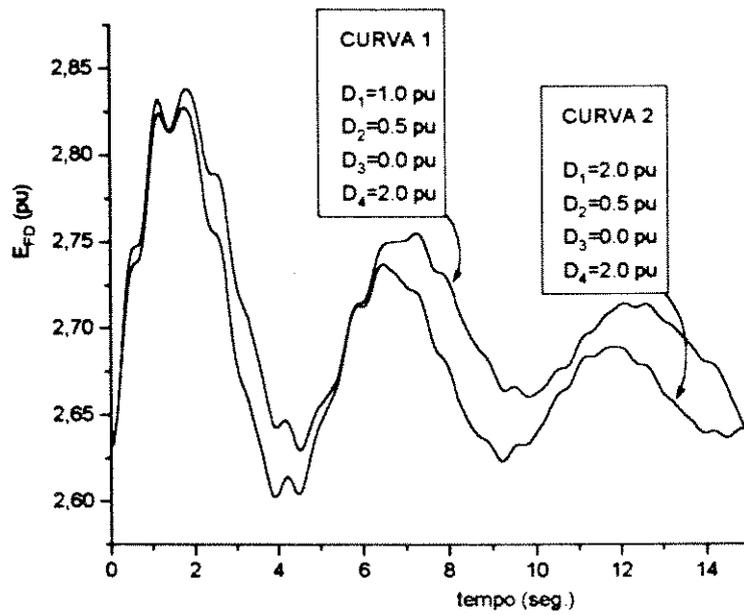


Figura 4.35 BNP Sistema Pesado $\Delta P=0.5 \text{ pu}$ $\Delta Q=0.0$



pu
 Figura 4.36 BNP Sistema Pesado $\Delta P=0.5$ pu $\Delta Q=0.0$

Alteração do coeficiente D_1

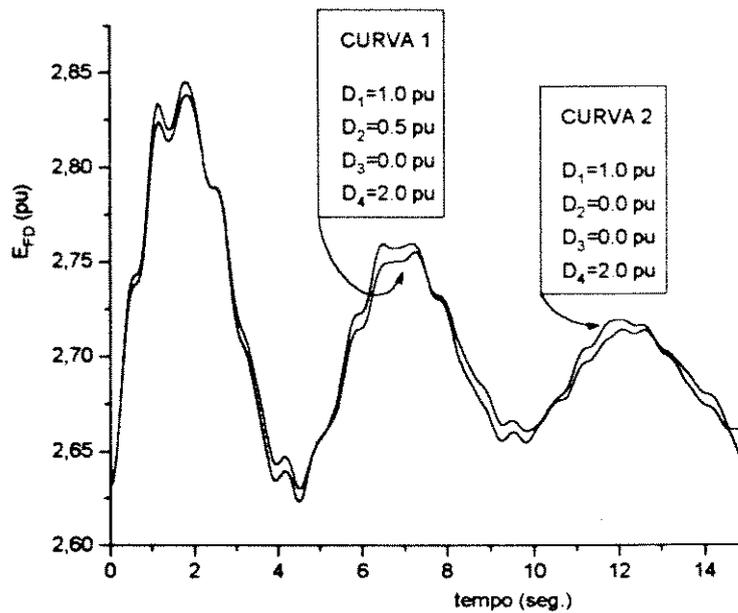


Figura 4.37 BNP Sistema Pesado $\Delta P=0.5$ pu $\Delta Q=0.0$ pu

Alteração do coeficiente D_2

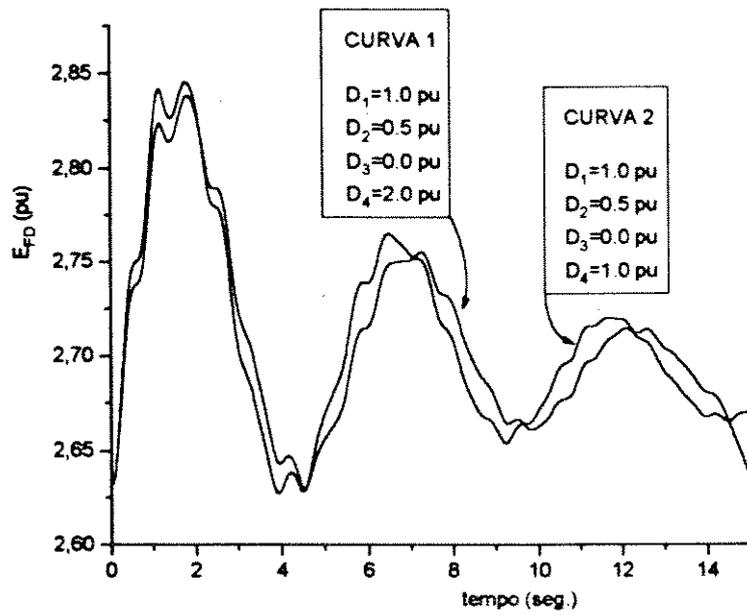


Figura 4.38 **BNP** Sistema Pesado $\Delta P=0.5$ pu $\Delta Q=0.0$ pu

Alteração do coeficiente D_4

5. Sumário e Conclusões

5.1 Sumário

Esta tese apresenta o resultado de investigações teóricas e de testes de simulação para solução dos problemas de estabilidade de médio e longo-prazo, utilizando o princípio do balanço nodal de potência em todas as barras do sistema e em qualquer instante.

O Capítulo 1 desta tese põe em evidência que as técnicas consagradas para solucionar os problemas dinâmicos no domínio do tempo tem utilizado o modelo da rede na forma linear $[I] = [Y].[V]$. A aplicação direta das equações de Park requer o uso das equações de transformação visando a transformação das variáveis entre os eixos **d-q** e **Re-Im**.

Os processos de solução Clássico e Dommel&Sato são apresentados no Capítulo 2, sendo enfatizado o método alternado normal e colocando em relevo a etapa referente à solução do fluxo de carga. A expressão que transforma as variáveis dos eixos **dq** para os eixos **ReIm** faz a ligação entre os dois processos citados acima, ao transformar a corrente referida aos eixos **dq** utilizada na solução do fluxo de carga do processo Clássico, na corrente referida aos eixos **ReIm**, utilizada no processo Dommel&Sato.

No Capítulo 3 é desenvolvida a base da formulação **BNP** e são obtidas as expressões completas para as potências ativa e reativa, não sendo considerado os enrolamentos amortecedores. O modelo da rede e as equações diferenciais dos geradores foram modificados, tornando-os mais apropriados à nova formulação. O modelo das máquinas síncronas considerado neste trabalho é o modelo 2 e, portanto, está aberto para futuros trabalhos a consideração dos demais modelos.

No Capítulo 4 estão reunidas as simulações e, após cada uma delas, são relatadas as informações mais relevantes observadas durante o processo.

5.2 Conclusões

As investigações conduzidas nesta tese forneceram as seguintes conclusões:

- A formulação **BNP** é uma abordagem viável e precisa para a solução dos problemas de estabilidade a médio e longo-prazo.
- A solução do **FC** da formulação **BNP** envolve o mesmo esquema convencional de solução para um problema de fluxo de carga, particularmente o modelo desacoplado. A matriz Jacobiana pode permanecer constante durante todo o processo de simulação, e os elementos são calculados utilizando-se as condições pré-perturbação.

- Utilizando o modelo 2 para as máquinas síncronas, não há necessidade do uso das equações de transformação entre os eixos dq e $\Re\Im$.
- Os efeitos cíclicos que surgem em alguns problemas de fluxo de carga, também podem aparecer na formulação **BNP**. Este efeito mantém o processo computacional preso num "loop" de convergência. A solução adotada nas simulações **BNP** para resolver o efeito cíclico, que aparece na etapa de solução do **FC**, foi através do uso do fator de redução k aplicado em ΔV e $\Delta \theta$.

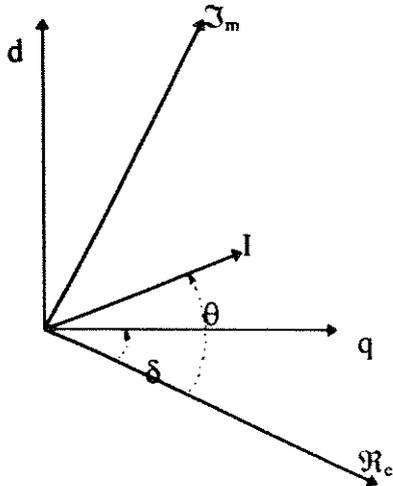
5.3 Sugestões para futuras pesquisas

Por se tratar de uma nova abordagem para solução de problemas de estabilidade, muitas questões surgiram no transcorrer da pesquisa, e que não foram consideradas neste trabalho por constituírem um desvio do objetivo principal da tese, que é a comprovação da viabilidade do processo **BNP**. Estas questões bem como outras que o leitor poderá suscitar, serão deixadas para futuras pesquisas. Como sugestão relacionamos algumas:

- Uso do **BNP** nos problemas de estabilidade transitória. Esta questão envolve a solução do fluxo de carga em condições de curto-circuito.
- Aplicação das técnicas de extrapolação de variáveis, visando a redução do tempo de simulação.
- Formulação do **BNP** para os demais modelos de máquinas síncronas e consideração dos efeitos da saturação.
- Obtenção de fator de redução k ótimos, para sistemas mais complexos.
- Neste trabalho a matriz Jacobiana foi considerada constante durante todo o processo de simulação e calculada de acordo com as condições pré-perturbação. Em contingências pesadas, as condições pós-distúrbio poderão requerer a atualização da Jacobiana durante as grandes variações impostas às variáveis de estado. Cabe verificar como se comporta o método se a matriz for alterada ou não.

Apêndice A

□ Dedução da propriedade (2.10)



Utilizando a convenção adotada por Dommel [5], ou seja, o eixo d adiantado 90° do eixo q temos:

$$I_q = I \cos(\theta - \delta)$$

$$I_d = I \sin(\theta - \delta)$$

$$I_q + jI_d = I [\cos(\theta - \delta) + j \sin(\theta - \delta)] =$$

$$= I e^{j(\theta - \delta)} = (I \cdot e^{j\theta}) \cdot e^{-j\delta} =$$

$$= I e^{-j\delta} \quad (A.1)$$

$$AI_q + jBI_d = ?$$

$$AI_q + jBI_d = AI_q + (jAI_d - jAI_d) + jBI_d + (BI_q - BI_q) =$$

$$= A(I_q + jI_d) + B(I_q + jI_d) - (jAI_d + BI_q) =$$

$$= (A+B)(I_q + jI_d) - [jAI_d + (AI_q - AI_q) + BI_q + (jBI_d - jBI_d)]$$

$$= (A+B)(I_q + jI_d) - [B(I_q - jI_d) - A(I_q - jI_d) + AI_q + jBI_d]$$

$$= (A+B)(I_q + jI_d) - [(B - A)(I_q - jI_d) + (AI_q + jBI_d)]$$

$$2(AI_q + jBI_d) = (A+B)(I_q + jI_d) - (B - A)(I_q - jI_d)$$

substituindo por A.1 tem-se :

$$AI_q + jBI_d = \frac{1}{2} [(A+B) I e^{-j\delta} - (B - A) I^* e^{j\delta}] \quad (A.2)$$

Dedução da Expressão (2.11)

Das equações de Park (2.9) temos:

$$I_q = \frac{r}{r^2 + x_d' x_q'} (E_q' - V_q) + \frac{x_d'}{r^2 + x_d' x_q'} (E_d' - V_d)$$

$$I_d = \frac{r}{r^2 + x_d' x_q'} (E_d' - V_d) - \frac{x_q'}{r^2 + x_d' x_q'} (E_q' - V_q)$$

$$I_q + jI_d = \frac{r}{r^2 + x_d' x_q'} \left[(E_q' - V_q) + j(E_d' - V_d) \right] - j \frac{1}{r^2 + x_d' x_q'} \left[x_q' (E_q' - V_q) + jx_d' (E_d' - V_d) \right]$$

Aplicando-se a propriedade A.2 nas parcelas entre colchetes tem-se que:

$$I_q + jI_d = \frac{r}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{E}' - \mathbf{V}) e^{-j\delta} - j \frac{1}{2} \frac{1}{r^2 + x_d' x_q'} \left[(x_q' + x_d') (\mathbf{E}' - \mathbf{V}) e^{-j\delta} - (x_d' - x_q') (\mathbf{E}' - \mathbf{V})^* e^{j\delta} \right]$$

$$\text{ou, } I_q + jI_d = (\mathbf{I}) e^{-j\delta} = \frac{r - \frac{1}{2}j(x_d' + x_q')}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{E}' - \mathbf{V}) e^{-j\delta} + \frac{\frac{1}{2}j(x_d' - x_q')}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{E}' - \mathbf{V})^* e^{j\delta}$$

Portanto:

$$\mathbf{I} = \frac{r - \frac{1}{2}j(x_d' + x_q')}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{E}' - \mathbf{V}) - \frac{\frac{1}{2}j(x_q' - x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{E}' - \mathbf{V})^* e^{j2\delta} \quad (\text{A.3})$$

Apêndice B

Dedução das Expressões 3.1 e 3.2

Tomando-se o conjugado de A.3 temos:

$$\mathbf{I}^* = \frac{r + \frac{1}{2}j(x_d' + x_q')}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{E}' - \mathbf{V})^* + \frac{\frac{1}{2}j(x_q' - x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{E}' - \mathbf{V}) e^{-j2\delta}$$

como $\mathbf{S} = \mathbf{V} \mathbf{I}^*$, sendo $\mathbf{S} = P + jQ$ teremos, portanto,

$$\mathbf{S} = \frac{r + \frac{1}{2}j(x_d' + x_q')}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{V} \mathbf{E}'^* - \mathbf{V} \mathbf{V}^*) + \frac{\frac{1}{2}j(x_q' - x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} (\mathbf{V} \mathbf{E}' - \mathbf{V} \mathbf{V}) e^{-j2\delta}$$

Fazendo $\frac{r + \frac{1}{2}j(x_d' + x_q')}{r^2 + x_d' x_q'} = A + jB$ e $\frac{\frac{1}{2}j(x_q' - x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} = jC$ temos:

$$\mathbf{S} = (A + jB)(\mathbf{V} \mathbf{E}'^* - \mathbf{V}^2) + jC(\mathbf{V} \mathbf{E}' - \mathbf{V} \mathbf{V}) e^{-j2\delta}$$

Como $\mathbf{V} = V e^{j\theta}$ e $\mathbf{E}' = E' e^{j\delta}$ temos

$$\mathbf{S} = (A + jB)(V E' e^{j(\theta-\delta)} - V^2) + jC(V E' e^{j(\theta+\delta)} - V^2 e^{j2\theta}) e^{-j2\delta}$$

$$\mathbf{S} = (A + jB)(V E' e^{j(\theta-\delta)} - V^2) + jC(V E' e^{j(\theta-\delta)} - V^2 e^{j2(\theta-\delta)})$$

$$\mathbf{S} = A V E' e^{j(\theta-\delta)} + j(B + C) V E' e^{j(\theta-\delta)} - A V^2 - j B V^2 - j C V^2 e^{j2(\theta-\delta)}$$

Lembrando que $e^{j(\theta - \delta)} = \cos(\theta - \delta) + j \sin(\theta - \delta)$, e separando as partes real e imaginária temos:

$$P = AVE' \cos(\theta - \delta) - (B + C)VE' \sin(\theta - \delta) - AV^2 + CV^2 \sin 2(\theta - \delta)$$

$$Q = AVE' \sin(\theta - \delta) + (B + C)VE' \cos(\theta - \delta) - BV^2 - CV^2 \cos 2(\theta - \delta)$$

Substituindo os valores A, B, C sendo que $B + C = \frac{x_q'}{r^2 + x_d' x_q'}$ temos:

$$P = \frac{rVE'}{r^2 + x_d' x_q'} \cos(\theta - \delta) - \frac{rV^2}{r^2 + x_d' x_q'} - \frac{x_q'VE'}{r^2 + x_d' x_q'} \sin(\theta - \delta) + \frac{\frac{1}{2}(x_q' - x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} V^2 \sin 2(\theta - \delta)$$

$$Q = \frac{rVE'}{r^2 + x_d' x_q'} \sin(\theta - \delta) + \frac{x_q'VE'}{r^2 + x_d' x_q'} \cos(\theta - \delta) - \frac{\frac{1}{2}(x_q' + x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} V^2 - \frac{\frac{1}{2}(x_q' - x_d')}{r^2 + x_d' x_q'} V^2 \cos 2(\theta - \delta)$$

Apêndice C

Dedução da Matriz Jacobiana na forma Trigonométrica Simplificada:

Seja a impedância $z = r + jx$ e $\operatorname{tg}\varphi = \frac{r}{x}$
 temos que, $z = j(x - jr) = |z| \angle (90^\circ - \varphi)$ onde $|z| = \sqrt{r^2 + x^2}$,
 então a admitância $y = \frac{1}{z} = \lambda \angle -(90^\circ - \varphi)$ onde, $\lambda = \frac{1}{|z|}$

Seja Y um elemento não diagonal da matriz admitância nodal, então:

$$Y = -y \text{ ou } Y = -\lambda \angle -(90^\circ - \varphi) = -\lambda [\cos(90^\circ - \varphi) - j \operatorname{sen}(90^\circ - \varphi)] = -\lambda \operatorname{sen} \varphi + j \lambda \cos \varphi$$

Seja $Y = G + jB$, teremos, então: $G = -\lambda \operatorname{sen} \varphi$ e $B = \lambda \cos \varphi$

Será deduzida a expressão apenas para o elemento H_{km} da submatriz H da Jacobiana, pois os elementos das demais submatrizes são obtidos da mesma forma.

Repetindo a equação 3.8 temos que:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \operatorname{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

$$\text{então, } H_{km} = V_k V_m (-\lambda_{km} \operatorname{sen} \varphi_{km} \operatorname{sen} \theta_{km} - \lambda_{km} \cos \varphi_{km} \cos \theta_{km})$$

$$\text{e, portanto, } H_{km} = -V_k V_m \lambda_{km} \cos(\theta_{km} - \varphi_{km})$$

O elemento da diagonal da submatriz H será:

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = \sum_{m \in \Omega} V_k V_m \lambda_{km} \cos(\theta_{km} - \varphi_{km})$$

Para os elementos das demais submatrizes teremos:

$$\begin{cases} N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k \lambda_{km} \operatorname{sen}(\theta_{km} - \varphi_{km}) \\ N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = 2 V_k G_{kk} + \sum_{m \in \Omega} V_m \lambda_{km} \operatorname{sen}(\theta_{km} - \varphi_{km}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m \lambda_{km} \text{sen}(\theta_{km} - \varphi_{km}) \\ M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = \sum_{m \in \Omega} V_k V_m \lambda_{km} \text{sen}(\theta_{km} - \varphi_{km}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = -V_k \lambda_{km} \text{cos}(\theta_{km} - \varphi_{km}) \\ L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -2 V_k B_{kk} - \sum_{m \in \Omega} V_m \lambda_{km} \text{cos}(\theta_{km} - \varphi_{km}) \end{cases}$$

sendo, $B_{kk} = b_{k \text{ Shunt}} + \sum_{m \in \Omega} (b_{km \text{ Shunt}} + b_{km})$ e $G_{kk} = \sum_{m \in \Omega} g_{km}$

Tem-se, então a forma trigonométrica simplificada:

cosseno (H)	seno (N)
seno (M)	cosseno (L)

A forma simplificada das injeções de potência será:

$$\begin{cases} P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in \Omega} V_m \lambda_{km} \text{sen}(\theta_{km} - \varphi_{km}) \\ Q_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in \Omega} V_m \lambda_{km} \text{cos}(\theta_{km} - \varphi_{km}) \end{cases}$$

Apêndice D

Dedução das Equações 3.15 e 3.16

As equações diferenciais dos geradores, considerando os efeitos transitórios no estator, são dadas por [5]:

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{do}} \left[E'_q - (x_d - x'_d) I_d - E_{FD} \right] \quad (D.1)$$

(E_{FD} = tensão de campo referida ao estator)

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{qo}} \left[E'_d + (x_q - x'_q) I_q \right] \quad (D.2)$$

$$\text{Mas, } P = V_q I_q + V_d I_d \quad (D.3)$$

$$\text{e, } Q = V_d I_q - V_q I_d \quad (D.4)$$

$$\text{Do diagrama do Apêndice A tem-se que: } V_d = V \sin(\theta - \delta) = -V \sin(\delta - \theta) \quad (D.5)$$

$$\text{e, } V_q = V \cos(\theta - \delta) = V \cos(\delta - \theta) \quad (D.6)$$

$$\text{De (D.3) e (D.4) tem-se que: } I_d = \frac{PV_d - QV_q}{V_d^2 + V_q^2} \quad (D.7)$$

$$\text{Substituindo-se (D.5) e (D.6) em (D.7) } \Rightarrow I_d = -\frac{P \sin(\delta - \theta) + Q \cos(\delta - \theta)}{V} \quad (D.8)$$

Da mesma forma obtém-se :

$$I_q = \frac{P \cos(\delta - \theta) - Q \sin(\delta - \theta)}{V} \quad (D.9)$$

Levando D.8 e D.9 respectivamente em D.1 e D.2, obtém-se as equações diferenciais dos geradores em termos das potências P e Q.

Dedução da Expressão 3.37

$$\text{Do diagrama fasorial em regime tem-se que: } E_q = V_q - x_d I_d = E_{FD} \quad (\text{D.10})$$

Substituindo (D.6) e (D.8) em (D.10) resulta a condição em regime, válida para máquinas de polos lisos e salientes:

$$E_{FD} = E_q = V \cos(\delta - \theta) + \frac{x_d}{V} [P \sin(\delta - \theta) + Q \cos(\delta - \theta)] \quad (\text{D.11})$$

Apêndice E

Fluxo Concatenado do Enrolamento de Campo na Condição Inicial $t = 0^+$: (E'_{q0+})

a) A utilização da equação 3.38 para se obter E'_{q0+} onde P_{0-} é a potência ativa na condição de regime permanente, é aplicável apenas se atendidas as condições conforme descrito a seguir:

Seja P_0 a potência ativa na condição em regime permanente, dada por:

$$P_0 = \frac{-VE_q}{x_d} \sin(\theta - \delta) + \frac{1}{2} \frac{(x_q - x_d)}{x_q x_d} V^2 \sin 2(\theta - \delta) \quad (E.1)$$

No instante $t = 0^+$ da perturbação, pelo princípio de fluxo constante tem-se que:

$$E_q = E'_q - (x_d - x'_d) I_d \quad (E.2)$$

onde E_q e I_d são valores na condição $t = 0^-$ e E'_q está na condição $t = 0^+$.

$$\text{Mas } E'_q = V_q - x'_d I_d \quad \text{ou} \quad I_d = \frac{V_q - E'_q}{x'_d} \quad (E.3)$$

onde também V_q refere-se à condição $t = 0^-$

$$\text{Sendo } V_q = V \cos(\theta - \delta), \quad (E.4)$$

e, substituindo E.4 em E.3 e levando o resultado em E.2, obtém-se E_q o qual deverá ser substituído em E.1. Tem-se, então:

$$P_0 = -\frac{V \sin(\theta - \delta)}{x_d} \left[E'_q - \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} (V_q - E'_q) \right] + \frac{1}{2} \frac{(x_q - x_d)}{x_q x_d} V^2 \sin 2(\theta - \delta)$$

$$P_0 = -\frac{V \sin(\theta - \delta)}{x_d} \left[\frac{x_d}{x'_d} E'_q - \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} V_q \right] + \frac{1}{2} \frac{(x_q - x_d)}{x_q x_d} V^2 \sin 2(\theta - \delta)$$

$$P_0 = -\frac{V \sin(\theta - \delta)}{x_d} E'_q \frac{x_d}{x'_d} + V V_q \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \sin(\theta - \delta) + \frac{1}{2} \frac{(x_q - x_d)}{x_q x_d} V^2 \sin 2(\theta - \delta)$$

$$P_0 = -\frac{VE'_q}{x'_d} \sin(\theta - \delta) + \frac{1}{2} V^2 \frac{x'_d - x'_d}{x'_d x'_d} \sin 2(\theta - \delta) + \frac{1}{2} \frac{x'_q - x'_d}{x'_q x'_d} V^2 \sin 2(\theta - \delta)$$

$$P_0 = -\frac{VE'_q}{x'_d} \sin(\theta - \delta) + \frac{1}{2} \frac{V^2 \sin 2(\theta - \delta)}{x'_d} \left[\frac{x'_d}{x'_d} - 1 + 1 - \frac{x'_d}{x'_q} \right]$$

$$P_0 = -\frac{VE'_q}{x'_d} \sin(\theta - \delta) + \frac{1}{2} V^2 \left(\frac{x'_q - x'_d}{x'_d x'_q} \right) \sin 2(\theta - \delta) \quad (E.5)$$

Comparando-se E.1 e E.5 constata-se que a potência em regime permanente pode ser expressa em termos das grandezas transitórias, substituindo-se E_q por E'_q e x_d por x'_d .

Para as expressões E.1 e E.5 tanto E_d quanto E'_d são supostas iguais a zero, e pelo princípio do fluxo constante para o eixo d tem-se que:

$$-(E_d - E'_d) = (x'_q - x_q) I_q$$

e, portanto, é necessário também assumir que $x_q = x'_q$.

b) Forma alternativa de obtenção de E'_{q0+} :

O fluxo E'_{q0+} tem origem no instante 0^- da perturbação e seu valor, de acordo com o princípio do fluxo constante, pode ser descrito como:

$$E'_{q0+} - E_{q0-} = (x'_d - x_d) I_{d0-} \quad (E.6)$$

Substituindo E_{q0-} pela equação (D.11) e I_{d0-} pela equação D.8, após o acréscimo do subscrito 0^- tem-se:

$$E'_{q0+} = V_{o-} \cos(\delta_{o-} - \theta_{o-}) + \frac{x'_d}{V_{o-}} \left[P_{o-} \sin(\delta_{o-} - \theta_{o-}) + Q_{o-} \cos(\delta_{o-} - \theta_{o-}) \right] \quad (E.7)$$

Apêndice F

Dados do Sistema I

V_t	H	X_c	R_c	x_d	x'_d	$x_q = x'_q$	K_c	T_c	T'_{do}
1.0	5	0.4	0	1.6	0.32	1.55	25	0.05	6

Dados do Sistema II

- Dados da Rede

Linha	Barra Início	Barra Fim	Resist. %	Reat. %	BSH %
1	9	8	1.190	10.08	20.90
2	8	7	0.85	7.20	14.90
3	7	5	3.20	16.10	30.60
4	5	4	1.00	8.50	17.60
5	4	6	1.70	9.20	15.80
6	6	9	3.90	17.00	35.80
7	3	9	0.00	5.86	0.00
8	2	7	0.00	6.25	0.00
9	1	4	0.00	5.76	0.00

• Dados dos Geradores

Gerador	M(=2H)	P_g	Q_g	x_d	x'_d	$x_q = x'_q$
1	47.28	0.71	0.27	0.146	0.061	0.097
2	12.8	1.63	0.06	0.896	0.120	0.864
3	6.02	0.85	0.11	1.312	0.181	1.258

• Dados do Sistema de Excitação do Gerador 2 (Tipo 1 do IEEE)

K_A	K_E	K_F	T_A (s)	T_E (s)	T_R (s)	T_F (s)	SE_{max} (pu)	$SE_{0.75max}$ (pu)	E_{FDmax} (pu)	E_{FDmin} (pu)	T'_{do} (s)
20.0	0	0.063	0.20	0.314	0	0.35	0.293	1.104	3.984	-3.984	6.0

• Dados de entrada para o fluxo de carga - condições iniciais

Barra	Tipo (ver Obs)	Tensão (módulo)	GERAÇÃO		CARGA	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	2	1.040	71.6	27.0		
2	1	1.025	163.0	6.7		
3	1	1.025	85.0	-10.7		
4	0					
5	0				125.0	50.0
6	0				90.0	30.0
7	0					
8	0				100.0	35.0
9	0					

Obs.: Tipo 0 - barra de carga (PQ)
 Tipo 1 - barra de controle (PV)
 Tipo 2 - barra "swing" ($V\theta$)

Referências Bibliográficas

- [1] Frowd, J. R., Giri, J. C., Podmore, R. - "Transient Stability and Long-Term Dynamics Unified".
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.10, October 1982.
- [2] Walve, K. - "Modelling of Power System Componentes at Severe Disturbances".
Swedish State Power Board, Fack - Vallingby, Sweden.
- [3] McFadden, R. H. - "Stability Considerations for Industrial Power Systems".
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-13, No.2, March/April 1977
- [4] "Electrical Transmission and Distribution Reference Book" -East Pittsburg, Pa.:
Westinghouse Electric Corporation, 4 Edition 1950.
- [5] Dommel, H. W., Sato, N. - "Fast Transient Stability Solutions".
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, July/August 1972
- [6] deMello, F. P., Laskowski, T. F. - "Concepts of Power System Dynamic Stability".
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vo. PAS-94, No.3, May/June 1975.
- [7] Lee, W., Chen, M., Williams, L. B. - "Load Models for Stability Studies".
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, No.1, January/February 1987.
- [8] "Load Modelling and Dynamics".
Electra No.130, May 1990.
- [9] IEEE Committee Report - "Recommended Phasor Diagram for Synchronous Machines".
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-88, No. 11, Nov. 1969.
- [10] Chen, M. S. - "Determinig Load Characteristics for Transient Performance".
EPRI Report EL-849, Project RP 849, Palo Alto, Ca, 1981.
- [11] Stott, B. - "Power System Dynamic Response Calculations".
Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No.2, February 1979.
- [12] EPRI - "Power System Dynamic Analysis Phase I".
Boeing Computer Services, EPRI EL-484, Project 670-1, Final Report, July 1977.
- [13] Park, R. H. - "Two Reaction Theory of Synchronous Machines - Generalized Method of Analysis - Part I".
AIEE transactions Vol. 48 July 1929.
- [14] Undrill, J. M., Laskowski, T. F. - "Model selection and Assembly for Power System Simulations".
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.9, Sept. 1982

- [15] Deckmann, S. M., Costa, V. F. - "A Power Sensitivity Model for Electromechanical Oscillation Studies".
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PS-9, No.3, May 1994.
- [16] Monticelli, A. J. - "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica".
Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1983.
- [17] Arrilaga, J., Arnold, C. P., Harker, B. J. - "Computer Modelling of Electrical Power Systems".
John Willey&Sons Inc. - First Printing, 1983.
- [18] IEEE Tutorial Course - "Modern Concepts of Power System Dynamics", May 1970.
- [19] Costa, V. F. - "Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Energia Elétrica".
Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia de Campinas - UNICAMP, 1981.
- [20] "Proposed Terms&Definitions for Power System Stability".
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-101, No.7 July 1982.
- [21] deMello F. P., Concordia C. - "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control".
IEEE Trans. on Power Systems, PAS Vol. 88, April 1969.