

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
DE ELETRICIDADE

MODELAGEM DE CARGA DE UMA INDÚSTRIA DE
GRANDE PORTE PARA ANÁLISE NO REGIME
DINÂMICO DE PROBLEMAS DE TENSÃO

Fábio Mendes da Silva

São Luís
2006

MODELAGEM DE CARGA DE UMA INDÚSTRIA DE GRANDE PORTE PARA ANÁLISE DE PROBLEMAS DE TENSÃO NO REGIME DINÂMICO

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Por

FÁBIO MENDES DA SILVA

**São Luís
2006**

Silva, Fábio Mendes.

Modelagem de carga de uma indústria de grande porte para análise no regime dinâmico de problemas de tensão / Fábio Mendes Silva. – 2006.

72 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade, Universidade Federal do Maranhão, 2006.

1. Confiabilidade – sistemas de potência. 2. Estabilidade de tensão. 3. Domínio do tempo. I. Título.

CDU: 621.31

**MODELAGEM DE CARGA DE UMA INDÚSTRIA DE
GRANDE PORTE PARA ANÁLISE DE PROBLEMAS
DE TENSÃO NO REGIME DINÂMICO**

Fábio Mendes da Silva

DISSERTAÇÃO APROVADA EM / /

**Professor Dr. José Eduardo Onoda Pessanha
(Orientador)**

**Professor Dr. Júlio César Stacchini de Souza
(Membro da Banca Examinadora)**

**Professor Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas
(Membro da Banca Examinadora)**

Dedicatória

À minha família e aos meus amigos

Agradecimentos

- A Deus, por ter me iluminado durante todos os momentos difíceis ao longo desta jornada.
- Ao professor José Eduardo Onoda Pessanha, pela orientação precisa e objetiva, e além de tudo pela paciência e compreensão que teve diante da minha necessidade de ter que trabalhar antes de terminar este trabalho.
- Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro para a realização deste projeto de pesquisa.
- As Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE) pela infraestrutura laboratorial do Grupo de Sistema de Potência (GSP-DEE-UFMA), usada nesta pesquisa, e através do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento número 45000044031.
- A ALUMAR, em especial ao Engenheiro Gilson Soares, fornecendo dados que tornaram possível a realização deste trabalho.
- A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade. Agradecimento especial aos professores Osvaldo Saavedra, Leonardo Paucar e Maria da Guia da Silva pelos conselhos e ensinamentos.
- A todos os meus amigos do grupo de sistemas de potência da Universidade Federal do Maranhão (Aniceto Neto, Agnelo Coelho, Alex Paz, Alcides Neto, Fernando Henrique, Juan Carlos, Júlio Cesar e Marcelo), agradeço também a meus amigos do NEA (Bartolomeu Santos, Walbermark Marques e Shigeaki Lima) pelo companheirismo.
- As minhas tias, principalmente Quentilia, Josenilde e Sebastiana Gomes, responsáveis direta pelo início da minha educação. Aos meus irmãos David, Flávio, Cláudia e Jean por me possibilitarem fazer parte de uma família equilibrada e feliz.
- E finalmente um agradecimento especial aos meus pais, Antonio José Mendes Gomes da Silva e Jucelina dos Santos Mendes, pelo amor, amizade e pelos “sacrifícios” que fizeram em prol da educação dos seus filhos.

RESUMO

Este trabalho propõe um modelo estendido representando parte da carga de uma indústria de grande porte de alumínio para investigações do fenômeno da estabilidade de tensão no domínio do tempo. Os esforços se concentraram na expansão do modelo do sistema de distribuição industrial incluindo uma representação explícita dos principais transformadores, capacitores, alimentadores e motores de indução. O modelo expandindo é validado através de uma comparação entre os resultados das simulações computacionais e o de registradores alocados na indústria e no sistema elétrico. Uma seqüência real de eventos ocorrida no Sistema Elétrico do Norte do Brasil no ano de 2002 causando uma perda completa da indústria foi considerada para tal fim.

ABSTRACT

The present work proposes an extended model representing part of a huge aluminum industry load for voltage stability investigations in time domain. The efforts were concentrated in the expansion of the industrial power distribution system model including explicit representation of the main transformers, capacitors, feeders and induction motors. The extended model is validated through a comparison between computer simulation results and the industry/power system utility recordings. A real sequence of events which took place in the Brazilian North Power System in the year of 2002 causing a complete industry breakdown (loss of bulk supply) was considered here for this purpose.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

| | |
|---|----|
| 1.1. Introdução..... | 01 |
| 1.2. Motivação..... | 02 |
| 1.2.1. Dependencia das cargas com a tensão..... | 03 |
| 1.3. Objetivos..... | 06 |
| 1.4. Estrutura do Trabalho..... | 07 |

CAPÍTULO 2 MODELO DE CARGA

| | |
|---|----|
| 2.1. Conceituações e caracterizações..... | 08 |
| 2.2. Modelos Estáticos – Exponencial e Polinomial..... | 09 |
| 2.2.1. Modelo exponencial..... | 09 |
| 2.2.1.1. Modelos do Tipo Potência, Corrente e Impedância Constante..... | 10 |
| 2.2.2. Modelo Polinomial – ZIP..... | 11 |
| 2.3. Modelos Dinâmicos - Motor de Indução..... | 12 |
| 2.3.1. Modelagem de Motores de Indução..... | 12 |
| 2.4. Modelagem de Motores de Indução em Estudos de Fluxo de Carga..... | 24 |

CAPITULO 3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO E MODELAGEM DA CARGA INDUSTRIAL

| | |
|---|----|
| 3.1. Introdução..... | 31 |
| 3.2. O Sistema Interligado Nacional (SIN)..... | 31 |
| 3.3. Descrição do Sistema Elétrico Industrial..... | 34 |
| 3.4. Modelagem Computacional da Carga Industrial..... | 37 |
| 3.4.1. Modelagem Atual da Carga..... | 37 |
| 3.4.2. Modelagem Proposta de Carga..... | 39 |

CAPITULO 4 SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

| | |
|------------------------------------|----|
| 4.1. Introdução..... | 44 |
| 4.2. Testes Computacionais..... | 44 |
| 4.2.1. Coleta de Dados..... | 45 |
| 4.3. Descrição da Perturbação..... | 46 |

CAPITULO 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....63

ANEXOS66

REFERÊNCIAS68

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| 3.1. Comparação entre os modelos atual e proposto..... | 42 |
| 3.2. Parâmetros do sistema de distribuição da indústria (grandezas em pu)..... | 43 |
| 4.1. Parâmetros dos motores de indução (pu)..... | 48 |
| 4.2. Comparação entre os modelos – condição pré-distúrbio..... | 48 |
| 4.3. Informações sobre as simulações computacionais..... | 51 |
| 4.4. Valores de tensão em regime permanente após as ações de controle..... | 56 |
| 4.5. Diagramas unifilares – Modelos atual e proposto..... | 62 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| 2.1 – Representação de Carga em Relação à Tensão..... | 11 |
| 2.2 - Circuito Equivalente de Regime Permanente do Motor de Indução..... | 16 |
| 2.3 - Circuito Equivalente Transitório para o Motor de Indução..... | 19 |
| 2.4 - Circuito Equivalente do Motor de Indução em Regime Permanente Considerando os Transitórios no Rotor..... | 21 |
| 2.5 - Circuito Equivalente do Motor de Indução para Fluxo de Potência..... | 22 |
| 2.6 - Circuito Equivalente do Motor de Indução implementado no Fluxo de Potência..... | 24 |
| 3.1 - Sistema Interligado Norte-Nordeste..... | 33 |
| 3.2 Composição das cargas do Estado do Maranhão (2005)..... | 36 |
| 3.3 Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico da ALUMAR..... | 37 |
| 3.4 Modelo equivalente de uma linha de cubas eletrolíticas..... | 38 |
| 3.5 Configuração Atual da modelagem da ALUMAR..... | 39 |
| 3.6 Configuração aprimorada da carga da ALUMAR..... | 41 |
| 3.7. Representação do sistema de distribuição da indústria..... | 43 |
| 4.1. Circuito Equivalente de Regime Permanente de Motor de Indução..... | 45 |
| 4.2. Circuito Equivalente de Regime Transitório de Motor de Indução..... | 45 |
| 4.3. Diagrama unifilar do sistema interligado Norte/Nordeste – 500 kV..... | 47 |
| 4.4. Fluxo de potência reativa do compensador síncrono - São Luís II..... | 49 |
| 4.5. Comportamento da tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II..... | 49 |
| 4.6. Fluxo de Mvar entre a barra de 500 kV e a barra da ALUMAR de 230 kV..... | 49 |
| 4.7. Fluxo de Mvar do compensador síncrono da área Maranhão - SE São Luís II..... | 52 |
| 4.8. Fluxo de Mvar entre a barra de 500 kV e a barra de conexão da carga da ALUMAR em 230 kV..... | 52 |
| 4.9. Comportamento dinâmico da tensão Barra de 500 kV da SE São Luís II..... | 53 |
| 4.10. Comportamento dinâmico da tensão Barra de 230 kV da SE São Luís II..... | 53 |
| 4.11. Fluxo de potência ativa entre a barra de 500 kV da SE São Luís II e a barra de 230 kV da ALUMAR..... | 54 |
| 4.12. Fluxo de potência ativa entre o barramento de 230 kV e a barra de conexão da sala de cubas 1 de 34,5 kV..... | 54 |

| | |
|--|----|
| 4.13. Comportamento dinâmico da tensão Barra da sala de cubas 1 da ALUMAR de 34,5 kV..... | 55 |
| 4.14. Fluxo de potência reativa entre as barras de 230 kV e a de sala de cubas 1 da ALUMAR de 34,5 kV..... | 55 |
| 4.15. Tensão terminal do grupo de motores..... | 57 |
| 4.16. Escorregamento do grupo de motores..... | 57 |
| 4.17. Consumo de potência reativa do grupo de motores..... | 57 |
| 4.18. Consumo de potência ativa do grupo de motores..... | 58 |
| 4.19. Tensão terminal do novo grupo de motores..... | 58 |
| 4.20. Escorregamento do novo grupo de motores..... | 59 |
| 4.21. Potência ativa do novo grupo de motores..... | 59 |
| 4.22. Potência reativa do grupo do novo grupo de motores..... | 59 |
| 4.23. Comportamento dinâmico da tensão no barramento dos motores..... | 60 |
| 4.24. Fluxo de potência ativa entre a barra da ALUMAR de 230 kV e o barramento dos motores..... | 61 |
| 4.25. Fluxo de potência reativa entre a barra da ALUMAR de 230 kV e o barramento dos motores..... | 61 |

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

Desde as últimas décadas, o problema da estabilidade de tensão tem merecido bastante atenção em função ao grande número de incidentes em diversos países envolvendo este fenômeno. Nos estudos envolvendo estabilidade de tensão, embora alguns mecanismos inerentes ao fenômeno ainda não estejam completamente entendidos, a representação da carga pode ter um impacto significativo nos resultados. A confiabilidade dos resultados envolvendo distúrbios severos pode estar fortemente relacionada com a resposta da carga, principalmente se esta apresentar características dinâmicas relevantes.

Algumas referências justificam a necessidade de se detalhar modelos de carga. A referência [1] atesta que, para uma análise precisa do fenômeno, e dependendo dos objetivos do estudo, em áreas industriais pode ser necessário representar motores e capacitores explicitamente. Já [2] menciona que o fenômeno da estabilidade de tensão depende de detalhes, particularmente das características da carga. Geralmente, o modelo de carga inclui os sistemas de subtransmissão e de distribuição que conectam os consumidores aos sistemas de transmissão e geração. Em poucas palavras, em estudos convencionais de fluxo de carga ou de estabilidade transitória angular, por exemplo, modelo de carga é representado como uma agregação dos efeitos da subtransmissão e da distribuição, incluindo os dispositivos/equipamentos neles presentes (transformadores, reguladores de tensão, capacitores, etc.).

Baseado nas observações acima, este trabalho apresenta uma proposta para a substituição dos atuais modelos usados em estudos no domínio do tempo, desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL [3], representando uma indústria de grande porte localizada no estado do Maranhão, para estudos de estabilidade de tensão. Para o desenvolvimento dos modelos propostos, essa pesquisa se baseou em investigações na literatura especializada, e em informações obtidas em campo. Vale ressaltar que os atuais modelos desenvolvidos pelo CEPEL resultaram de trabalhos de campo, já testados em estudos convencionais de fluxo de carga e estabilidade transitória

angular, apresentando excelentes resultados. Também, esses mesmos modelos já foram usados em estudos de estabilidade de tensão [4]. Foram justamente os resultados desses estudos que indicaram necessidade de melhoria.

1.2 Motivação

Se na barra de conexão entre o sistema de transmissão e o de subtransmissão a carga for modelada como um agregado, alguns efeitos relevantes ao fenômeno da estabilidade de tensão podem não ser capturados, principalmente se a carga for industrial e de grande porte, como no caso do presente trabalho. Um exemplo destes efeitos pode estar relacionado com as impedâncias referentes aos alimentadores da subestação principal, responsáveis pelo suprimento de energia às demais subestações, principalmente se estes forem longos e radiais. Ainda, impedâncias dos transformadores, a ação dos reguladores (ULTC) e dos controladores, e capacitores, são outros efeitos que, dependendo dos mecanismos inerentes ao cenário merecem uma modelagem mais detalhada.

Como já informado, o atual trabalho de pesquisa se baseia em modelagem de carga para estudos de estabilidade de tensão, carga essa inerente a uma indústria de grande porte. A demanda consumida por essa indústria estava em torno de 791 MW com previsão para 810 MW a partir de abril 2006. Além dessa demanda elevada, bancos de capacitores, motores de indução, fornos elétricos e conversores/inversores e controladores baseados em eletrônica de potência compõem a maior parcela dessa carga. Essas características, abordadas em detalhes no Capítulo 3, propícias a problemas de estabilidade de tensão, justificam o interesse em adequar, ou propor novos modelos para estudar esse fenômeno.

Um outro fator importante relacionado a essa indústria é que, localizada geograficamente em posição estratégica para transmissão de energia elétrica entre as regiões do País, com fluxos vindo do Sul e do próprio Norte (Hidroelétrica de Tucuruí), dependendo da resposta da carga industrial a um distúrbio severo no sistema e das ações de controle e de proteção para preservá-la, esse intercâmbio pode ser parcialmente ou totalmente perdido, prejudicando principalmente o fluxo para a região Nordeste. Alguns eventos reais e recentes comprovam esta observação, mas é interessante mencionar também que reforços na transmissão têm sido introduzidos pela concessionária local de transmissão desde o evento de 2002.

1.2.1 Dependência das Cargas com a Tensão

Os resultados dos estudos de estabilidade de tensão podem estar fortemente relacionados com as respostas das cargas à perturbações no sistema, sendo portanto necessário modelos que as representem adequadamente. Logo, são necessários modelos que tornem possível a representação adequada das cargas do sistema, reproduzindo o seu comportamento real. As características da carga têm importante influência no desempenho de um sistema elétrico em condições normais de operação e durante contingências, portanto um profundo conhecimento da carga é desejável a fim de que um estudo de estabilidade seja confiável. Infelizmente, porém, isso não tem se mostrado possível, devido à incerteza da composição da carga. Desta forma, torna-se necessário estudar o efeito de mudanças do ponto de operação, através da variação de cenários, nas características da carga de forma a determinar sua influência na estabilidade do sistema [5].

Durante um evento que tenha como conseqüência um afundamento de tensão, diversas cargas poderão ser desconectadas, devido a equipamentos de proteção, enquanto outras poderão solicitar maior suporte de reativo do sistema, levando a um quadro de instabilidade com abertura de linhas de interligação, muitas vezes com carregamento elevado. A fim de evitar a propagação de um colapso de grandes proporções, alguns sistemas têm definidos procedimentos ou esquemas de emergência envolvendo corte de carga. Isto permite uma recuperação das condições de operação visto que se reduz a possibilidade de atingir o ponto onde as dificuldades se tornam acumulativas. Diversos autores exploraram as características das cargas, e demonstraram que a representação da carga pode variar o limite de transferência de potência entre áreas em mais de 30%, e que, na maioria dos casos, a presença de motores de indução pode reduzir a estabilidade de um sistema elétrico de potência [6].

Nos estudos de regime permanente, a carga tanto ativa quanto reativa é representada através de potência constante não variando com a tensão. Para os estudos de estabilidade, porém, é necessário representar a dependência da carga com a tensão. Diversos testes foram realizados a fim de determinar uma expressão que traduzisse este comportamento. Para lâmpadas incandescentes, a potência ativa varia com a tensão aproximadamente na faixa de 1,6 ($P = V^{1,6}$), uma vez que a resistência do filamento varia com a temperatura e não há consumo de potência reativa. Aquecedores de água e

de ambientes, fogões elétricos, chuveiros elétricos e ferros de passar apresentam comportamento semelhante, com a potência ativa variando na faixa de 2,0 em relação à tensão ($P = V^{2,0}$). Os demais componentes da carga, cujas potências ativa e reativa variam de forma não linear com a tensão, têm sido exaustivamente pesquisados por diversos autores [5, 7, 8, 9, 10]. Assim, através de testes em laboratórios, foi possível determinar os parâmetros das equações de potência em relação à tensão dos diversos componentes da carga e traçar curvas correspondentes.

Além das dificuldades acima apresentadas, outros fatores contribuem mais ainda para dificultar a correta representação da dependência da carga com a tensão. Diversos componentes apresentam comportamento particular não contemplado nos programas disponíveis de estabilidade transitória. As lâmpadas a arco (fluorescentes, vapor de sódio, vapor de mercúrio) se extinguem quando a tensão cai abaixo de 70- 80% da tensão nominal e religam, às vezes, minutos após esta retornar aos patamares normais de operação. Motores síncronos e de indução tendem a desacelerar e sair de operação quando a tensão cai abaixo de 60-70% de seu valor nominal. Neste ponto a corrente reativa aumenta rapidamente, produzindo um efeito acumulativo no colapso do sistema. Todas essas dificuldades vêm sendo estudadas e superadas gradativamente, conforme aumenta a solicitação de maior confiabilidade nos estudos de planejamento. Estudos de pós-contingência também tem auxiliado muito compreensão do comportamento da carga face a um colapso de tensão e, conseqüentemente, na elaboração de modelos de carga mais realistas [5].

Os resultados das simulações no que diz respeito ao comportamento dinâmico têm sido bastante afetados pelo modelo de carga adotado, estudos de uma região a oeste dos Estados Unidos indicam que usando um modelo de carga com impedância constante a análise de estabilidade a pequeno sinal tende a ter um amortecimento superestimado, em torno de 25% quando comparado com um modelo de carga mais preciso. Simulações de estabilidade transitória no sistema de potência da China mostram que a potência de saída de uma planta industrial específica foi afetada de 4-6% dependendo do modelo de carga utilizado. Estudos do impacto da perda de linhas de transmissão que alimentam uma grande região mostram que há consideráveis diferenças quando aplicado um modelo de carga dinâmico ou estático [11].

Informações encontradas na literatura confirmam a importância da correta modelagem de carga para o estudo de estabilidade de tensão, enfatizando a importância dos motores de indução, sendo estas:

- Estudos sobre composição de carga revelam que os motores de indução geralmente constituem mais da metade da carga de um sistema de energia, representando aproximadamente 78% da carga de uma indústria, 37% residencial e 43% da energia comercial [12].

- Os motores apresentam uma velocidade de resposta comparável à velocidade de resposta dos dispositivos de controle de tensão, o que vem mostrar que o estudo dos fenômenos de estabilidade ligados a este tipo de carga só pode ser feito através de simulações dinâmicas [2].

- Os motores de indução podem atingir a instabilidade em um nível de tensão relativamente alto, ou seja, em um nível de tensão que normalmente não ocorreria instabilidade de tensão [13].

- Para um determinado nível de tensão do sistema há um torque máximo que pode ser desenvolvido pelo motor de indução. Se o torque da carga exceder este valor, ou devido a um aumento na carga ou mesmo devido a uma queda de tensão o motor pode entrar em instabilidade e reduzir ainda mais a tensão. Isto certamente levaria outros motores a perda de estabilidade e na seqüência a um possível colapso de tensão no sistema [14].

- Para pequenas variações de tensão (normalmente 5%), o modelo ZIP apresenta desempenho satisfatório, visto que para este ponto de operação as variáveis do sistema não apresentam variações significativas. Porém para grandes excursões de tensão, este modelo apresenta desempenho insatisfatório, principalmente para a componente reativa da potência [5].

- Os motores de indução apresentam um comportamento muitas vezes bastante adverso às cargas modeladas com potências constantes ou mesmo ZIP. Conforme relatado em [12] o sistema da Área do Rio de Janeiro quando submetido a uma queda de tensão o carregamento de potência ativa ficava abaixo do valor crítico esperado. No entanto, o carregamento de potência reativa observado durante este evento era bem maior que o usual. Modelando o sistema com motores de indução concluiu-se que essa discrepância observada entre os estudos de operações e as condições observadas no sistema devia-se ao fato que a representação da carga pelo modelo convencional ZIP nos estudos de fluxo de carga não capturam o fenômeno de afundamento de tensão.

- A correta modelagem da carga na determinação de esquemas de controle de emergência, possibilita operar o sistema com menores margens de erro, melhor

representando as restrições de operação e, conseqüentemente, permitindo uma melhor exploração do sistema [9].

- Com a atual tecnologia baseada em controladores lógicos programáveis, onde toda a lógica de atuação é baseada nos estudos das contingências com a atuação de medidas corretivas, torna-se premente uma melhor modelagem da carga do sistema a fim de evitar atuações incorretas [5].

1.3 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é, a partir de informações obtidas na literatura especializada, e informações obtidas em campo, propor e testar modelos para representar a carga de uma indústria de grande porte em estudos no domínio do tempo do fenômeno da estabilidade de tensão. Vale ressaltar que, não serão desenvolvidos novos modelos de carga, isto é, modelos ainda não encontrados na literatura. O que se pretende fazer aqui é, usando os recursos de modelagem disponíveis no programa computacional ANATEM [15], junto com as informações obtidas em campo, modificar a representação atual da carga, procurando incluir efeitos relevantes ao fenômeno, efeitos esses não representados na modelagem atual.

A fim de evitar um aumento desnecessário na complexidade dos modelos, as informações obtidas em campo são importantes para se limitar esta expansão. O aumento na complexidade desses modelos pode, além de influir negativamente no esforço computacional, acrescentar mais parâmetros cuja obtenção pode ser difícil.

A validação da nova modelagem é feita, inicialmente, comparando-se as condições iniciais (pré-distúrbio), com interesse particular no módulo e no ângulo da tensão na barra principal da indústria (Subestação de 230 kV), e nos fluxos de potência ativa e reativa chegando nessa barra. Em seguida, simula-se uma seqüência real de eventos comparando os resultados obtidos com informações registradas em relatórios técnicos do Operador Nacional do Sistema - ONS a partir de medições (osciloperturbógrafo) realizadas em diversos pontos do sistema elétrico [4].

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado na seguinte forma:

- Capítulo I – Apresentação.
- Capítulo II – Modelos de Carga – principais modelos de carga encontrados na literatura especializada. Modelos Estáticos – Exponencial e Polinomial; Modelos Dinâmicos - Motor de Indução; Modelagem de Motores de Indução em Estudos de Fluxo de Carga.
- Capítulo III – Descrição do Sistema Elétrico - O Sistema Interligado Nacional (SIN), Descrição e Modelagem Computacional da Carga Industrial.
- Capítulo IV – Simulações computacionais para validar o modelo proposto.
- Capítulo V – Conclusões e Recomendações.

CAPÍTULO 2

MODELOS DE CARGA

2.1. Conceituações e caracterizações

Conforme definição do IEEE [8], modelo de carga é uma representação matemática da relação entre a tensão no barramento (magnitude e frequência) e a potência (ativa ou reativa) ou a corrente que flui neste barramento. Diversos esforços têm sido feitos no sentido de aprimorar a representação da carga, tanto para estudos de fluxo de potência (regime permanente) e principalmente, para estudos no domínio do tempo (ou dinâmico). O comportamento da carga em qualquer barra do sistema é a resposta conjunta do comportamento de todos os elementos conectados a esta barra, diante de uma variação no ponto de operação do sistema. Embora seja possível a construção de modelo para cada componente da carga, o desafio da modelagem consiste em como representar todas as características dos diversos componentes através de um único modelo. Simplificações feitas nos modelos a fim de torná-los compatíveis com os programas disponíveis, por vezes levam a resultados não satisfatórios, podendo comprometer os resultados das análises, seja em regime-permanente ou no domínio do tempo.[5]

A observação do comportamento da carga diante de variações de tensão e/ou frequência, seja em campo ou em laboratório, levaram a classificação da carga em dois tipos: cargas estáticas e cargas que variam dinamicamente ao longo do tempo. Em [5] discute-se os modelos estáticos que representam as cargas em situações de regime permanente diante de variações sustentadas de tensão e frequência, conforme Equações 2.1 e 2.2, e para certos casos servem como aproximações para análises dinâmicas.

$$P = f(V, f) \quad 2.1$$

$$Q = g(V, f) \quad 2.2$$

Os modelos dinâmicos são compostos de equação algébricas e diferenciais (associadas às partes girantes das máquinas), cuja representação matemática é dada nas equações 2.3 e 2.4

$$P = f(P, V, f) \quad 2.3$$

$$Q = g(Q, V, f) \quad 2.4$$

2.2. Modelos Estáticos – Exponencial e Polinomial

O modelo estático, representado por relações algébricas, expressa a potência ativa e reativa de uma barra de carga em função da magnitude da tensão e frequência em qualquer instante do tempo. Este modelo é usado para representar cargas estáticas, tais como iluminação (lâmpadas incandescentes) e cargas puramente resistivas. Apesar de não responder adequadamente, muitas vezes este modelo é também usado como uma aproximação para cargas dinâmicas, porém o comportamento da componente reativa fica bastante comprometido, em termos de precisão. Este modelo tem sido usado, com boa aproximação, para representar cargas residenciais e comerciais.

O modelo estático representa a carga através de polinômio ou de outro tipo de função algébrica, como uma exponencial baseada na tensão e na frequência ou em seus desvios. A variação da tensão e da frequência dependerá da natureza do distúrbio: perdas de carga ou geração acarretarão altas variações de frequência e tensão, enquanto curtos-circuitos acarretarão severas quedas de tensão, sem que, contudo sejam registradas grandes variações na frequência. [5]

2.2.1. Modelo exponencial

O modelo estático exponencial pode ser expresso como uma relação das potências ativa e reativa em função da tensão. Matematicamente, este modelo pode ser expresso como:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad 2.5$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad 2.6$$

- O índice “0” significa as condições iniciais de operação;
- np e nq – expoentes da tensão das componentes ativa e reativa da carga no modelo exponencial.

2.2.1.1. Modelos do Tipo Potência, Corrente e Impedância Constante.

Para np e nq iguais a zero, o modelo representa o comportamento de uma carga de potência constante, ou seja, para qualquer valor de tensão o consumo da carga será sempre o mesmo.

Tendo np e nq iguais a 1 (um), o modelo representa o comportamento de uma carga tipo corrente constante, ou seja, para qualquer valor de tensão a carga consome sempre a mesma corrente.

Já para np e nq iguais a 2 (dois), o modelo representa o comportamento de uma carga tipo impedância constante, ou seja, para qualquer valor de tensão a carga apresenta sempre a mesma impedância. A representação da carga pelo modelo potência constante é a mais conservadora, visto que durante um evento em que ocorra um afundamento de tensão, haverá maior solicitação de corrente pela carga, a fim de manter a potência da carga constante. Esta elevação na corrente provocará nova queda de tensão e, conseqüentemente, nova elevação na corrente. Dependendo do nível da tensão e da solicitação de corrente pela carga, bem como das condições de carregamento do sistema, este processo poderá levar o sistema a uma condição de instabilidade de tensão. Por outro lado, o modelo do tipo impedância constante é o menos severo, visto que uma queda na tensão implica em uma queda na corrente solicitada pela carga, que por sua vez reduz o degraú de tensão. Este processo tem característica amortecedora que normalmente leva o sistema a condição de estabilidade.

2.2.2 Modelo Polinomial - ZIP

Classicamente, a representação estática da carga é feita através da combinação dos três modelos citados acima; impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P), também conhecido como Modelo ZIP (Figura 2.1).

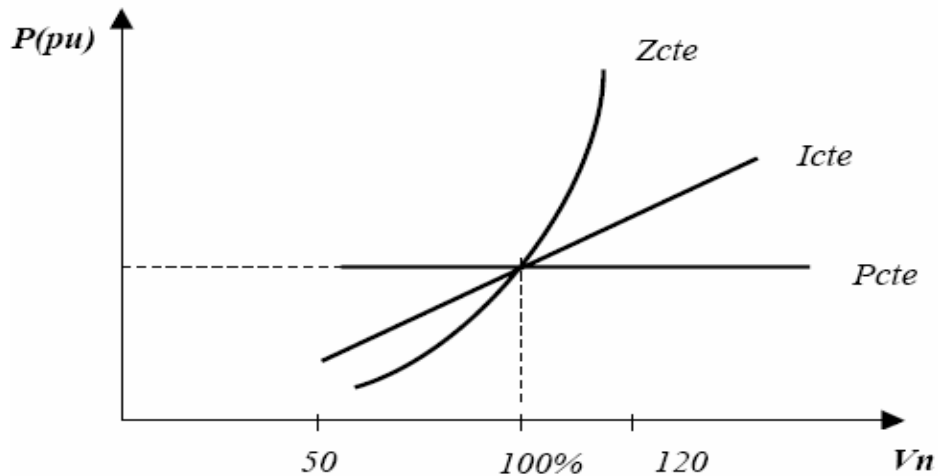


Figura 2.1 – Representação de Carga em Relação à Tensão.

A representação da carga através da combinação linear de potência, corrente e impedância constante pode ser expressa na forma polinomial como:

$$P = k_1 Z_c + k_2 I_c + k_3 P_c \quad 2.7$$

$$Q = k_4 Z_c + k_5 I_c + k_6 P_c \quad 2.8$$

onde os coeficientes k_1 e k_4 representam a parcela de impedância constante, k_2 e k_5 a parcela de corrente constante e k_3 e k_6 a parcela de potência constante das componentes ativa e reativa da carga, sendo: $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ e $k_4 + k_5 + k_6 = 1$ ou na forma exponencial em função da tensão:

$$P = P_o (aV^0 + bV^1 + cV^2) \quad 2.9$$

$$Q = Q_o(dV^0 + eV^1 + fV^2) \quad 2.10$$

2.3. Modelos Dinâmicos - Motor de Indução

O modelo dinâmico expressa a potência ativa e reativa da carga como função da magnitude da tensão e da frequência ao longo do tempo. As variações de tensão e frequência são representadas via equações diferenciais, normalmente usadas para representar esse modelo. Durante a operação do sistema elétrico em regime permanente as variações de tensão e frequência são pequenas e para estas condições a representação da carga pelo modelo estático mostra-se satisfatória. Porém, para estudos do tipo oscilações entre áreas e cenários de longo termo a representação adequada do comportamento dinâmico das cargas é importante para obtenção de resultados confiáveis. Nos estudos de estabilidade de tensão por exemplo, a margem de carregamento está fundamentalmente relacionada com a modelagem utilizada para a representação das cargas existentes em um dado sistema elétrico de potência [12]. A representação adequada das cargas tipo motores de indução, e não como modelos tipo impedância, corrente ou potência constante, é de essencial importância na análise do comportamento destes sistemas. Os motores de indução apresentam alto consumo de potência reativa durante as condições em que há queda de tensão e, portanto, merecem cuidadosa consideração nos estudos de segurança de tensão, principalmente quando parcelas significativas deste tipo de carga estão presentes em áreas críticas.

2.3.1. Modelagem de Motores de Indução

As equações básicas que representam um motor de indução trifásico com rotor bobinado, em função das fases a, b e c são transformadas em componentes d - q aplicando-se a Transformada de Park, sendo que os eixos direto d e em quadratura q estão em velocidade síncrona e que o eixo q está adiantado de 90° em relação ao eixo d . As equações de tensão e de enlace de fluxo, em valores instantâneos podem ser escritas da seguinte forma [12]:

Estator

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_s \lambda_{qs} \quad 2.11$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_s \lambda_{ds} \quad 2.12$$

$$\lambda_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} \quad 2.13$$

$$\lambda_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr} \quad 2.14$$

Rotor

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - s\omega_s \lambda_{qr} \quad 2.15$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + s\omega_s \lambda_{dr} \quad 2.16$$

$$\lambda_{dr} = L_{rr} i_{dr} + L_m i_{ds} \quad 2.17$$

$$\lambda_{qr} = L_{rr} i_{qr} + L_m i_{qs} \quad 2.18$$

O escorregamento do motor de indução é definido como:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad 2.19$$

Os índices s e r indicam grandezas relativas aos enrolamentos do estator e do rotor do motor de indução respectivamente.

a) Modelo Clássico Equivalente de Regime Permanente

Em regime permanente, todas as derivadas no tempo existentes, no estator e no rotor, em (2.11), (2.12), (2.15), (2.16) irão se anular, resultando:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} \quad 2.20$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} \quad 2.21$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - s \omega_s \lambda_{qr} \quad 2.22$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + s \omega_s \lambda_{dr} \quad 2.23$$

Fazendo-se a substituição de (2.13), (2.14), (2-17), (2-18) em (2-20) a (2-23), obtêm-se:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_s L_{ss} i_{qs} - \omega_s L_m i_{qr} \quad 2.24$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_s L_{ss} i_{ds} + \omega_s L_m i_{dr} \quad 2.25$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - s \omega_s L_{rr} i_{qr} - s \omega_s L_m i_{qs} \quad 2.26$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + s \omega_s L_{rr} i_{dr} + s \omega_s L_m i_{ds} \quad 2.27$$

em pu os valores eficazes e instantâneos são iguais. Fazendo-se a relação entre os valores instantâneos e eficazes:

$$\hat{I}_s = \frac{(i_{ds} + j i_{qs})}{\sqrt{2}} = I_{ds} + j I_{qs} \quad 2.28$$

$$\hat{I}_r = \frac{(i_{dr} + j i_{qr})}{\sqrt{2}} = I_{dr} + j I_{qr} \quad 2.29$$

$$\hat{V}_s = \frac{(v_{ds} + jv_{qs})}{\sqrt{2}} = V_{ds} + jV_{qs} \quad 2.30$$

$$\hat{V}_r = \frac{(v_{dr} + jv_{qr})}{\sqrt{2}} = V_{dr} + jV_{qr} \quad 2.31$$

Definindo as indutâncias:

$$L_{ss} - L_m = L_s \quad 2.32$$

$$L_{rr} - L_m = L_r \quad 2.33$$

pode-se reescrever (2-24) a (2-27), usando (2-28) a (2-33) e considerando que o produto ωL correspondem a uma reatância:

$$\hat{V}_s = R_s \hat{I}_s + jX_s \hat{I}_s + jX_m (\hat{I}_s - \hat{I}_r) \quad 2.34$$

$$\hat{V}_r = R_r \hat{I}_r + jX_r \hat{I}_r + jsX_m (\hat{I}_s - \hat{I}_r) \quad 2.35$$

no motor de indução os enrolamentos do circuito do rotor estão curto-circuitados, $\hat{V}_r = 0$ e considerando os eixos $d-q$ como referência angular do sistema, tem-se:

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX_s \bar{I}_s + jX_m (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \quad 2.36$$

$$0 = \frac{R_r}{s} \bar{I}_r + jX_r \bar{I}_r + jsX_m (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \quad 2.37$$

No circuito equivalente da Figura 2.2, todas as grandezas estão referidas no lado do estator, os sentidos das correntes mostradas são positivos quando opera como motor, e nesse caso, o escorregamento é positivo, onde P_{ag} é a potência transferida através do entreferro até o rotor.

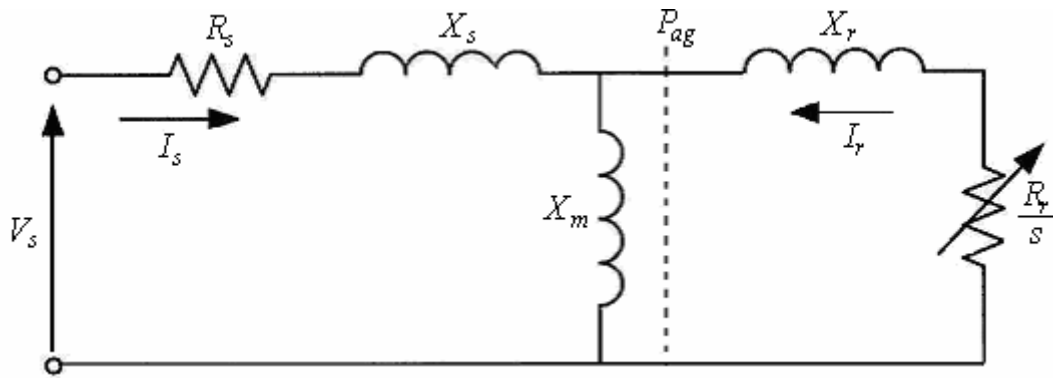


Figura 2.2 - Circuito Equivalente de Regime Permanente do Motor de Indução

b) Modelo Equivalente Considerando os Transitórios no Rotor

A escolha do modelo dinâmico incluindo os efeitos transitórios no rotor é bastante atraente, uma vez que resulta em uma representação da máquina por um modelo tipo fonte controlada através de uma reatância, à semelhança do que ocorre com as máquinas síncronas. Além disso, sua representação em regime permanente, com relação ao modelo clássico, apresenta vantagens para implementação no programa de fluxo de potência, pois este pode ser representado como um problema padrão com dois nós [12]. Para desenvolver o modelo dinâmico, são desprezados: os transitórios do estator, a saturação, a histerese e as correntes parasitas; e além disso, considera-se uma distribuição puramente senoidal para o fluxo magnético. No rotor, os enrolamentos estão curto-circuitados. Das equações (2.11) a (2.18), desprezando-se os transitórios do estator e substituindo-se as expressões (2.13), (2.14), (2.17) e (2.18), obtém-se [1]:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_s L_{ss} i_{qs} - \omega_s L_m i_{qr} \quad 2.38$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_s L_{ss} i_{ds} + \omega_s L_m i_{dr} \quad 2.39$$

$$0 = r_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - s\omega_s L_{rr} i_{qr} - s\omega_s L_m i_{qs} \quad 2.40$$

$$0 = r_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + s w_s L_{rr} i_{dr} + s w_s L_m i_{ds} \quad 2.41$$

De (2.17) e (2-18), chega-se a:

$$i_{dr} = \frac{\lambda_{dr} - L_m i_{ds}}{L_{rr}} \quad 2.42$$

$$i_{qr} = \frac{\lambda_{qr} + L_m i_{qs}}{L_{rr}} \quad 2.43$$

Substituindo-se (2.42) e (2.43) em (2.38) e (2.39), tem-se:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - w_s \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) i_{qs} - w_s \frac{L_m}{L_{rr}} \lambda_{qr} \quad 2.44$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + w_s \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) i_{ds} + w_s \frac{L_m}{L_{rr}} \lambda_{dr} \quad 2.45$$

Em (2.44) e (2.45), pode se definir que:

$$X'_s = w_s \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) = w_s L'_{ss} \quad 2.46$$

$$e'_d = -w_s \frac{L_m}{L_{rr}} \lambda_{qr} = -w_s \lambda'_{qr} \quad 2.47$$

$$e'_q = w_s \frac{L_m}{L_{rr}} \lambda_{dr} = w_s \lambda'_{dr} \quad 2.48$$

Substituindo (2.33) em (2.46), chega-se a:

$$X'_s = w_s \left(L_s + \frac{L_r L_m}{L_r + L_m} \right) = X_s + \frac{X_r X_m}{X_r + X_m} \quad 2.49$$

Substituindo (2.49) em (2.44) e (2.45), tem-se:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - X'_s i_{qs} + e'_d \quad 2.50$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + X'_s i_{ds} + e'_q \quad 2.51$$

De (2.42) e (2.43) em (2.40) e (2.41), obtém-se:

$$0 = r_r \left(\frac{\lambda_{dr} - L_m i_{ds}}{L_{rr}} \right) + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - sw_s L_{rr} i_{qr} - sw_s L_m i_{qs} \quad 2.52$$

$$0 = r_r \left(\frac{\lambda_{qr} - L_m i_{qs}}{L_{rr}} \right) + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + sw_s L_{rr} i_{dr} + sw_s L_m i_{ds} \quad 2.53$$

Multiplicando-se (2.52) e (2.53) por $\frac{L_m}{L_{rr}}$, tendo em conta (2.17) e (2.18), obtém-se:

$$\frac{d\lambda'_{dr}}{dt} = sw_s \lambda'_{qr} - \frac{r_r}{L_{rr}} \lambda'_{dr} + r_r \frac{L_m^2}{L_{rr}^2} i_{ds} \quad 2.54$$

$$\frac{d\lambda'_{qr}}{dt} = -sw_s \lambda'_{dr} - \frac{r_r}{L_{rr}} \lambda'_{qr} + r_r \frac{L_m^2}{L_{rr}^2} i_{qs} \quad 2.55$$

Tensão eficaz atrás da impedância transitória:

$$\bar{E}' = E'_d + jE'_q \quad 2.56$$

De (2.50) e (2.51), e considerando-se (2.28) a (2.31) e (2.56), chega-se a (2.57), que define o circuito transitório do motor de indução:

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX'_s \bar{I}_s + \bar{E}' \quad 2.57$$

De (2.57) monta-se o circuito da Figura 2.3:

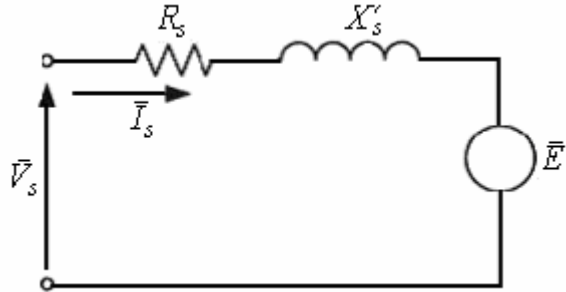


Figura 2.3 - Circuito Equivalente Transitório para o Motor de Indução

A partir de (2.54) e (2.55), e considerando-se que os fluxos enlaçados estão definidos em (2.47) e (2.48), obtêm-se:

$$\frac{de'_q}{dt} = -s\omega_s e'_d - \frac{r_r}{L_{rr}} e'_q + r_r \omega_s \frac{L_m^2}{L_{rr}^2} i_{ds} \quad 2.58$$

$$\frac{de'_d}{dt} = s\omega_s e'_q - \frac{r_r}{L_{rr}} e'_d - r_r \omega_s \frac{L_m^2}{L_{rr}^2} i_{qs} \quad 2.59$$

Definindo-se a constante de tempo transitória de circuito aberto, como o tempo utilizado até os transitórios no rotor desaparecerem quando o estator está em aberto, tem-se:

$$T'_0 = \frac{L_{rr}}{R_r} = \frac{X_r + X_m}{\omega_s R_r} \quad 2.60$$

De (2.39), tem-se:

$$X'_s = \omega_s L_{ss} - \omega_s \frac{L_m^2}{L_{rr}} \quad 2.61$$

Define-se a reatância de circuito aberto do rotor como sendo:

$$X = w_s L_{ss} = X_s + X_m \quad 2.62$$

Substituindo-se (2.62) em (2.61), obtêm-se:

$$X - X'_s = w_s \frac{L_m^2}{L_{rr}} \quad 2.63$$

Partindo de (2.58), (2.59), (2.60), e (2.63), e passando-se de valores instantâneos para valores eficazes, tem-se:

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_0} \left[E'_q - (X - X'_s) I_{ds} \right] - s w_s E'_d \quad 2.64$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_0} \left[E'_d + (X - X'_s) I_{qs} \right] + s w_s E'_q \quad 2.65$$

ou ainda que:

$$\frac{d\bar{E}'}{dt} = -\frac{1}{T'_0} \left[\bar{E}' - j(X - X'_s) \bar{I}_s \right] - j s w_s \bar{E}' \quad 2.66$$

As equações (2.64), (2.65) e (2.66) representam os transitórios elétricos no rotor. Para obterem-se as condições de regime permanente, consideram-se nulas as derivadas no tempo:

$$0 = -\frac{1}{T'_0} \left[\bar{E}' - j(X - X'_s) \bar{I}_s \right] - j s w_s \bar{E}' \quad 2.67$$

A partir da Equação (2.67) se deduz a expressão para o cálculo da corrente:

$$\bar{I}_s = \frac{T'_0 s w_s \bar{E}'}{(X - X'_s)} + \frac{\bar{E}'}{j(X - X'_s)} \quad 2.68$$

E de (2.68) monta-se o circuito da Figura 2.4:

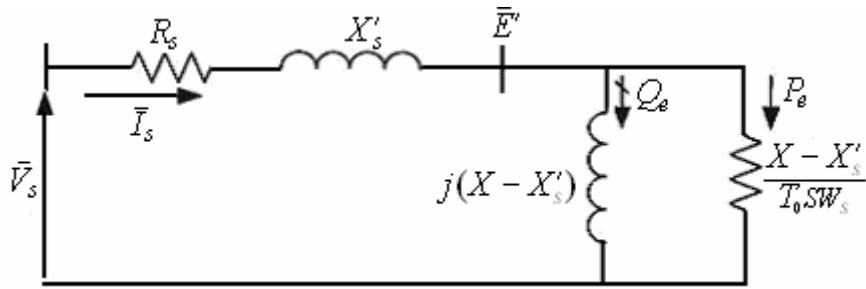


Figura 2.4 - Circuito Equivalente do Motor de Indução em Regime Permanente Considerando os Transitórios no Rotor

O motor de indução em regime permanente apresenta uma resistência efetiva expressa pela parte real de (2.68). A potência elétrica ativa dissipada nesta resistência corresponde à potência elétrica entregue ao rotor no entreferro da máquina. A tensão \tilde{E}' interna se relaciona com a tensão nos terminais do motor por uma impedância $Z = R_s + jX'_s$. Na barra interna aplica-se uma derivação indutiva $Y = \frac{1}{j(X - X'_s)}$ e uma carga $P_e = P_{mec}$:

$$P_{mec} = P_e = \frac{T_0 s W_s |\tilde{E}'|^2}{(X - X'_s)} \quad 2.69$$

Uma vez resolvido o caso do fluxo de potência, dispõe-se dos valores iniciais de \tilde{V}_s e \tilde{E}' . O valor de escorregamento do motor pode ser calculado pela equação:

$$s = \frac{(X - X'_s) P_{mec}}{T_0 s W_s |\tilde{E}'|^2} \quad 2.70$$

Este modelo está representado na Figura 2.5.

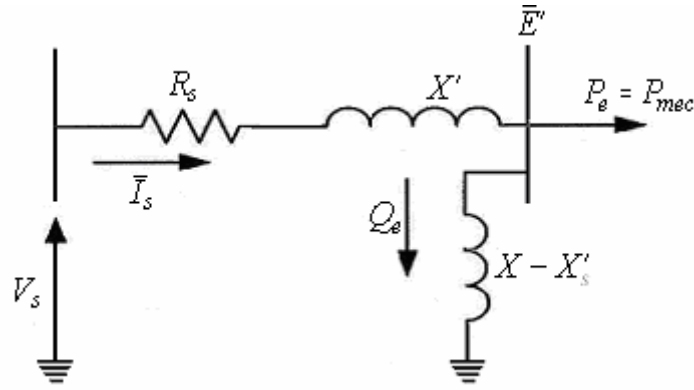


Figura 2.5 – Circuito Equivalente do Motor de Indução para Fluxo de Potência

A equação diferencial que expressa o comportamento mecânico do rotor do motor de indução é dada por:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad 2.71$$

O conjugado eletromagnético pode ser determinado pela expressão:

$$T_e = \lambda'_{qr} I_{ds} - \lambda'_{dr} I_{qs} \quad 2.72$$

Substituindo as expressões (2.47) e (2.48) em (2.72), tem-se:

$$T_e = \frac{E'_d I_{ds} - E'_q I_{qs}}{\omega_s} \quad 2.73$$

Sendo a potência complexa S_e calculada como:

$$S_e = \bar{E} \bar{I}_s^* \quad 2.74$$

E P_e a parte real da potência complexa S_e . O valor de P_e é dado por:

$$P_e = E'_d I_{ds} + E'_q I_{qs} \quad 2.75$$

Da definição de torque ou pela comparação das expressões (2.73) e (2.75), obtêm-se:

$$P_e = T_e \omega_s \quad 2.76$$

Atendendo as condições de equilíbrio (regime permanente), de acordo com a Equação (2.71), tem-se $T_m = T_e$ para um escorregamento constante e a potência mecânica no eixo do motor é dada por:

$$P_m = T_m \omega_r \quad 2.77$$

Pode-se estabelecer a relação entre a potência elétrica P_e e a potência mecânica P_m como:

$$P_e = \frac{P_m}{1-s} \quad 2.78$$

Uma outra expressão que deve ser tratada com maiores detalhes é a do conjugado mecânico do motor (T_m). Esta grandeza é dependente da velocidade angular do rotor e tem representações polinomiais e exponenciais como [1]:

$$T_m = T_0 (\bar{\omega}_r)^m \quad 2.79$$

Ou

$$T_m = T_0 (A' \bar{\omega}_r^2 + B' \bar{\omega}_r + C') \quad 2.80$$

Pode-se também representar o conjugado mecânico em função do escorregamento no rotor. Logo, as expressões obtidas são:

$$T_m = T_0 (1-s)^m \quad 2.81$$

$$T_m = T_0 (a's^2 + b's + c') \quad 2.82$$

2.4 Modelagem de Motores de Indução em Estudos de Fluxo de Carga [12]

A modelagem proposta da carga tipo motor de indução no problema de fluxo de carga necessita de equações que permitam obter os valores de E , P_{mec} e s para uma dada potência ativa total P_{el} (ou P_{mot}) consumida, em um dado valor V de tensão na barra terminal. Também é necessário calcular o valor da potência reativa consumida pelo motor para que seja adequado o valor da potência reativa a ser modelada como potência constante na barra do motor. Para isso, são necessárias duas etapas no processo de obtenção das equações, apresentadas a seguir e baseadas no circuito equivalente do motor de indução adotado neste estudo e a partir da solução das equações, são obtidos os valores iniciais dos modelos. Na segunda etapa é utilizado um modelo de motor de indução típico sendo considerado através de uma equação adicional a solução do fluxo de carga, como realizada na representação de controles, aumentando-se a dimensão da matriz Jacobiana [12].

a. Etapa 1

Baseado no circuito da Figura 2.6, mostrado abaixo, pode-se deduzir as equações (2-83) e (2-84), e definir a equação (2-85), que representa a corrente consumida pela carga P_{mec} .

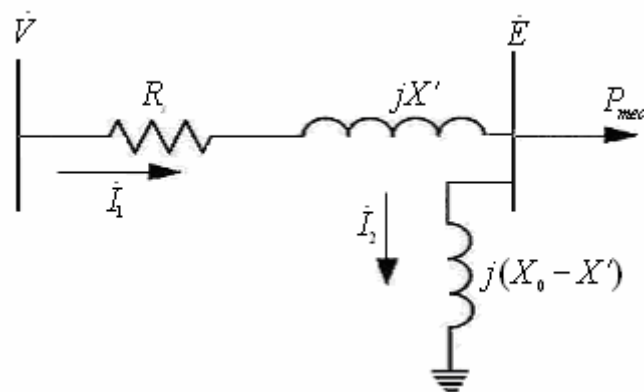


Figura 2.6 - Circuito Equivalente do Motor de Indução implementado no Fluxo de Potência.

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V} - \dot{E}}{R_s + jX'} \quad 2.83$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{j(X_0 - X')} \quad 2.84$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \quad 2.85$$

A expressão que define a potência aparente consumida pela barra interna do modelo do motor de indução é dada pela equação (2.86)

$$S_{mec} = \dot{E}(\dot{I}_3)^* = \dot{E}(\dot{I}_1 - \dot{I}_2)^* = \dot{E}\dot{I}_1^* - \dot{E}\dot{I}_2^* \quad 2.86$$

Substituindo os valores das equações (2.83) e (2.84) na equação (2.86), obtém-se a Equação (2.87).

$$S_{mec} = \frac{\dot{E}\dot{V}^* - \dot{E}^2}{R_s^2 + X'^2}(R_s + jX') - j\frac{\dot{E}^2}{(X_0 - X')} \quad 2.87$$

Assumindo a tensão complexa E da barra interna na forma retangular, onde θ é o ângulo da tensão da barra interna, obtêm-se as equações (2.88), (2.89), (2.90) e (2.91).

$$S_{mec} = \frac{(E\cos\theta + jE\sin\theta)V - E^2}{R_s^2 + X'^2}(R_s + jX') - j\frac{\dot{E}^2}{(X_0 - X')} \quad 2.88$$

$$S_{mec} = \frac{VE\cos\theta - E^2 + jVE\sin\theta}{R_s^2 + X'^2}(R_s + jX') - j\frac{\dot{E}^2}{(X_0 - X')} \quad 2.89$$

$$S_{mec} = \frac{VER_s\cos\theta - E^2R_s + jVER_s\sin\theta + jVEX'\cos\theta}{R_s^2 + X'^2} + \frac{-jE^2X' - VEX'\sin\theta}{R_s^2 + X'^2} - j\frac{\dot{E}^2}{(X_0 - X')} \quad 2.90$$

$$S_{mec} = \left(\frac{VER_s \cos\theta - E^2 R_s - VEX' \sin\theta}{R_s^2 + X'^2} \right) + j \left(\frac{VER_s \sin\theta + VEX' \cos\theta - E^2 X'}{R_s^2 + X'^2} - \frac{\dot{E}^2}{(X_0 - X')} \right) \quad 2.91$$

Separando a parte real e imaginária da Equação (2.91), define-se o valor de P_{mec} igualando-o a parte real da equação, resultando na Equação (2.92).

$$P_{mec} = \frac{VER_s \cos\theta - E^2 R_s - VEX' \sin\theta}{R_s^2 + X'^2} \quad 2.92$$

Reordenando os termos da Equação (2.92) em função de $\sin\theta$ e $\cos\theta$, tem-se a Equação (2.93).

$$\frac{VER_s}{R_s^2 + X'^2} \cos\theta - \frac{VEX'}{R_s^2 + X'^2} \sin\theta = P_{mec} + \frac{E^2 R_s}{R_s^2 + X'^2} \quad 2.93$$

Reescrevendo a equação (2-93), agrupando-se os termos que multiplicam $\sin\theta$ e $\cos\theta$, e o termo independente à direita da igualdade, a equação se transforma em:

$$A_{11} \cos\theta + A_{12} \sin\theta = B_1 \quad (2-95)$$

onde A_{11} , A_{12} e B_1 estão definidos em (2-96), (2-97) e (2-98)

$$A_{11} = \frac{VER_s}{R_s^2 + X'^2} \quad (2-96)$$

$$A_{12} = -\frac{VEX'}{R_s^2 + X'^2} \quad (2-97)$$

$$B_1 = P_{mec} + \frac{E^2 R_s}{R_s^2 + X'^2} \quad (2-98)$$

da equação de S_{mec} em (2-91), define-se o valor de Q_{mec} igualando-se a parte imaginária da equação. Isto resulta na equação definida em (2-99)

$$Q_{mec} = \frac{VER_s \sin\theta + VEX' \cos\theta - E^2 X'}{R_s^2 + jX'^2} - \frac{E^2}{(X_0 - X')} = 0 \quad (2-99)$$

Reordenando os termos da Equação (2.99) em função de como realizado para a Equação (2-92), obtêm-se (2.100). Agrupando-se os termos que multiplicam $\sin\theta$ e $\cos\theta$, e o termo independente à direita da igualdade, obtêm-se a Equação (2.101) e definem-se as expressões que estão em (2.102), (2.103) e (2.104).

$$\frac{VEX'}{R_s^2 + X'^2} \cos\theta + \frac{VER_s}{R_s^2 + X'^2} \sin\theta = \frac{E^2 X'}{R_s^2 + X'^2} + \frac{E^2}{(X_0 - X')} \quad 2.100$$

$$A_{21} \cos\theta + A_{22} \sin\theta = B_2 \quad 2.101$$

$$A_{21} = \frac{VEX'}{R_s^2 + X'^2} \quad 2.102$$

$$A_{22} = \frac{VER_s}{R_s^2 + X'^2} \quad 2.103$$

$$B_2 = \frac{E^2 X'}{R_s^2 + X'^2} + \frac{E^2}{(X_0 - X')} \quad 2.104$$

Pode-se notar observando as equações (2-95) e (2.101) que é possível montar um sistema algébrico de equações cujas variáveis são $\sin\theta$ e $\cos\theta$. O objetivo da montagem e resolução deste sistema é retirar a dependência do valor de θ das equações de P_{mec} e Q_{mec} e assim encontrar uma expressão única que seja função dos valores de E e P_{mec} . Logo, o sistema de equações, montado a partir de (2-95) e (2.101), na forma matricial fica conforme mostrado na Equação (2.100).

$$\begin{bmatrix} A_{12} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad 2.105$$

A solução para $\sin\theta$ obtido a partir do sistema em (2.105) está na expressão (2.106) abaixo:

$$\text{sen}\theta = \frac{B_2 A_{11} - A_{21} B_1}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}} \quad 2.106$$

Substituindo os valores de A_{11} , A_{12} , B_1 , A_{21} , A_{22} e B_2 conforme definido respectivamente em (2-96), (2-97), (2-98), (2.102), (2.103), e (2.104), em (2.106), obtêm-se as expressões (2.107), (2.108), (2.109) e (2.110).

$$B_2 A_{11} = \frac{VER_s}{R_s^2 + X'^2} \left(\frac{E^2 X'}{R_s^2 + X'^2} + \frac{E^2}{(X_0 - X')} \right) \quad 2.107$$

$$A_{21} B_1 = \frac{VEX'}{R_s^2 + X'^2} \left(P_{mec} + \frac{E^2 R_s}{R_s^2 + X'^2} \right) \quad 2.108$$

$$A_{11} A_{22} = \left(\frac{VER_s}{R_s^2 + X'^2} \right)^2 \quad 2.109$$

$$A_{12} A_{21} = - \left(\frac{VEX'}{R_s^2 + X'^2} \right)^2 \quad 2.110$$

Subtraindo os valores de (2.107) e (2.108), obtêm-se o valor do numerador da expressão definida em (2.106). Esta expressão está a seguir definida em (2.111).

$$B_2 A_{11} - A_{21} B_1 = \frac{VE}{R_s^2 + X'^2} \left(\frac{E^2 R_s}{(X_0 - X')} - P_{mec} X' \right) \quad 2.111$$

Subtraindo-se os valores de (2.109) e (2.110), obtêm-se o valor do denominador da expressão definida em (2.106). Esta expressão está a seguir definida em (2.112).

$$A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21} = \frac{(VE)^2}{(R_s^2 + X'^2)} \quad 2.112$$

Através das expressões (2.111) e (2.112), obtêm-se o valor de $\text{sen}\theta$ em (2.113)

$$\text{sen}\theta = \frac{E^2 R_s - P_{mec} X' (X_0 - X')}{VE (X_0 - X')} \quad 2.113$$

A solução para $\text{cos}\theta$, obtido a partir do sistema em (2.105) está na expressão (2.114) abaixo:

$$\text{cos}\theta = \frac{B_1 A_{22} - A_{12} B_2}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}} \quad 2.114$$

Realizando o mesmo procedimento acima obtemos:

$$\text{cos}\theta = \frac{P_{mec} R_s (X_0 - X') + E^2 X_0}{VE (X_0 - X')} \quad 2.115$$

Da relação trigonométrica $\text{sen}^2\theta + \text{cos}^2\theta$, obtém-se:

$$\frac{(E^2 R_s - P_{mec} X' (X_0 - X'))^2}{V^2 E^2 (X_0 - X')^2} + \frac{(P_{mec} R_s (X_0 - X') + E^2 X_0)^2}{V^2 E^2 (X_0 - X')^2} - 1 = 0 \quad 2.116$$

Resultando na Equação (2.117), que relaciona a tensão interna (E), a potência ativa P_{mec} absorvida na barra e a tensão da barra terminal do motor de indução.

$$E^4 (R_s^2 + X_0^2) + E^2 (2R_s P_{mec}^2 - V^2) (X_0 - X')^2 + P_{mec}^2 (R_s^2 + X_0^2) (X_0 - X')^2 = 0 \quad 2.117$$

b. Etapa 2

Baseado no circuito da Figura 2.6 mostrado no item anterior, nas equações (2-84) e (2-85), e pela definição das equações (2.118) que deduz a expressão para potência elétrica total consumida na barra terminal do motor, (2.119) que define a expressão para a corrente I_3 em função de R_e e (2.120) que mostra a equação do cálculo da resistência

R_e , que representa a carga mecânica no rotor, obtêm-se uma nova equação que relaciona P_{el} , E e P_{mec} .

$$P_{el} = R_s I_1 I_1^* + P_{mec} \quad 2.118$$

$$I_3 = \frac{\dot{E}}{R_e} \quad 2.119$$

$$R_e = \frac{E^2}{P_{mec}} \quad 2.120$$

Substituindo-se na Equação (2-85) os valores das Equações em (2-84) e (2.119) e representando a tensão complexa E na forma retangular, obtêm-se a Equação (2.121).

$$I_1 = -j \frac{E_r + jE_i}{(X_0 - X')} + \frac{E_r + jE_i}{R_e} = \frac{E_i - jE_r}{(X_0 - X')} + \frac{E_r + jE_i}{R_e} \quad 2.121$$

Multiplicando a Equação (2.121) pelo seu conjugado:

$$I_1 I_1^* = \frac{E^4 + (X_0 - X')^2 P_{mec}^2}{E^2 (X_0 - X')^2} \quad 2.122$$

Substituindo o valor da Equação (2.122) na Equação (2.118):

$$P_{el} = R_s \frac{E^4 + (X_0 - X')^2 P_{mec}^2}{E^2 (X_0 - X')^2} + P_{mec} \quad 2.123$$

O desenvolvimento da Equação (2.123) resulta na obtenção da Equação (2.124) que relaciona as variáveis P_{el} , E e P_{mec} . no modelo de motor de indução adotado, representado pela Figura 2.6.

$$P_{mec}^2 R_s (X_0 - X')^2 + P_{mec} E^2 (X_0 - X')^2 + E^4 R_s - P_{el} E^2 (X_0 - X')^2 = 0 \quad 2.124$$

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO E MODELAGEM DA CARGA INDUSTRIAL

3.1 Introdução

O Capítulo anterior apresentou alguns modelos de carga encontrados na literatura divididos basicamente em dois grupos: os estáticos representados por equações algébricas e os dinâmicos representados por equações diferenciais.

O presente Capítulo apresenta as principais etapas envolvidas na proposta de modelagem de carga para a indústria de alumínio – ALUMAR. Alguns aspectos interessantes relacionados ao sistema elétrico da ELETRONORTE também são abordados.

3.2 O Sistema Interligado Nacional (SIN)

O Consórcio de Alumínio do Maranhão, ALUMAR, é uma indústria de produção de alumina e alumínio, possuindo uma Refinaria e uma Redução (processo de eletrólise), sendo sua representação bastante importante em estudos que envolvem o Sistema Interligado Nacional (SIN), principalmente nas regiões Norte-Nordeste.

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, mais conhecido como Sistema Interligado Nacional (SIN), é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de grandes usinas hidrelétricas e com centenas de agentes geradores, transmissores, distribuidores e consumidores livres, divididos nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte do país. Devido ao seu tamanho e características é considerado único em âmbito mundial. Atualmente possui 82.100 MW de capacidade instalada, 80.000 km de rede básica de transmissão, 815 circuitos e 321 subestações. Um dos sistemas interligados que compõe o SIN, é o Sistema Norte-Nordeste que se estende por toda a região Nordeste e alcança áreas

limitrofes das regiões Norte e Centro-Oeste. A área situada na região Norte compreende a área de atuação da ELETRONORTE, sendo a o restante, área de atuação da CHESF.

O Sub-sistema Interligado Norte-Nordeste

Na região Norte, no rio Tocantins, está localizada a maior usina hidrelétrica em operação totalmente brasileira, a Usina de Tucuruí, possuindo no final do ano de 2004 dezessete turbinas em operação, as quais são capazes de gerar 6.125 MW. Após a ampliação da usina, prevista para 2006, serão postas em operação mais 11 turbinas totalizando a capacidade instalada em 8370 MW. Essa hidrelétrica fornece energia a grandes consumidores industriais, tais como a ALUMAR e a ALBRAS, além de outros consumidores industriais, como a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e às concessionárias regionais de energia, CELPA, CEMAR e CELTINS. Além disso, exporta energia para as regiões Nordeste e Sul, através das interligações Norte-Nordeste e Norte-Sul. Na Figura 3.1 mostra-se o diagrama do sistema interligado Norte-Nordeste.

Como a geração do subsistema Norte é distante dos centros consumidores, faz-se necessário o transporte dessa energia por longas distâncias, em sua maioria através de linhas de transmissão de 500 kV, as quais somam hoje 2.721 km de extensão. Nas subestações próximas às cargas o nível de tensão de transmissão é geralmente reduzido para 230 kV, somando hoje 798 km de linhas de transmissão nesse nível de tensão. Estas linhas de transmissão apresentam vários tipos de compensação de potência reativa, de forma a tornar mais econômica a transmissão e melhorar o comportamento do sistema durante distúrbios transitórios.

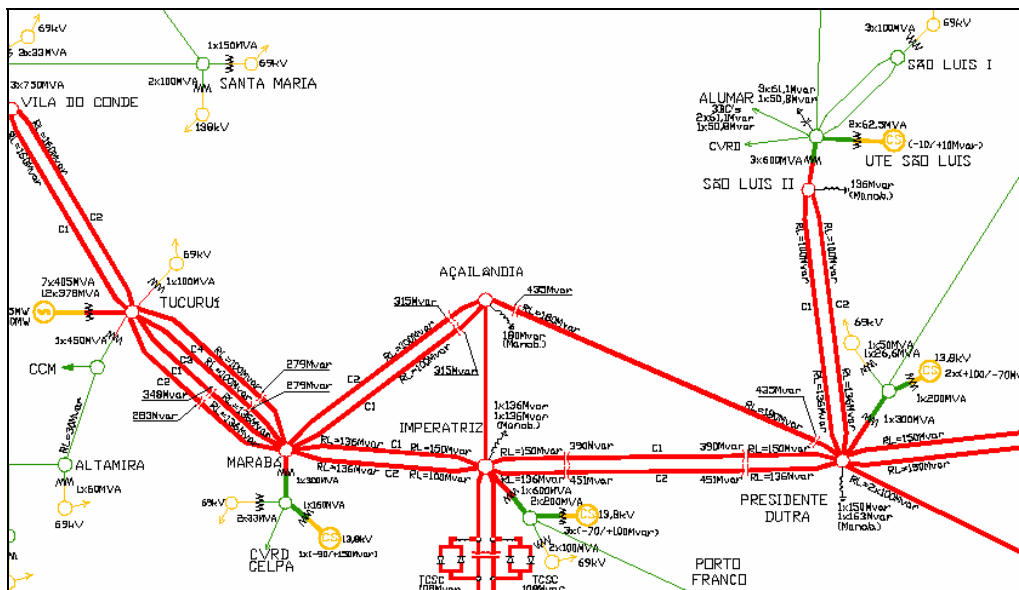


Figura 3.1 - Sistema Interligado Norte-Nordeste

O subsistema Norte possui diversos tipos de compensação de potência reativa, desde os mais comuns, como capacitores série e reatores shunts, até dispositivos mais modernos, como os dispositivos FACTS. Os capacitores série estão instalados em quase todas as linhas de transmissão de 500 kV, principalmente nos trechos que compreendem as subestações de Marabá, Imperatriz, Açailândia e Presidente Dutra, além da Linha Norte - Sul. Tais capacitores têm o objetivo de reduzir a impedância total das linhas e desta forma, aumentar a sua capacidade de transmissão e a estabilidade do sistema, diminuindo as necessidades de controle da tensão, pois reduz a queda de tensão ao longo da linha, melhorando a divisão de potência entre linhas, reduzindo as perdas globais do sistema, fazendo com que haja economia nos custos, quando comparados com alternativas tecnicamente possíveis.

Outros dispositivos bastante utilizados são os reatores em derivação (shunts). Estes equipamentos têm a função de melhorar a regulação das linhas de transmissão através da redução do efeito capacitivo das linhas em carga leve, além de reduzir as sobretensões resultantes de surtos de manobra. Os reatores podem ser manobráveis, conectados às linhas de transmissão ou aos barramentos através de disjuntores, ou serem conectados permanentemente a estes através de chaves seccionadoras. Os reatores de linha estão presentes em todo o sistema de transmissão de 500 kV do subsistema Norte, enquanto reatores de barra manobráveis estão instalados nas subestações de São Luís II, Presidente Dutra, Imperatriz, Açailândia, Colinas e Miracema. Os capacitores em

derivação são outros dispositivos de compensação utilizados no subsistema Norte, especialmente em localizações do sistema onde há a presença de grandes cargas, como na subestação de São Luís II da Eletronorte, com o intuito de prover suporte de potência reativa aos grandes consumidores. Tais capacitores são instalados com o objetivo de aumentar a tensão nos terminais das cargas, melhorar a regulação de tensão, reduzir as perdas na transmissão e o custo da operação, e conseqüente diminuição do número de linhas para o transporte de potência reativa. Com relação à outros dispositivos de compensação semelhantes, como os compensadores síncronos, compensadores estáticos controlados por tiristores, os bancos de capacitores em derivação têm a vantagem de apresentar menor custo de instalação e menor complexidade de manutenção.

Compensadores síncronos são utilizados, atualmente, em algumas subestações do subsistema Norte, sendo estas: São Luís II, Presidente Dutra, Imperatriz, Marabá e Vila do Conde. Estes equipamentos são na realidade motores síncronos que operam em vazio, sendo construídos sem qualquer extensão dos eixos, projetados para correção de fator de potência. Apresentam vantagens em relação aos capacitores em derivação, como a possibilidade de fornecer tanto potência reativa indutiva quanto capacitiva, sendo o controle feito através da sua excitação. Estes compensadores são conectados ao sistema através de transformadores de potência, devido aos níveis de operação destes equipamentos serem inferiores aos níveis de tensão de transmissão.

Além das formas de compensação citadas anteriormente, o subsistema Norte possui um dispositivo FACTS, o TCSC, instalado na subestação de Imperatriz – MA após a interligação deste subsistema com o subsistema Sul no ano de 1999. Este equipamento opera como um compensador de oscilações eletromecânicas entre os dois subsistemas interligados.

3.3 Descrição do Sistema Elétrico Industrial

A área da ALUMAR é extremamente compensada e carregada, sendo que sua composição de cargas apresenta características especiais, propícias a problemas de controle de tensão. As salas de cubas, como são conhecidas as cargas mais relevantes da ALUMAR, consumiam juntas na época da elaboração deste trabalho, em torno de 650 MW. Atualmente este consumo é de aproximadamente 756 MW. Essas salas são equipadas com retificadores que fazem a conversão ac-cc para suprimento dos fornos elétricos. Além das salas de cubas, a ALUMAR possui uma composição de motores de

indução que consumiam aproximadamente 29 MW (SE Refinaria). Atualmente, tem-se na Redução - 32MW/22Mvar e na Refinaria - 35MW/25Mvar. Essa composição de cargas está modelada nos estudos em regime permanente por um elo de corrente contínua com parcelas tipo corrente e potência constante [3]. Juntando-se a essas características das cargas propícias a problemas de estabilidade de tensão, tem-se o uso massivo de capacitores cujo objetivo principal é manter um nível de tensão adequado para a operação do elo de corrente contínua (disparo dos tiristores). A compensação capacitiva não está restrita apenas as barras próximas a ALUMAR e pertencentes ao sistema ELN-Ma, também existem bancos de capacitores localizados na parte interna dessa indústria. Justifica-se, portanto, o interesse em investigar problemas de controle de tensão nesta área. A Figura 3.2 mostra uma comparação atualizada entre a carga da ALUMAR e outras cargas importantes do sistema ELN-Ma.

A energia elétrica fornecida a ALUMAR provém da UHE de Tucuruí, sendo transmitida em 500 kV até a subestação operada pela ELETRONORTE (SE - São Luis II). Nessa subestação é realizada a Redução do nível de tensão para 230 kV e transmitida para a ALUMAR através de duas linhas de transmissão, identificadas como Circuito 1 (C1) e como Circuito 2 (C2), respectivamente. No trecho entre a SE São Luis II e a ALUMAR há uma bifurcação dos dois circuitos, com dois ramos para a Redução (Linhas 1 e 2) e outros dois para a Refinaria (Linha 4 e 5). As Linhas 1 e 2 vão para a subestação principal da Redução (SE-112Y) e as Linhas 4 e 5 para a subestação principal da Refinaria (SE-112X), conforme ilustrado na Figura 3.3.

A SE-112Y é responsável pelo fornecimento de energia às Salas de Cubas e aos circuitos auxiliares da Redução e aos seus próprios circuitos auxiliares (iluminação, ventiladores, carregador de baterias, bombas, etc.). Todos os circuitos auxiliares são supridos por dois transformadores de 50MVA de 230kV/13,8kV. As Salas de Cubas são as principais cargas da indústria, correspondendo a aproximadamente 90% do consumo total. O processo da eletrólise é feito via corrente contínua e como o fornecimento para a ALUMAR é em corrente alternada, é necessário fazer a retificação. Para cada Sala de Cubas existe um transformador abaixador de 230kV para 34,5kV, com potências variando de 225 MVA até 343 MVA. Normalmente, as Salas de Cubas 1, 2 e 3 são alimentadas pelos transformadores T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente. Entretanto, no caso de uma eventual falha ou manutenção em um deles, um dos dois transformadores reservas (T_0 e T_{00}) passa a substituí-los. Os transformadores T_1 e T_3 estão conectados a Linha 1 de 230kV e o transformador T_2 e o T_0 está conectado a Linha 2. O T_{00} é uma exceção,

possuindo um sistema que permite sua alimentação pela Linha 1 ou pela Linha 2. Conectados em série com cada transformador abaixador, os transformadores reguladores (TR) de 34,5kV / 34,5kV \pm 10% controlam a tensão e a corrente na Sala de Cubas. Após abaixar os níveis de tensão a regulagem e a retificação são feitas através de 6 (seis) pontes retificadoras de 45kA (6 pulsos) conectadas em paralelo de forma a garantir uma menor corrente circulando em cada ponte. São usados transformadores com conexões especiais (Zig-Zag ou delta expandido) para fornecer diferentes defasagens resultando em um cancelamento harmônico de corrente no primário. Além disso, em paralelo com os retificadores existe um filtro de harmônicos de 19,2 Mvar sintonizado para a 5ª ordem, cuja função é melhorar o fator de potência.

Para regulagem do nível de tensão nas barras da ALUMAR e de algumas SE's da área do Maranhão, na SE-112Y estão instalados três bancos de capacitores em 230kV, BC-1, BC-2 e BC-3, cada correspondente a uma Sala de Cubas. Existe ainda na barra de 230kV da SE São Luis II outros dois bancos.

Já a Refinaria é suprida através da subestação SE-112X, que por sua vez supre quadros de 13,8 kV, fornecendo assim energia elétrica aos transformadores das subestações de área da Refinaria, Porto e Retroporto. Para correção do fator de potência da Refinaria, estão instalados na barra de 13,8kV dois bancos de capacitores de 12Mvar cada.

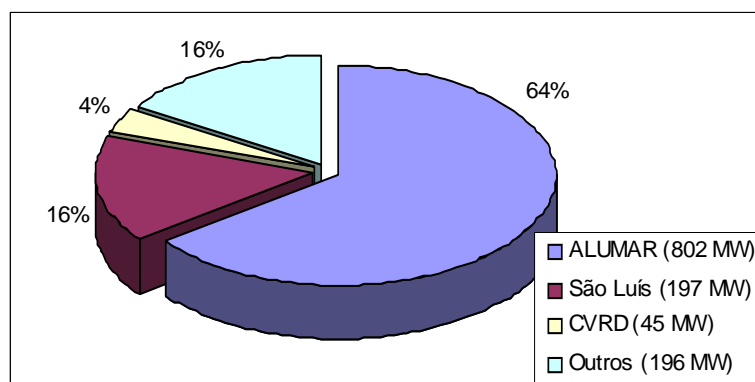


Figura 3.2 Composição das cargas do Estado do Maranhão (2005)

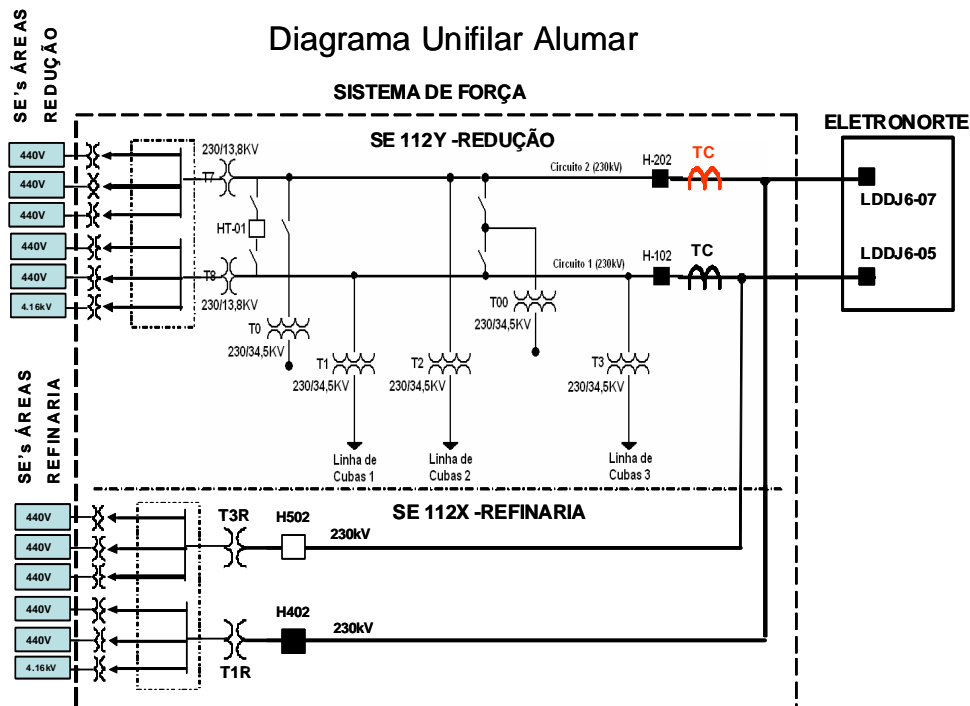


Figura 3.3 Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico da ALUMAR

3.4 Modelagem Computacional da Carga Industrial

Este item está relacionado com a modelagem da carga industrial (ALUMAR) para análise de estabilidade de tensão nos regimes permanente e dinâmico. Esta carga é constituída basicamente de três linhas de cubas eletrolíticas de Redução incluindo a Refinaria.

3.4.1 Modelagem Atual da Carga

Os modelos computacionais disponíveis fornecem uma representação do sistema de corrente contínua das salas de cubas, sendo modelado tanto o comportamento estático quanto o dinâmico das cubas. O comportamento dinâmico de cada cuba é basicamente representado por um circuito RL em série além de uma fonte de tensão constante, conforme ilustra a Figura 3.4. A resistência corresponde à dissipação de energia durante o processo de Redução do alumínio, e a indutância é responsável (junto com a resistência) pela constante de tempo de declínio da corrente CC quando a cuba é desenergizada. A fonte de tensão representa a tensão residual (V_{res}) após a interrupção

de corrente pelos diodos, permanecendo sempre constante, independentemente do ponto de operação, variando somente com o número de células conectadas em cada linha de cubas.

A modelagem atual não inclui algumas características dinâmicas das cargas das duas principais subestações da indústria (Refinaria e Redução) compostas por uma grande parcela de motores de indução, modelados como potências constantes na barra de 230 kV. A Figura 3.5 ilustra a atual modelagem da carga da ALUMAR. Nesta configuração considera-se que as barras de São Luís II 230 kV e ALUMAR 230 kV são eletricamente muito próximas e, portanto foram representadas por uma única barra. Assim os bancos de capacitores presentes nas subestações da ALUMAR foram agregados (284,9 Mvar) como um único “shunt”. Foram criadas barras fictícias (8001, 8002 e 8003) de 34,5 kV correspondentes às salas de cubas, além da barra 8004, associada à representação das tensões residuais (V_{res}) em cada cuba. Nas barras 8001, 8002 e 8003 foram alocados os bancos de filtros dos conversores YF1, YF2 e YF3 (19,2 Mvar para cada sala de cubas, na tensão de 1,0 pu). Além disso, as parcelas de potência ativa e reativa da Refinaria foram incluídas na barra 5551 como potências constantes [17].

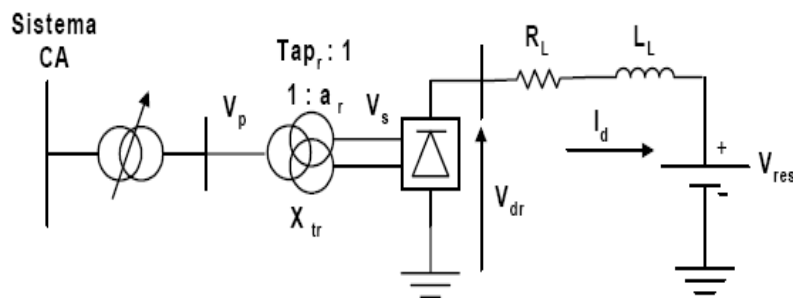


Figura 3.4 Modelo equivalente de uma linha de cubas eletrolíticas.

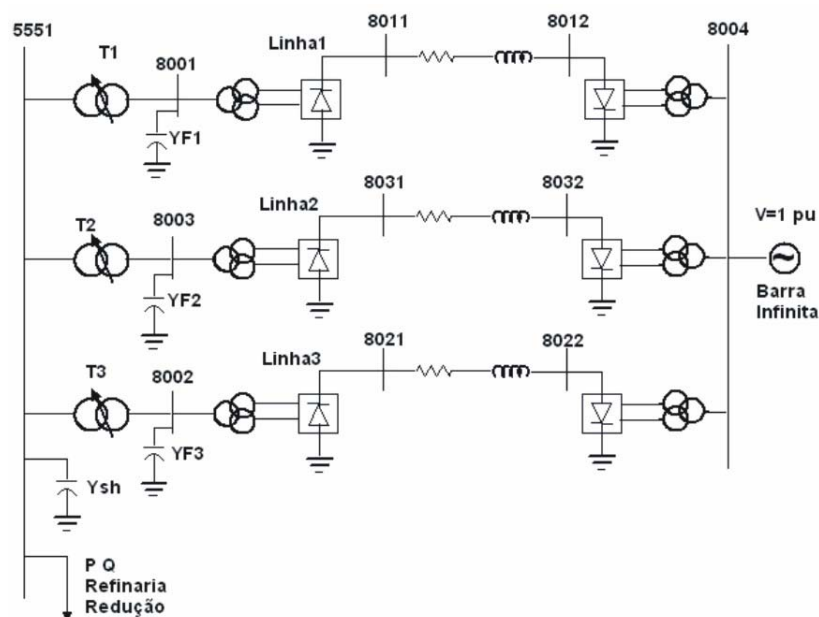


Figura 3.5 Configuração Atual da modelagem da ALUMAR

3.4.2 Modelagem Proposta de Carga

Anterior ao ano de 1999, a carga da ALUMAR era representada nos estudos computacionais por uma impedância constante [17]. Porém, em algumas situações, os transitórios de tensão que ocorriam na subestação de São Luís II devido a distúrbios na rede ou da atuação de esquemas de proteção (ocorrência de subtensão, seguida de sobretensão na recuperação) resultavam no desligamento da subestação e conseqüente isolamento do sistema Maranhão e da ALUMAR. O barramento desta subestação contém uma proteção contra sobretensão que isola os dois circuitos P.Dutra - S.Luís II caso a tensão ultrapasse 1,44 pu por mais de 80 ms (o tempo total para abertura, contando o tempo dos disjuntores, é da ordem de 120 ms). Com o modelo de carga Z constante as sobretensões observadas nas simulações nunca atingiam este nível, apesar de no campo a proteção atuar. Este foi o motivo pelo qual a ELETRONORTE resolveu melhorar a modelagem desta carga a fim de capturar efeitos relevantes as sobretensões [17]. As cargas principais (motores de indução) da Refinaria e da Redução foram modeladas como potência constante.

Apesar disso, nesta nova modelagem, a principal preocupação deu-se com representação das salas de cubas eletrolíticas para a Redução de alumínio as quais foram modeladas como conversores CA-CC para transmissão em corrente contínua [17]. Estes modelos não parecem totalmente adequados para a análise de estabilidade de tensão,

uma vez que seus objetivos primários estão direcionados a problemas de fluxo de carga e estabilidade transitória angular. Vale ressaltar que estes modelos apresentam respostas muito boas para estes fins, no entanto alguns aspectos relevantes ao problema da estabilidade de tensão não foram considerados nesta configuração, como as dinâmicas dos motores de indução, representação dos parâmetros das linhas internas da indústria, e a real distribuição dos bancos de capacitores, que segundo a referência [14] são importantes para estudos do fenômeno de estabilidade de tensão.

Na Figura 3.6 mostra-se a nova configuração proposta neste trabalho, onde se criou, após a barra que representa a subestação São Luís II (5551), mais duas barras que comportam o sistema da indústria, rotuladas como 5554 e 5555 em 230 kV. Fez-se também a distribuição dos bancos de capacitores, alocando um banco de 61,1 Mvar e outro de 50,8 Mvar na barra 5551, dois de 61,1 Mvar na barra 5554 e um banco de 50,8 Mvar em 5555, além de dois bancos de 12 Mvar na subestação da Refinaria os quais não foram considerados na configuração original. Quanto a inserção dos modelos dos motores de indução criaram-se as barras 5552, 5553 e 8005 em 13,8 kV e outras 49 barras em 0,46 kV que se ligam a estas com o intuito de representar os efeitos dos parâmetros das linhas de distribuição e as quais são conectados os motores de indução.

Em relação aos motores de indução, a distribuição foi baseada nos diagramas unifilares fornecidos pela indústria, no entanto, como há uma grande quantidade de motores, optou-se em agregá-los de forma que ficassem distribuídos em 49 grupos com uma média de 6 unidades por grupo. Ressalta-se que não se adotou nenhum critério técnico na agregação dos motores, uma vez que os mesmos apresentam características construtivas e de potências similares, sendo que foram distribuídos de acordo com os diagramas unifilares da indústria. A Tabela 3.1 possibilita uma comparação entre algumas características dos modelos atual e o proposto (dinâmico).

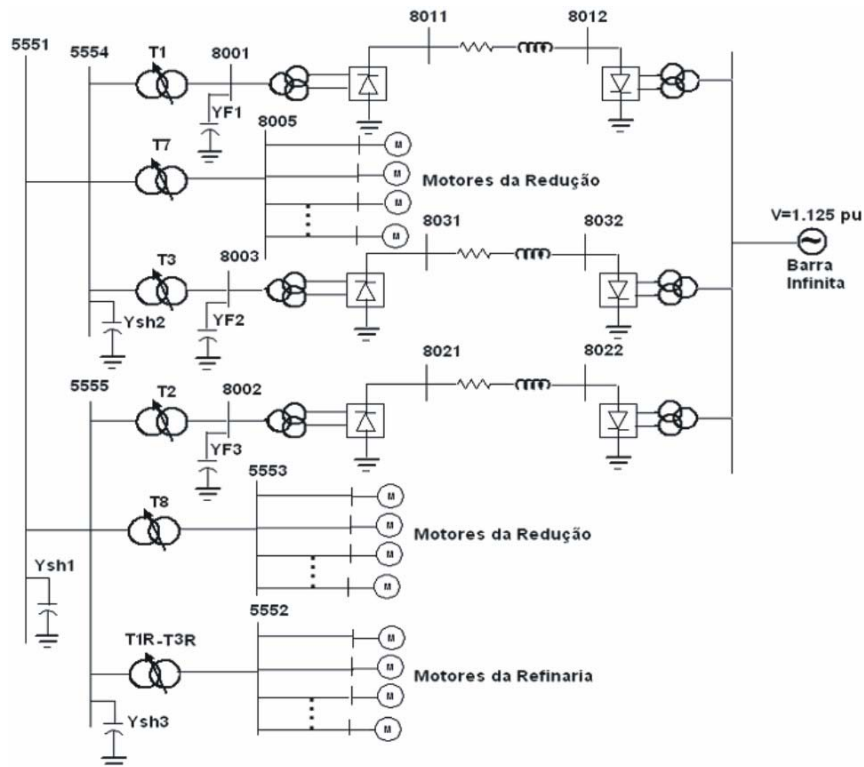


Figura 3.6 Configuração aprimorada da carga da ALUMAR.

Tradicionalmente em estudos de sistemas de energia elétrica não se detalha o modelo do sistema de distribuição já que a sua completa representação tornaria inviável em termos de capacidade computacional e tempo de simulação. No entanto, segundo a referência [2] a estabilidade de tensão está fortemente relacionada com as características das cargas, sendo que neste contexto entende-se por carga a soma de todos os dispositivos individuais dos diversos equipamentos conectados direta ou indiretamente aos sistemas de transmissão de Alta Tensão (*AT*), Distribuição de Média Tensão (*MT*) e Baixa Tensão (*BT*), incluindo-se as parcelas referentes aos diversos elementos de transporte e controle do sistema, tais como cabos, transformadores, reatores, bancos de capacitores, etc. Diante da importância da indústria ALUMAR nos estudos de operação do sistema norte/nordeste, neste trabalho faz-se a representação das linhas da indústria desde o nível de tensão de 230 kV (barra principal) até 0,46 kV onde são conectados os motores de indução. Para tal fim foram adotados os parâmetros reais das linhas disponibilizados por técnicos da própria indústria. A Figura 3.7 ilustra o sistema mencionado cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3.2. Vale ressaltar que o diagrama unifilar da Figura 3.6 representa apenas um dos três elos que conectam o sistema de 230 kV ao de 0,46 kV (representados na Figura 3.4), e que os parâmetros da Tabela 3.2 sofrem uma pequena variação de um para o outro, mas optou-se mostrar apenas um valor médio.

Tabela 3.1 Comparação entre os modelos atual e proposto.

| Modelo Atual | Modelo Proposto | Modelo Atual | Modelo Proposto |
|---|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • A princípio este modelo mostrou-se bem adequado para estudos de fluxo de carga e estabilidade transitória. • Representação das Cargas da Refinaria e Redução como Potências Constantes. • Representação da SE São Luís II em 230 kV e SE da ALUMAR de 230 kV como um único barramento. • Representação dos bancos de capacitores das Subestações citadas acima em um único ponto. • Não representação das linhas de distribuição (internas) da indústria. | <ul style="list-style-type: none"> • Faz-se uma representação mais completa do sistema tornando este modelo adequado também para estudos de estabilidade de tensão. • Representação através de modelos dinâmicos de motores de indução. • Representação expandida das duas subestações permitindo uma distribuição mais realística dos bancos de capacitores. • Distribuição dos bancos de capacitores conforme diagrama original fornecido pela indústria. • Representação das linhas de distribuição desde a barra de 230 kV até a de 0,46 kV. | <ul style="list-style-type: none"> • Representação algébrica a partir de um modelo de potência constante, sendo a variável n igual a zero. $P = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^n$ $Q = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^n$ | <ul style="list-style-type: none"> • Representação dinâmica a partir de um modelo de motor de indução. $\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_0} \left[E'_q - (X - X'_s) I_{ds} \right] - s w_s E'_d$ $\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_0} \left[E'_d + (X - X'_s) I_{qs} \right] + s w_s E'_q$ $T_e = \frac{E'_d I_{ds} - E'_q I_{qs}}{w_s}$ $T_m = T_0 (A' \bar{w}_r^2 + B' \bar{w}_r + C')$ $T'_0 = \frac{X_r + X_m}{w_s R_r}$ $X = X_s + X_m$ $X'_s = X_s + \frac{X_r X_m}{X_r + X_m}$ |

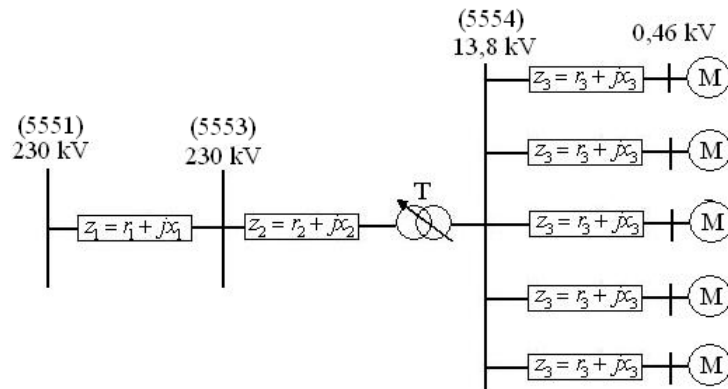


Figura 3.7. Representação do sistema de distribuição da indústria

Tabela 3.2 Parâmetros do sistema de distribuição da indústria (grandezas em pu)

| Z_1 | | Z_2 | | Z_3 | | T | |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-------|
| r_1 | x_1 | r_2 | x_2 | r_3 | x_3 | r | X |
| 0,00 | 0,006 | 0,00 | 1,15 | 0,3697 | 3,0 | 0,00 | 21,90 |

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

4.1. Introdução

Neste Capítulo, os modelos de carga apresentados anteriormente são testados através de uma seqüência real de eventos ocorridos no mês de outubro de 2002, no sistema ELETRONORTE. São realizadas simulações computacionais onde primeiramente apresenta-se a validação dos modelos para em seguida simular a seqüência real de eventos. Verifica-se o comportamento de diferentes grupos de motores, fazendo-se uma análise comparativa entre os modelos.

Como já mencionado, o programa computacional usado nas simulações são, os programas ANAREDE [16] para estudos em regime-permanente (cálculo das condições iniciais), e ANATEM [15] para estudos no domínio do tempo.

4.2. Testes Computacionais

São realizadas aqui simulações computacionais em regime-permanente (para cálculo das condições iniciais) e no domínio do tempo usando-se a modelagem atual e a proposta a fim de comparar suas respostas. Para tal fim, os modelos de motores de indução representados pelas Equações 4.1 e 4.2 foram considerados no programa computacional ANAREDE para estudos em regime-permanente, e os representados pelas Equações 4.3 e 4.4 foram considerados no programa computacional ANATEM para simulações no domínio do tempo. No circuito equivalente da Figura 4.1, todas as grandezas estão referidas no lado do estator, os sentidos das correntes mostrados são positivos quando opera como motor, e nesse caso, o escorregamento é positivo, onde P_{ag} é a potência transferida através do entreferro até o rotor. A Figura 4.2 ilustra o modelo de motor de indução para estudos no domínio do tempo.

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX_s \bar{I}_s + jX_m (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \quad 4.1$$

$$0 = \frac{R_r}{s} \bar{I}_r + jX_r \bar{I}_r + jsX_m (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \quad 4.2$$

$$\bar{E}' = E'_d + jE'_q \quad 4.3$$

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX'_s \bar{I}_s + \bar{E}' \quad 4.4$$

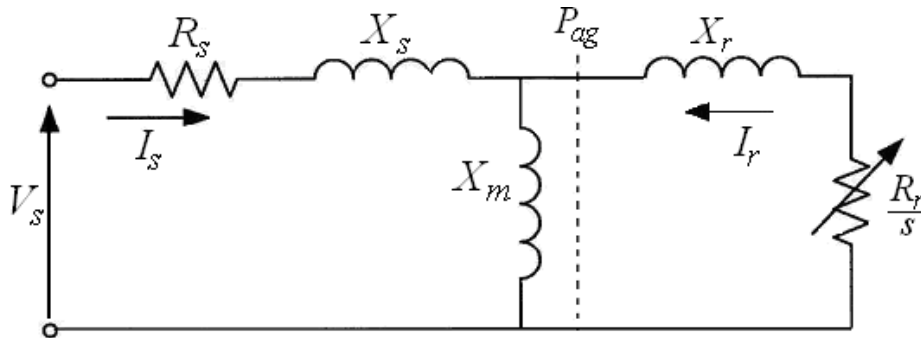


Figura 4.1. Circuito Equivalente de Regime Permanente de Motor de Indução

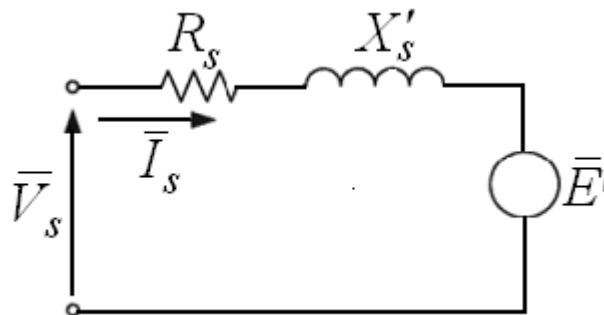


Figura 4.2. Circuito Equivalente de Regime Transitório de Motor de Indução

4.2.1. Coleta de Dados

A coleta de dados está dividida em duas partes, uma para dados de simulação em regime-permanente e a outra para dados de simulação no domínio do tempo. Inicialmente, esses dados foram obtidos através de comunicação privada com a ELETRONORTE e através da página virtual do Operador Nacional do Sistema (ONS). Os dados em regime-permanente podem servir também para detectar problemas de controle de tensão através de índices de sensibilidade e a análise no domínio do tempo

para visualizar as dinâmicas de variáveis de interesse (p.ex: tensão e corrente de campo dos geradores síncronos, ângulo das máquinas síncronas, níveis de tensão em barras controladas por transformadores de tape variável, níveis de tensão em barras de carga, etc.). As condições iniciais usadas nas análises no domínio do tempo são obtidas nas análises em regime permanente.

4.3. Descrição da Perturbação [4]

Em 10 outubro de 2002 às 10h:36 minutos iniciou-se uma seqüência de eventos envolvendo desligamentos de linhas e perda de carga no sistema Nordeste Brasileiro em resposta a um curto-circuito monofásico (fase B) na linha de transmissão de 500 kV Angelim II – Recife II C02. Este curto-circuito, eliminado em 2,0 ciclos, foi provocado pela desconexão de um dos ramos de cadeia de isolador tipo “V”, ocasionando uma aproximação entre o condutor e a estrutura metálica da torre. Os circuitos de 500 kV Angelim II – Recife II C02 e C01 (NE) foram desligados simultaneamente devido a atuação do sistema de teleproteção, interrompendo o envio de potência para a área leste do sistema Nordeste em 500 kV. A linha de 500 kV Xingó-Messias (NE) estava fora de operação para manutenção de um reator no terminal da subestação Messias. O diagrama unifilar dos sistemas interligados de energia elétrica Norte/Nordeste (500 kV) está ilustrado na Figura 4.3 e um diagrama unifilar mais completo incluindo o circuito Norte/Sul está disponível para consulta no Apêndice A.

Esses eventos iniciais causaram baixas tensões nesta região e nas áreas vizinhas, pois com a perda do suprimento em 500 kV, as cargas passaram a ser supridas pelo sistema de 230 kV (não representado no diagrama unifilar da Figura 4.3). Várias cargas foram desconectadas do sistema (aproximadamente 976 MW) devido à atuação dos dispositivos de proteção contra subtensão. A perda deste montante de carga causou reversão no sentido do fluxo nas linhas de transmissão que interligam os sistemas Norte e Nordeste (circuitos de 500 kV Imperatriz – Boa Esperança (ELN-Ma) e Imperatriz - Teresina II (ELN-Ma)) resultando em perda de sincronismo entre essas duas regiões. O dispositivo de proteção de perda de sincronismo desligou a linha de 500 kV Presidente Dutra – Boa Esperança (ELN-Ma). Dispositivos de proteção instalados no sistema ELN-Ma desligaram as seguintes linhas de transmissão, todas de 500 kV: Presidente Dutra – Teresina II, Presidente Dutra – São Luís II C01 e Presidente Dutra – Imperatriz

II C02 para evitar sobretensões. A interligação Norte/Nordeste com um fluxo de aproximadamente 473 MW foi definitivamente perdida devido ao desligamento da linha de transmissão Presidente Dutra – Teresina II (500 kV). A perda da interligação Norte/Nordeste causou baixas tensões na área Norte do sistema Nordeste, e dispositivos de proteção desligaram aproximadamente 326 MW de cargas.

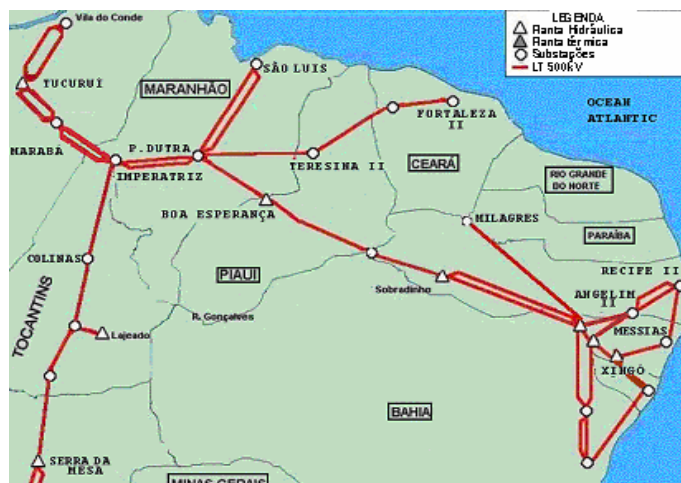


Figura 4.3 Diagrama unifilar do sistema interligado Norte/Nordeste – 500 kV configuração do evento descrito acima

Também, após a perda da interligação Norte/Nordeste, ocorreram desligamentos automáticos da linha das salas de cubas 03 e 02 da Alumar, por atuação de proteção de subtensão dos serviços auxiliares e desligamento da SE 230 kV Refinaria, também por atuação de proteção de subtensão. Em seguida, houve o desligamento da sala de cubas 01 por atuação de proteção de sobrecorrente do setor de 13,8 kV associada ao transformador dos serviços auxiliares.

Caso I

Vale mencionar que não foram obtidos os parâmetros reais dos motores junto aos seus fabricantes, nem através dos manuais de operação, sendo necessários ensaios em campo para determiná-los (não realizados). Como essa tarefa não faz parte dos objetivos desse trabalho, procurou-se uma forma alternativa e confiável de se obter esses dados. A partir de uma pesquisa na literatura especializada, foram obtidos e usados nas simulações os parâmetros ilustrados na Tabela 4.1 [1,2]. Esses parâmetros correspondem à máquinas de indução com características semelhantes às instaladas na ALUMAR. Já a Tabela 4.2 mostra as variáveis de estado de algumas das principais barras do Sistema Norte e do sistema da ALUMAR, obtidas em regime permanente na

condição pré-distúrbio. Os resultados mostram que, pelo menos no cálculo das condições iniciais, a modelagem proposta se comporta de maneira adequada, em função da comparação com os resultados obtidos pela modelagem atual [17].

Tabela 4.1 Parâmetros dos motores de indução (pu)

| R_s | X_s | X_m | R_r | X_r | H | A | L_F |
|-------|-------|-------|-------|-------|-----|---|-------|
| 0.013 | 0.67 | 3.8 | 0.009 | 0.17 | 1.5 | 1 | 0.6 |

Tabela 4.2 Comparação entre os modelos – condição pré-distúrbio

| Barra | Modelo Atual | | Modelo Proposto | |
|-------|--------------|----------------|-----------------|----------------|
| | Tensão (pu) | Ângulo (graus) | Tensão (pu) | Ângulo (graus) |
| 5550 | 1,036 | -107,4 | 1,036 | -107,4 |
| 5580 | 1,051 | -98,5 | 1,051 | -98,5 |
| 5590 | 1,074 | -90,5 | 1,074 | -90,5 |
| 5551 | 1,025 | -109,4 | 1,025 | -109,4 |
| 8001 | 1,027 | -117,0 | 1,027 | -117,0 |
| 8002 | 0,971 | -119,2 | 0,971 | -119,2 |
| 8003 | 0,651 | -115,5 | 0,651 | -115,5 |

As Figuras 4.4 – 4.6 ilustram os resultados das simulações no domínio do tempo, também sem nenhum tipo de perturbação. As variáveis ilustradas são: potência reativa fornecida pelo compensador síncrono da área Maranhão, tensão e o fluxo de potência reativa entre os barramentos de 500 e o de 230 kV, todos na Subestação de São Luís II. Similarmente a modelagem algébrica, os resultados também mostram que na condição pré-distúrbio a modelagem dinâmica proposta se comporta de maneira adequada, em função da comparação com os resultados obtidos pela modelagem dinâmica atual [17]. Os dados dos referentes aos motores de indução estão disponíveis no Apêndice B.

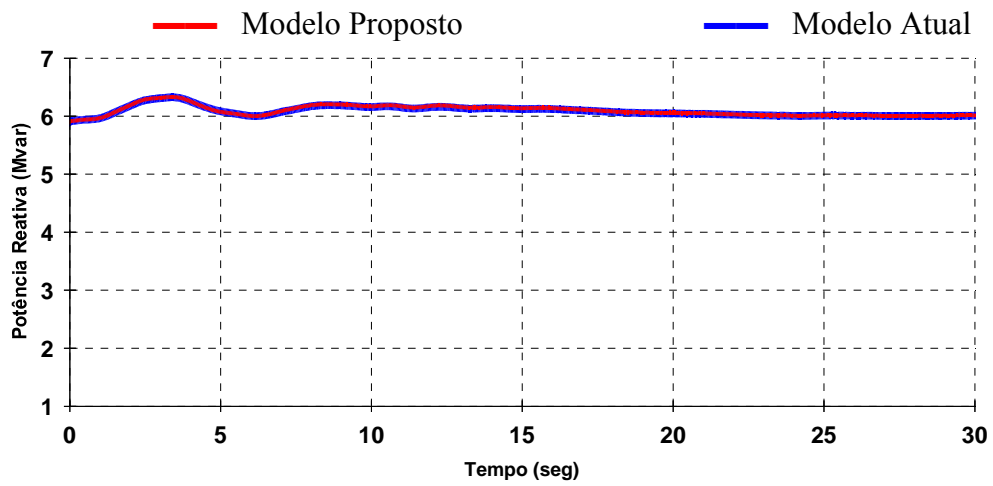


Figura 4.4. Fluxo de potência reativa do compensador síncrono - São Luís II.

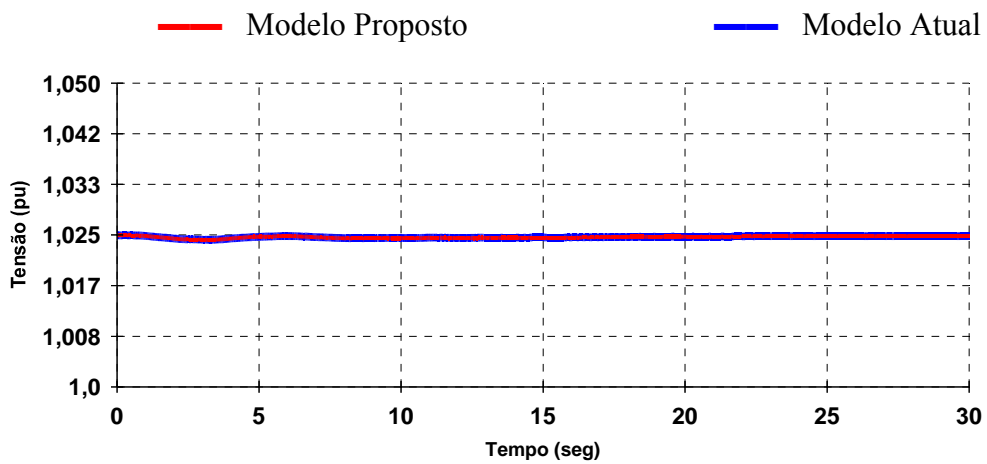


Figura 4.5. Comportamento da tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II.

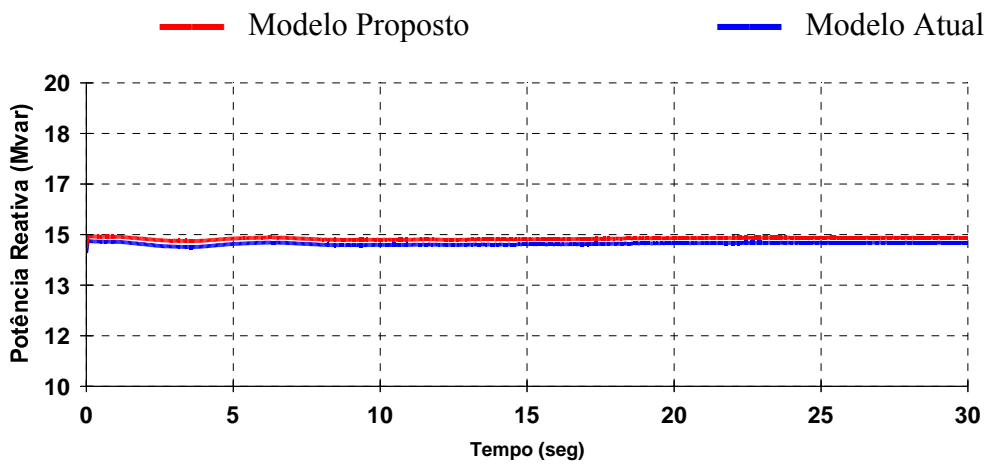


Figura 4.6. Fluxo de Mvar entre a barra de 500 kV e a barra da ALUMAR de 230 kV.

Apesar da aparente “simplicidade” dessas simulações, uma vez que nenhum tipo de perturbação foi considerada, essa etapa inicial é importante, pois corresponde ao ajuste da modelagem proposta e de certa forma, a uma validação preliminar dos parâmetros considerados, uma vez que estes foram obtidos da literatura, e não do fabricante. Essa etapa inicial pode ser considerada, portanto, como um “ponto de partida”, principalmente para simulações no domínio do tempo.

Caso II

Simulações no domínio do tempo reproduzem a seqüência de eventos descrita na Tabela 4.3, considerando-se desta vez o distúrbio inicial (curto-circuito monofásico no sistema Nordeste) a perda da interligação, até o segundo corte de carga da ALUMAR (Contingência 06). As ações descritas pelas Contingências 05 e 06 foram executadas quase que simultaneamente, imediatamente após a seqüência de desligamentos no sistema ELN-Ma, e esta condição de operação permanece durante aproximadamente 8 minutos.

• Impacto da Modelagem Proposta no Sistema de Potência da ALUMAR

O objetivo aqui é comparar as respostas dos modelos atual e proposto no domínio do tempo para a seqüência de eventos descrita na Tabela 4.3. Aqui se visualiza a influência da resposta dos motores nas barras de 500 kV e 230 kV da ELETRONORTE e na própria indústria, sendo as seguintes as grandezas a serem comparadas através de gráficos:

- Tensão nas barras próximas a ALUMAR;
- Fluxo de potência ativa e reativa nas interligações entre as SE São Luís II de 500 kV e a Subestação que alimenta a ALUMAR (São Luís II de 230 kV);
- Potência reativa gerada pelos compensadores síncronos da área Maranhão;

Observa-se na Figura 4.7 uma diferença entre o modelo proposto e o atual no fornecimento de potência reativa pelo compensador síncrono próximo à barra da ALUMAR em função do comportamento dinâmicos destes, sendo que muitos chegaram à condição de rotor bloqueado solicitando mais reativos do sistema. Este fato também pode ser observado na Figura 4.8 que representa o fluxo de potência reativa entre o

barramento da SE São Luís II de 500 kV e a de 230 kV. Esta situação torna-se ainda mais clara em barras próximas ao suprimento da carga modelada com motores, muitas vezes apresentando comportamentos opostos aos verificados quando se utiliza a modelagem com potência constante.

Tabela 4.3. Informações sobre as simulações computacionais.

| <i>Contingência</i> | <i>Instante (Seg)</i> | <i>Ação de Controle</i> | <i>Descrição</i> |
|---------------------|-------------------------|--|--|
| 01 | 0,980 | Desligamento da LT 500 kV Angelim II - Recife II C02 | Devido à ocorrência de um curto-circuito monofásico provocado pela desconexão de um dos ramos de uma cadeia de isoladores. |
| 02 | 1,008 | Desligamento da LT 500 kV Angelim II - Recife II C01 | Devido à atuação do esquema de teleproteção através da lógica de fraca alimentação no terminal de Recife II. |
| 03 | 2,676 | Desligamento da LT 500 kV Presidente Dutra - Boa Esperança | Devido à atuação da Proteção de Perda de Sincronismo (PPS) no terminal de Presidente Dutra em virtude da inversão de fluxo na interligação norte/nordeste. |
| 04 | 2,695 | Saída do Sistema Norte e Atuação do Sistema ECE. | Saída da interligação Norte/Nordeste seguida pela atuação do Esquema de Controle de Emergência (ECE), desconectando as seguintes linhas de transmissão: Presidente Dutra – Teresina II, Presidente Dutra – São Luís II C01 e Presidente Dutra – Imperatriz II C02. |
| 05 | 2,695 | Corte Parcial de Carga da ALUMAR na SE São Luís II - 230 kV. | Saída da sala de cubas 03 da ALUMAR (164,4 MW), bancos de capacitores de 61 Mvar e filtros de 19,2 Mvar, associados a esta carga. |
| 06 | 3,195 | Corte Parcial de Carga da ALUMAR na SE São Luís II - 230 kV. | Saída das salas de cubas 02, totalizando 424,1 MW, bancos de capacitores totalizando 282 Mvar e filtros totalizando 57,6 MVAR, associados a esta carga. |
| 07 | 8 minutos após Cont. 03 | Corte Total de carga da ALUMAR na SE São Luís II 230kV. | Saída das salas de cubas 03, 02, e 01 totalizando 630,1 MW, dos bancos de capacitores totalizando 282 Mvar e dos filtros totalizando 57,6Mvar, equipamentos associados a esta carga. |

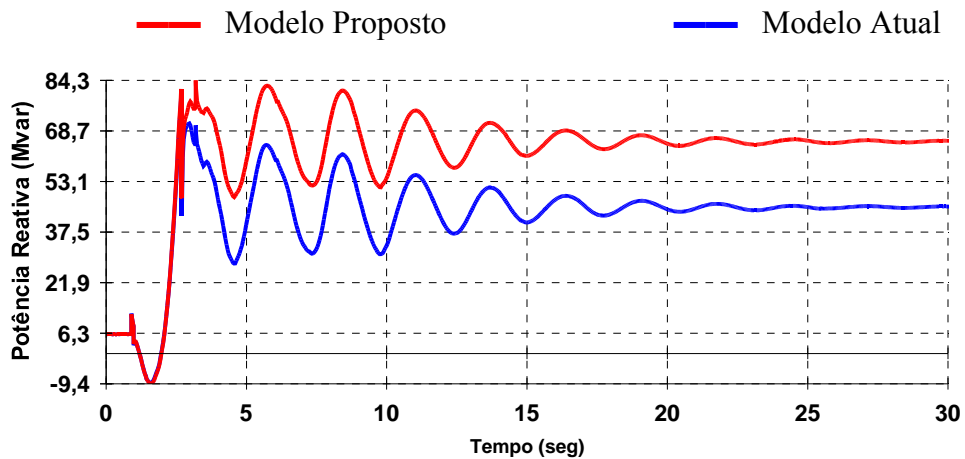


Figura 4.7. Fluxo de Mvar do compensador síncrono da área Maranhão – SE São Luís II.

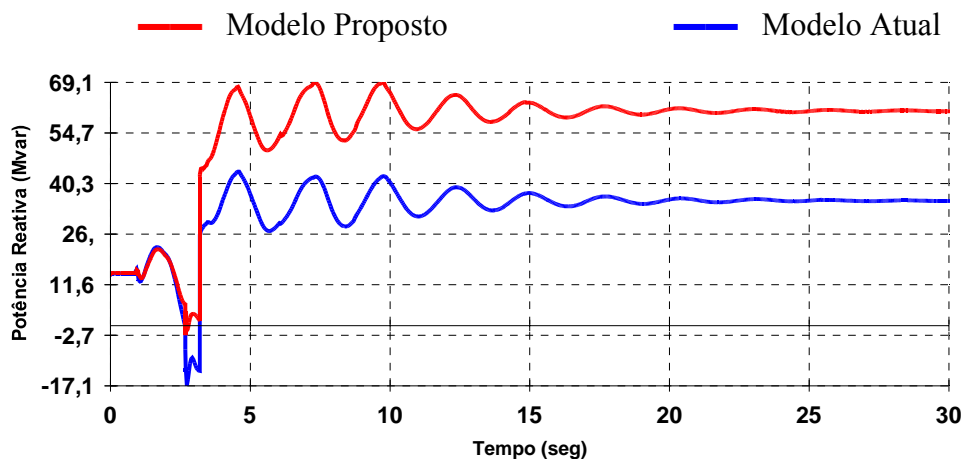


Figura 4.8 Fluxo de Mvar entre a barra de 500 kV e a barra de conexão da carga da ALUMAR em 230 kV.

Além do aumento na demanda de potência reativa, observa-se nas Figuras 4.9 e 4.10 uma oscilação na tensão das barras da Subestação São Luís II de 500 e 230 kV, respectivamente, resultado da solicitação sempre crescente de potência reativa, característica do comportamento dos motores de indução. Este comportamento tem sido verificado em diversos testes, em campo e em laboratório, e indica um maior consumo de potência reativa pelo motor de indução, conforme os níveis de tensão caem e que, por sua vez, solicita maior suporte de reativos. Este processo tende a se repetir até que haja o bloqueio do motor ou, no caso de grandes motores industriais, até que a proteção de subtensão atue desconectando o motor [5].

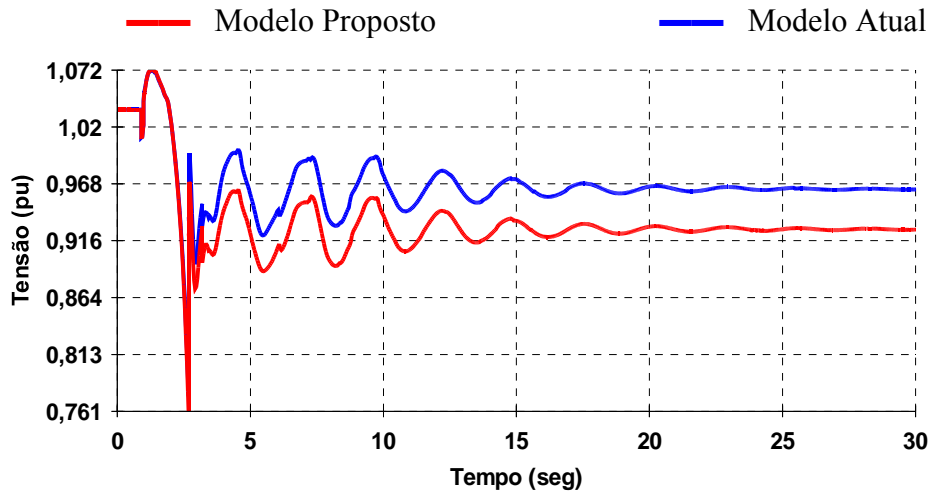


Figura 4.9. Comportamento dinâmico da tensão Barra de 500 kV da SE São Luís II

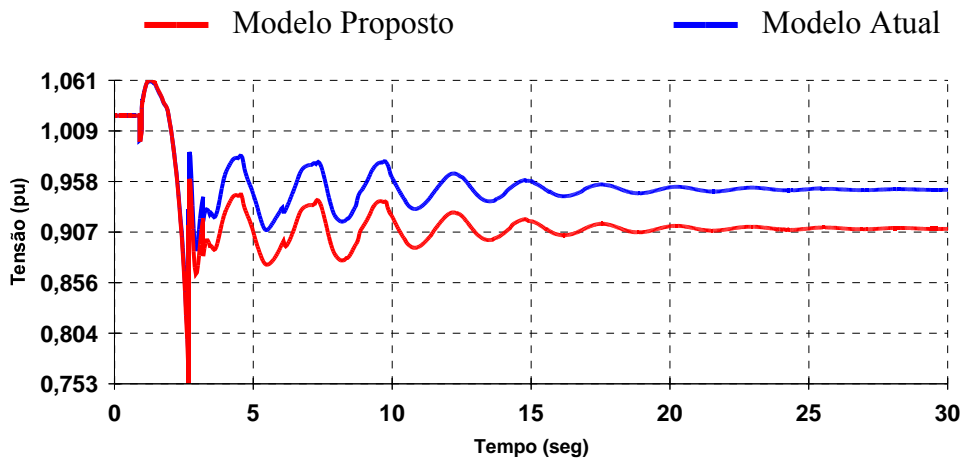


Figura 4.10. Comportamento dinâmico da tensão Barra de 230 kV da SE São Luís II

Na Figura 4.11, observa-se, que conforme o esperado houve redução no fluxo de potência ativa entre o caso usando-se a modelagem com motores de indução e o caso modelado com potência constante na interconexão das barras de 500 kV da SE São Luís II e a barra da ALUMAR em 230 kV. Como ambos os casos partem do mesmo requisito de potência ativa, como pode ser verificado no instante $t=0$, esta redução é explicável pela redução de tensão no modelo com motores. Por sua vez, a degradação no perfil de tensão deve-se ao aumento da solicitação de potência reativa, comportamento característico dos motores de indução, o que pode ser visto na Figura 4.8.

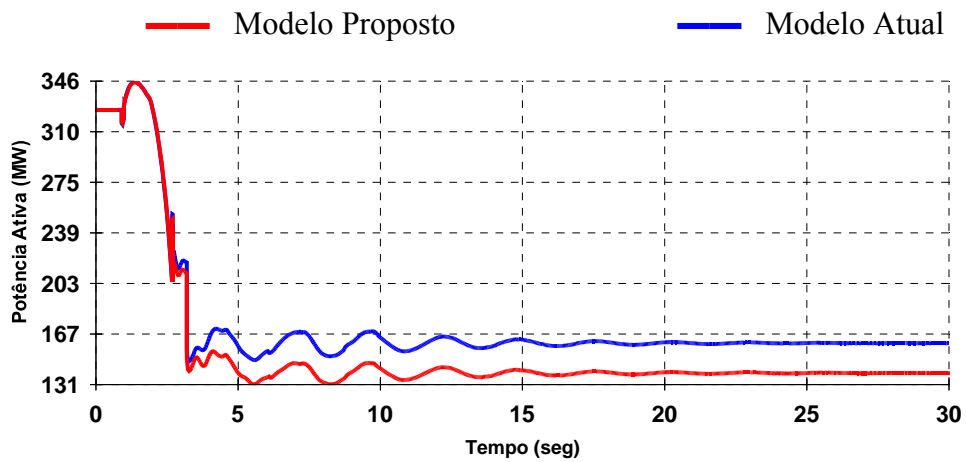


Figura 4.11. Fluxo de potência ativa entre a barra de 500 kV da SE São Luís II e a barra de 230 kV da ALUMAR

A fim de verificar esse comportamento em uma barra interna da ALUMAR, mostra-se na Figura 4.12 a redução do fluxo de potência ativa entre as barras de 230 kV da subestação principal e da Sala de Cubas 1 em 34,5 kV, ocasionado pela redução de tensão na barra dessa sala de cubas (8001), Figura 4.13, que por sua vez ocorre devido ao maior consumo de potência reativa nesse trecho conforme mostra a Figura 4.14.

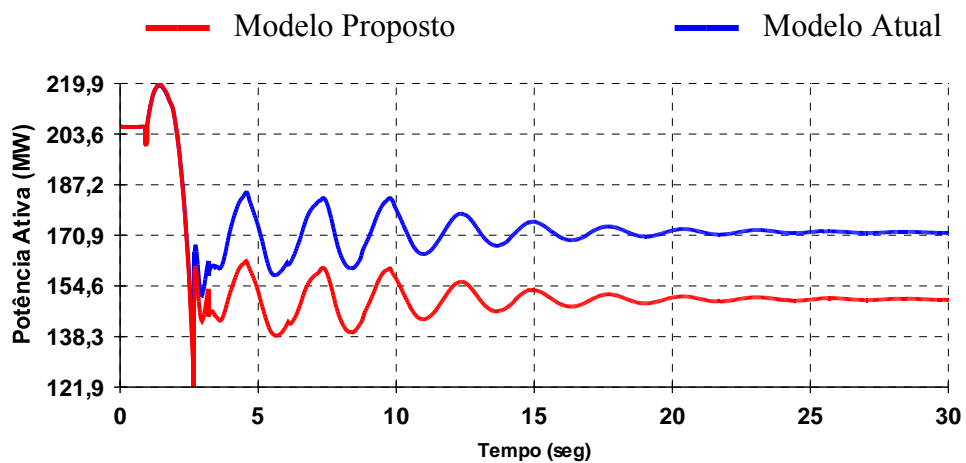


Figura 4.12. Fluxo de potência ativa entre o barramento de 230 kV e a barra de conexão da sala de cubas 1 de 34,5 kV.

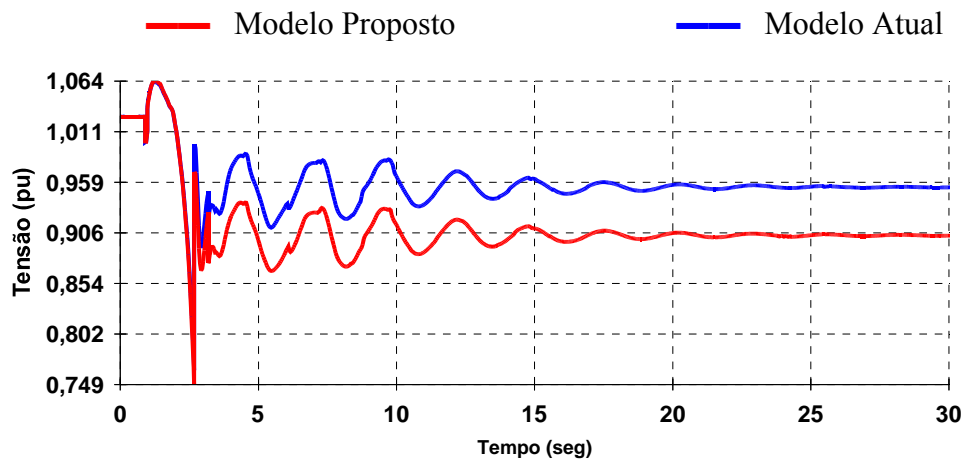


Figura 4.13. Comportamento dinâmico da tensão Barra da sala de cubas 1 da ALUMAR de 34,5 kV.

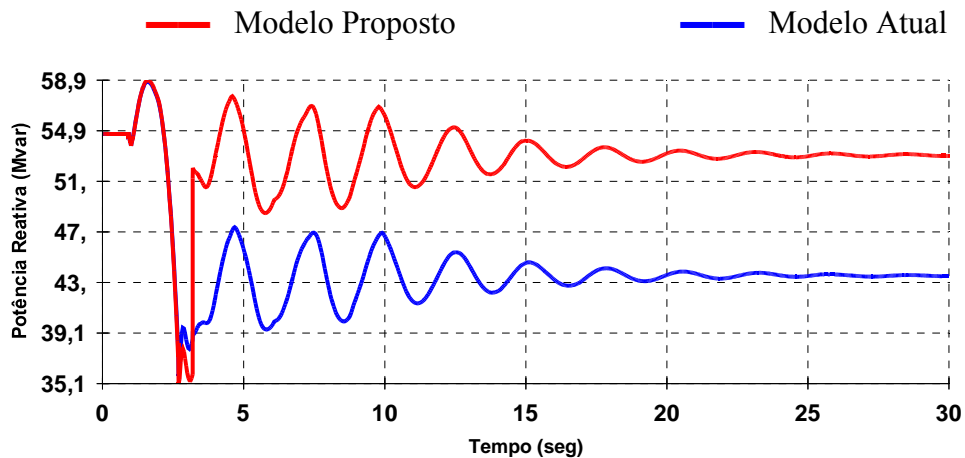


Figura 4.14. Fluxo de potência reativa entre as barras de 230 kV e a de sala de cubas 1 da ALUMAR de 34,5 kV.

Um ponto interessante a ser observado nos gráficos referentes à tensão, é o valor mínimo atingido com cada modelo. A tensão obtida na simulação para a barra de 230 kV da SE São Luís II, que está em torno de 0,746 pu para o modelo com motor de indução e 0,79 pu para a modelagem com potência constante (Figura 4.10). Segundo o demonstrativo de ocorrências do mês de outubro da barra de 230 kV da SE São Luís II elaborado pela ELETRONORTE o qual pode ser consultado na referência [4], para estes eventos, a tensão mínima nesta barra atingiu 0,752 pu. Portanto, a diferença entre o valor medido e o calculado tornou-se bem mais próximo do real com a modelagem proposta neste trabalho. Destaca-se também como ponto positivo a relação entre a modelagem dinâmica e o valor da tensão atingido em regime permanente. Observa-se

em todos os gráficos de tensão (Figuras 4.9, 4.10 e 4.13) que quando se adota o modelo polinomial com potência constante o valor da tensão está dentro da faixa de -5% , enquanto que com o modelo dinâmico e uma representação mais detalhada do sistema de distribuição estes se mostram abaixo deste limite inferior, conforme melhor detalhado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores de tensão em regime permanente após as ações de controle

| Modelo de Carga | Valores de Tensão (pu) | | |
|--------------------|------------------------|-------------------|--------------------|
| | Barra 5550-500 kV | Barra 5551-230 kV | Barra 8001-34,5 kV |
| Potência Constante | 0,96 | 0,95 | 0,95 |
| Dinâmico | 0,91 | 0,91 | 0,89 |

• Desempenho dos motores

Uma outra vantagem em se aprimorar o modelo dinâmico de carga da ALUMAR, principalmente o agregado de motores de indução, é a maior flexibilidade em realizar estudos mais específicos, caso desejado. Por exemplo, estudos envolvendo o perfil de tensão na barra principal ou em outras barras do sistema elétrico da indústria em resposta a distúrbios internos ou externos, planejamento da expansão do sistema industrial, coordenação e seletividade da proteção contra sub/sobretensão, etc. Aqui se apresenta resultados envolvendo análise dinâmica de grupos de motores considerando ainda a sequência de eventos descrita na Tabela 4.3.

Pode ser observado na Figura 4.15 que enquanto a tensão de alimentação de um determinado grupo de motores cai de 0,98 pu para aproximadamente 0,75 pu, a potência ativa é mantida constante, em aproximadamente 1,87 MW, e a potência reativa aumenta de 1,06 Mvar para 1,71 Mvar. Esta condição de operação confirma a característica de potência ativa constante dos motores de indução, mesmo para baixos níveis de tensão, resultando, porém, num elevado consumo de potência reativa. Pelas suas próprias características, os motores de indução mudam para impedância constante a partir de um determinado nível (baixo) de tensão [13]. Acompanhando a redução de tensão nos seus terminais até atingir 0,73 pu, a velocidade do motor também é reduzida (situação representada pelo aumento gradual do escorregamento, Figura 4.16) até chegar a zero (parada total), caracterizando uma condição de rotor bloqueado. Para esta condição de operação há um consumo excessivo de potência reativa, estabilizando em torno de 2,77 Mvar, e com um máximo de aproximadamente 3,4 Mvar, como ilustrado na Figura

4.17. Por outro lado o consumo de potência ativa é reduzido drasticamente, atingindo 0,08 MW (Figura 4.18).

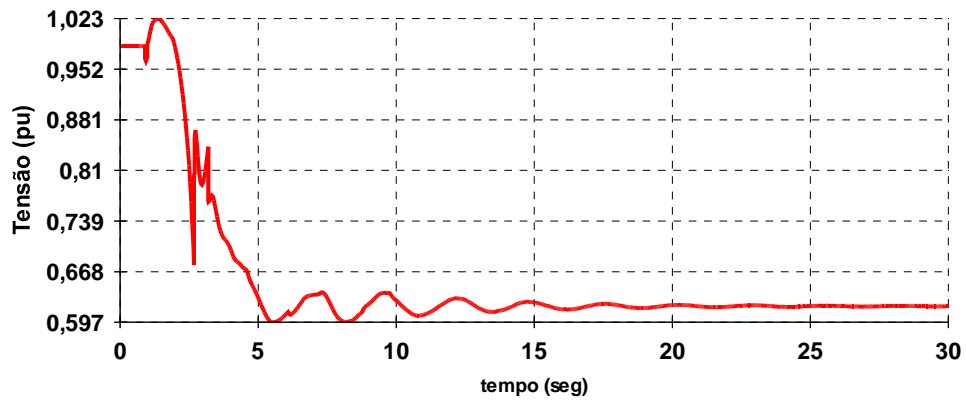


Figura 4.15. Tensão terminal do grupo de motores.

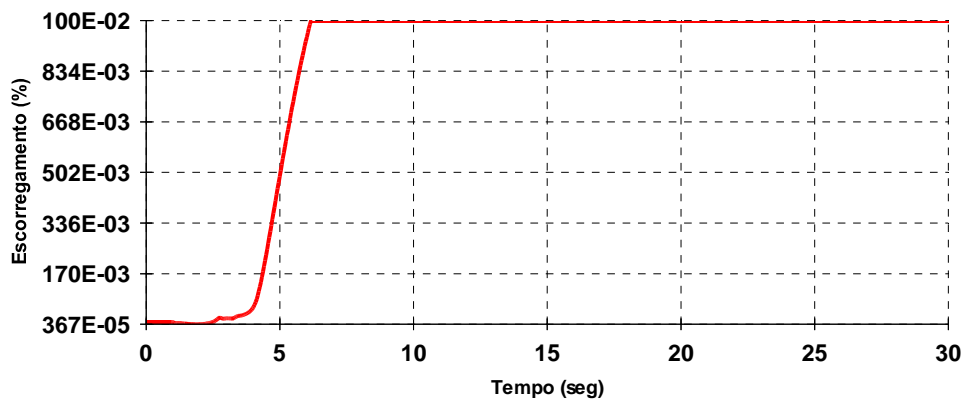


Figura 4.16. Escorregamento do grupo de motores.

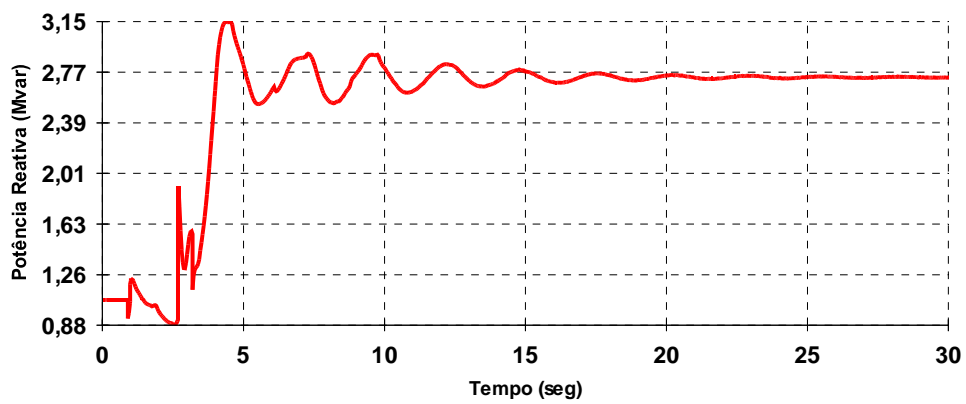


Figura 4.17. Consumo de potência reativa do grupo de motores.

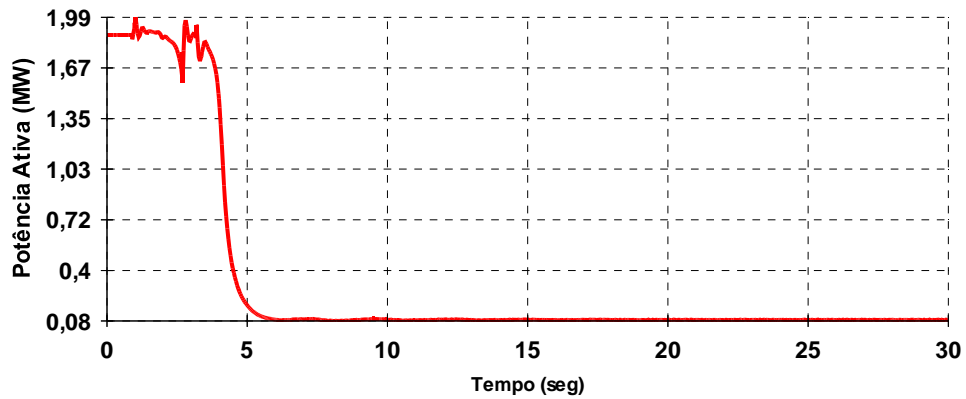


Figura 4.18. Consumo de potência ativa do grupo de motores.

As Figuras 4.19 – 4.22 representam o comportamento de um outro grupo de motores. Nesta barra, embora a tensão tenha atingido um valor muito baixo chegando a 0,694 pu (Figura 4.19) a recuperação foi muito rápida oscilando entre 0,8 e 0,9 pu, situação que não resultou em parada, com o valor do escorregamento estabilizando-se em torno 0,016 pu. No entanto, como há uma variação no nível de tensão, ocorre também uma mudança nas potências ativa e reativa, embora não sejam tão significativas em comparação ao caso anterior.

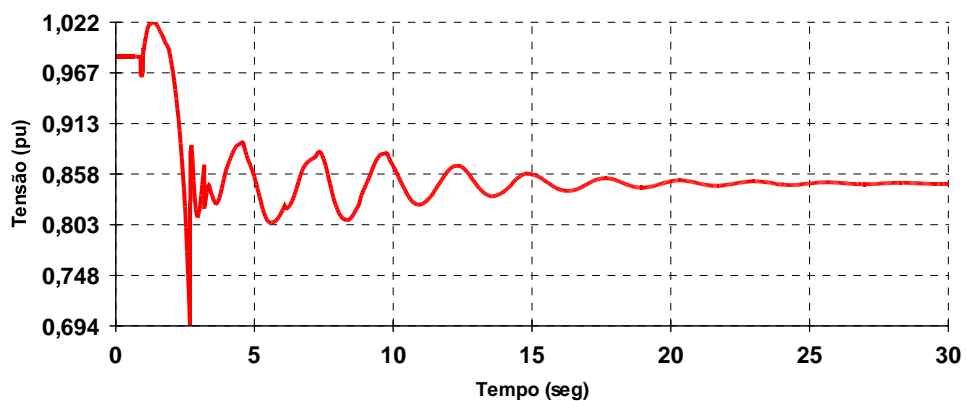


Figura 4.19. Tensão terminal do novo grupo de motores.

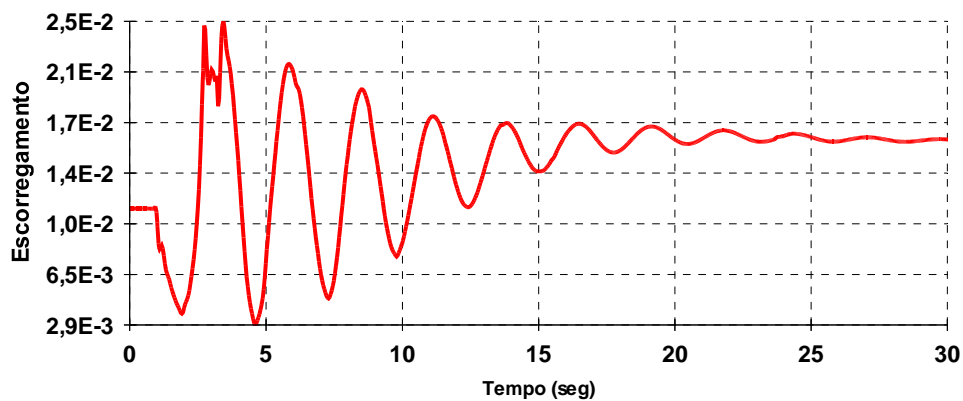


Figura 4.20. Escorregamento do novo grupo de motores.

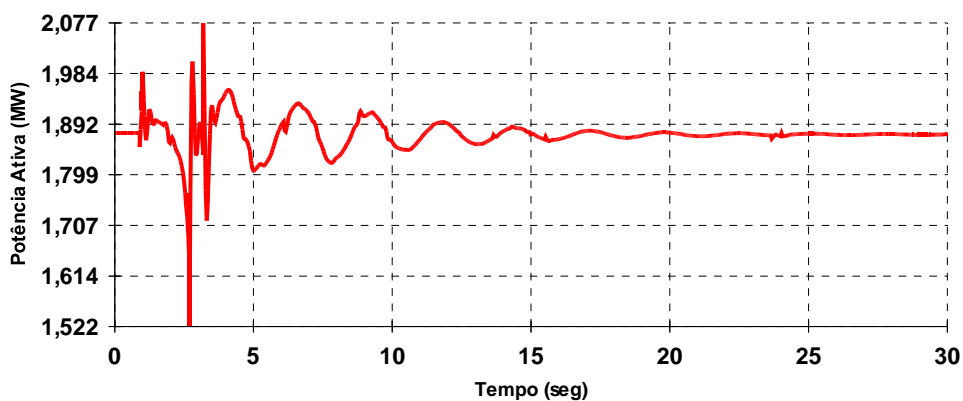


Figura 4.21. Potência ativa do novo grupo de motores.

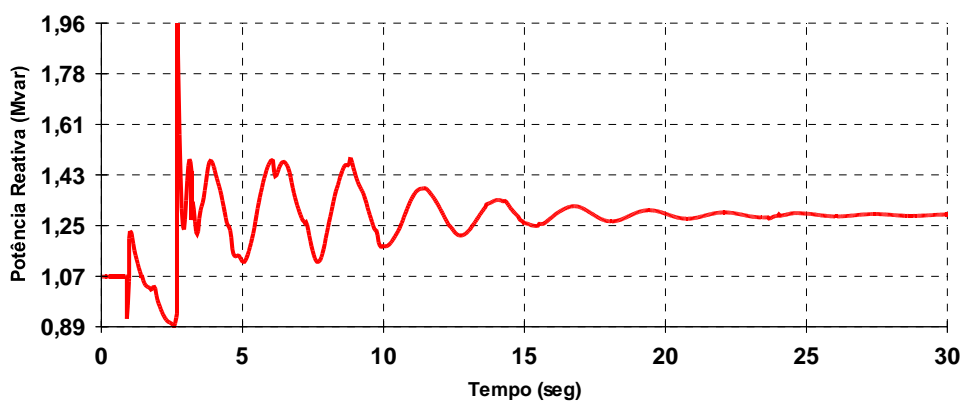


Figura 4.22. Potência reativa do grupo do novo grupo de motores.

• Impacto na Refinaria e Redução

Os perfis de tensão das Subestações da Refinaria e da Redução da ALUMAR são continuamente monitorados para que, caso os mesmos estejam inadequados, ações de controles sejam tomadas garantindo assim a integridade dos motores e dos outros equipamentos destas subestações e do sistema da indústria como um todo. Nas Figuras 4.23 – 4.25 faz-se uma comparação entre grandezas como tensão e fluxos de potência ativa e reativa da refinaria e redução. Para tornar possível essa comparação foi necessário alocar em uma outra barra as cargas referentes à refinaria e a redução da ALUMAR modeladas como potências constantes já que as mesmas estavam agregadas com as cargas de uma outra indústria (C.V.R.D.). O mesmo procedimento teve que ser adotado ao modelo com motores de indução já que os mesmos estão distribuídos em três barramentos, conforme mostra a Figura 3.5 do Capítulo 3. Para ilustrar, os diagramas com o modelo atual e o proposto são novamente mostrados na Tabela 4.5 para uma comparação.

A visualização dos resultados permite uma análise comparativa das respostas dos dois modelos. Observa-se na Figura 4.25 que no modelo dinâmico o consumo de potência reativa é maior quando comparado com o modelo com potência constante em resposta e sequência de eventos. Esta condição de operação resulta da queda de tensão mais acentuada capturada pelo modelo dinâmico (0,77pu/0,95pu), como mostra a Figura 4.23.

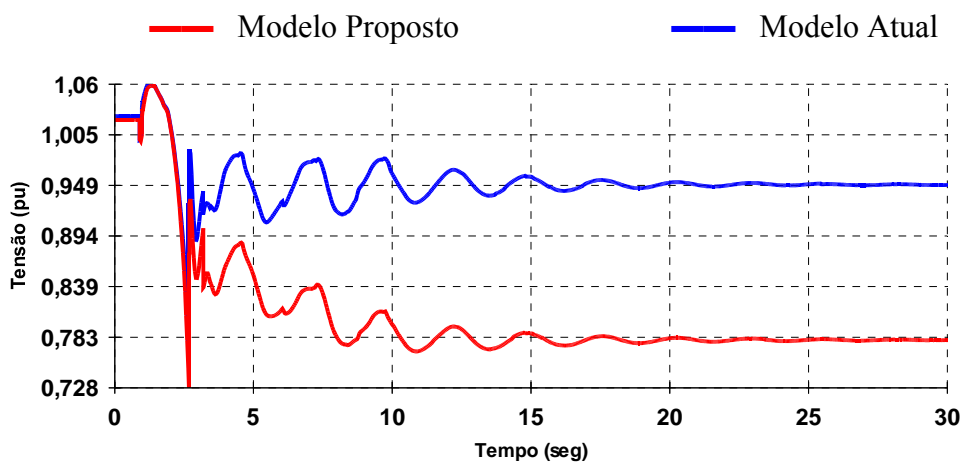


Figura 4.23. Comportamento dinâmico da tensão no barramento dos motores.

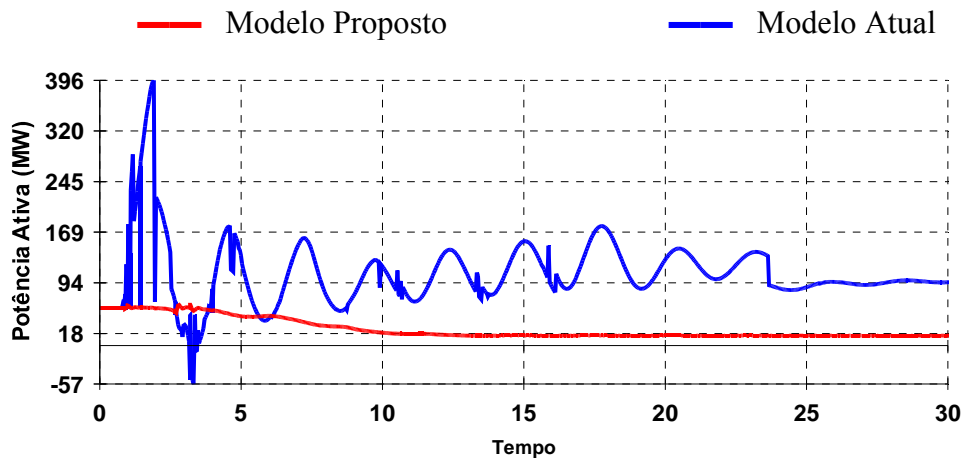


Figura 4.24. Fluxo de potência ativa entre a barra da ALUMAR de 230 kV e o barramento dos motores.

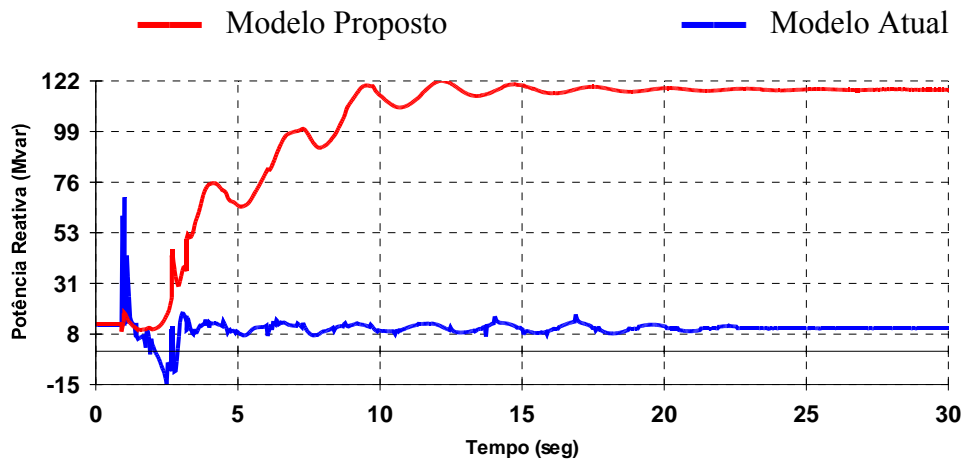
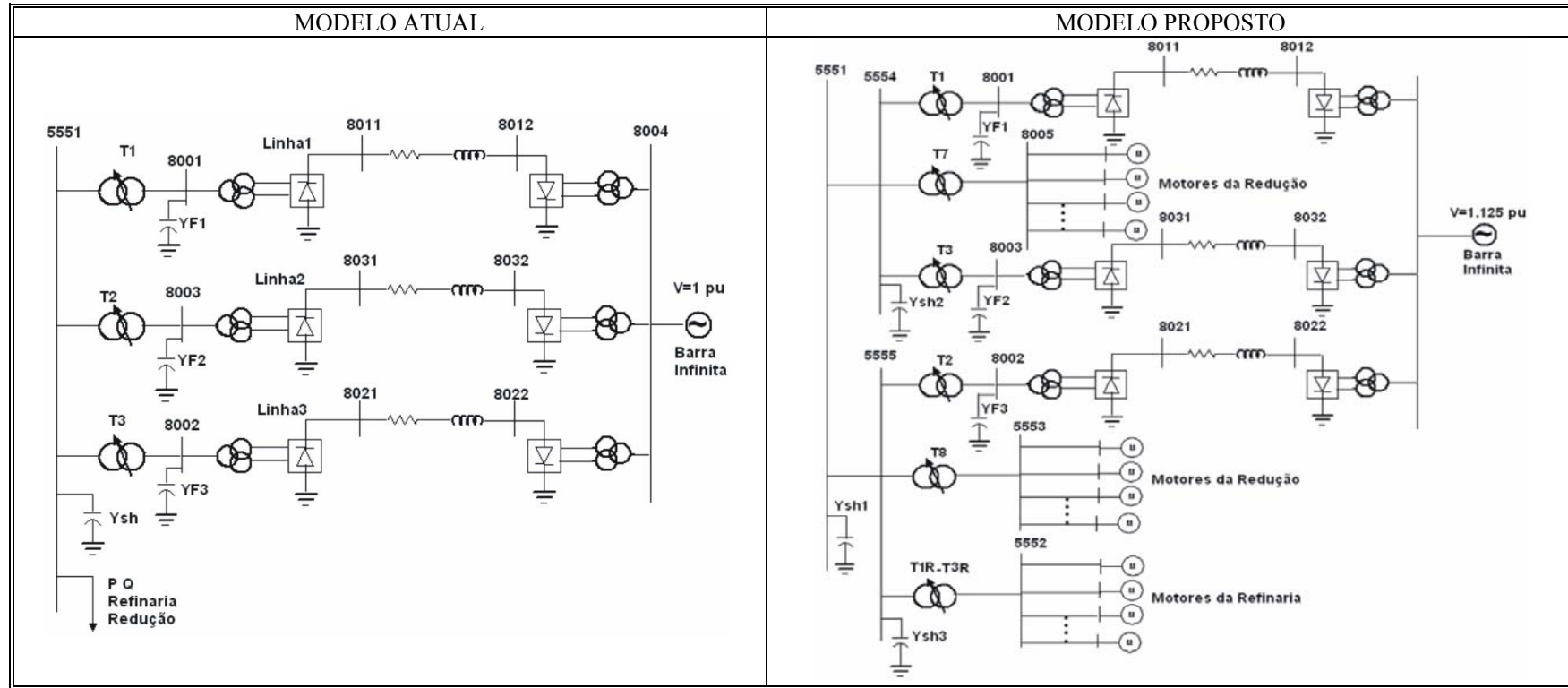


Figura 4.25. Fluxo de potência reativa entre a barra da ALUMAR de 230 kV e o barramento dos motores

Tabela 4.5. Diagramas unifilares – Modelos atual e proposto



CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de modelo de carga representando parte de uma indústria de grande porte para estudos de estabilidade de tensão no regime-dinâmico usando modelos convencionais de estudos de estabilidade transitória angular. Não houve nenhum desenvolvimento de novos modelos de carga (não existentes na literatura) a partir de medições de campo. O que se procurou fazer aqui foi, expandir a representação do sistema de distribuição da indústria conforme sugerido pela literatura especializada e representar de forma explícita as impedâncias dos bancos de capacitores, dos transformadores, dos alimentadores as dinâmicas dos motores de indução. Em diversos cenários de problemas de estabilidade de tensão esses fatores desempenham um papel importante nos principais mecanismos que podem levar um sistema ao colapso parcial ou total de tensão, principalmente quando o cenário envolve motores de indução industriais (grande porte), cargas especiais e elevado índice de compensação de potência reativa capacitiva. É justamente nesta observação que a motivação do trabalho está baseada.

A área da indústria investigada é extremamente compensada e carregada, sendo que sua composição de cargas apresenta características especiais, propícias à problemas de controle de tensão. As salas de cubas, como são conhecidas as cargas mais relevantes da indústria, consomem juntas atualmente, aproximadamente, 756 MW. Essas salas são equipadas com retificadores que fazem a conversão ac-cc para suprimento dos altos fornos. Além das salas de cubas, a indústria possui uma composição de motores de indução que consomem aproximadamente 67 MW/47 Mvar (SEs Refinaria e Redução). Juntando-se a essas características das cargas relevantes ao fenômeno da estabilidade de tensão, tem-se o uso massivo de capacitores cujo objetivo principal é manter um nível de tensão adequado para a operação do elo de corrente contínua (disparo dos tiristores). A compensação capacitiva não está restrita apenas as barras próximas a indústria e pertencentes ao sistema de transmissão, também existem bancos de capacitores localizados na sua parte interna.

Justifica-se, portanto, o interesse em adequar o modelo de carga dessa indústria para investigar problemas de tensão nesta área.

A validação da modelagem proposta está baseada na simulação de um evento real que resultou num colapso parcial de tensão no sistema Norte, e cuja comparação foi feita entre os resultados registrados (valores eficazes) em campo (barras do sistema industrial e do sistema de transmissão) e os calculados nas simulações computacionais. Para este tipo de comparação, ou seja, usando valores eficazes de tensão, os resultados foram satisfatórios. Entretanto, se faz necessário mais estudos de campo envolvendo mais registros de perturbações e conseqüentemente mais simulações computacionais para aprimorar o modelo. Não há dúvidas que comparações envolvendo curvas registradas em campo, com as obtidas através de simulações computacionais, seria a forma mais indicada para validar e ajustar o modelo. Entretanto, como não se dispunha dessas informações na época do desenvolvimento do trabalho, foram usadas as únicas informações disponíveis para verificar o desempenho do modelo proposto, os valores eficazes das tensões em determinadas barras. Além disso, a realização de novas medições de campo para capturar eventos compatíveis com o fenômeno sob investigação não é uma tarefa trivial e que depende de diversos fatores, sendo os principais a disponibilidade de equipamentos e de pessoal para tal fim. Portanto, o modelo apresentado aqui corresponde a uma primeira versão para estudos de estabilidade de tensão de curta-duração, e que pode ser aprimorada.

Um das vantagens do modelo proposto é que permite estudos mais específicos envolvendo os motores de indução devido a maior flexibilidade em termos de distribuição de carga. Foram visualizadas as respostas de determinados grupos de motores a seqüência de eventos simulada, caracterizando investigações internas a indústria. Também, essa nova proposta permite investigações mais realistas envolvendo problemas de tensão no sistema Norte Brasileiro, devido justamente ao melhor detalhamento do sistema de distribuição e a inclusão das dinâmicas inerentes aos motores de indução. Em todos os testes, os efeitos associados a geração/absorção de potência reativa pelos capacitores, transformadores e alimentadores radiais foram capturados de uma forma mais eficiente e realista pelo modelo proposto.

A eficiência do modelo de carga depende também da confiabilidade dos parâmetros associados aos dispositivos modelados (capacitores, transformadores e alimentadores). As informações associadas a esses parâmetros (impedâncias) foram obtidas na própria indústria através de comunicação privada com seus engenheiros, técnicos, e manuais, sendo, portanto, a priori, confiáveis. O problema está relacionado com os parâmetros dos motores de indução uma vez que estes dados não estavam disponíveis nem nos manuais dos motores. Para superar este problema foram identificados na literatura valores que poderiam ser usados em função das características dos motores de indução. Entretanto, é necessário uma investigação mais detalhada a fim de obter os parâmetros reais desses motores.

Ficam como sugestões para futuros trabalhos, baseado nas conclusões deste, os seguintes itens:

- 1) Desenvolvimento/Aplicação de metodologia para estimação dos parâmetros dos motores de indução usados na indústria;
- 2) Avaliação do impacto da modelagem de carga na implementação e testes de ações preventivas e/ou corretivas contra problemas de controle/estabilidade de tensão;
- 3) Uso de curvas/informações reais obtidas a partir de registradores e também de simulações computacionais para ajuste e aprimoramento do modelo de carga.

APÊNDICE

Diagrama Unifilar Norte – Nordeste

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KUNDUR, P., “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, 1994.
- [2] TAYLOR, C.W., “Power System Voltage Stability”, McGraw-Hill, 1994.
- [3] Rangel, Ricardo Diniz; Gomes Junior, S., Modelagem da Carga do Consumidor Industrial Alumar no Anatem e Anarede, 1999.
- [4] Júlio Cesar Roma Buzar. Análise em Regime-Permanente e no Domínio do Tempo Para Detecção e Visualização de Problemas de Controle de Tensão. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade) - Universidade Federal do Maranhão, 2003.
- [5] Massière y Corrêa, W.B, Modelagem de Carga em Empresas de Distribuição para Estudos Dinâmicos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, D46/03, IC/UFF, Niterói, Fevereiro, 2003.
- [6] Mauricio, W., Semlyen, A., Effect of Load Characteristics on the Dynamic Stability of Power System – IEEE TRANSACTIONS ON POWER AND APPARATUS SYSTEMS, Vol. PAS-91, p. 2295 – 2304, Nov/Dec. 1972.
- [7] Concordia, S., Ihara, S., Load Representation in Power System Stability Studies, IEEE TRANSACTIONS ON POWER AND APPARATUS SYSTEMS Vol. PAS-101, nº 4, p. 969 – 977, April 1982.
- [8] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance – Load Representation for Dynamic Performance Analysis – IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol.8, n.º2, p. 472 – 482, May 1993.
- [9] Karlsson, D., Hill, D.J., Modeling and Identification of Nonlinear Dynamics Loads in Power System, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol.9, n.º1, p. 157 – 166, Feb. 1994.
- [10] Ribeiro, J.R., Lange, F.J., A New Aggregation Method for Determining Composition Load Characteristics – IEEE TRANSACTIONS ON POWER AND APPARATUS SYSTEMS, Vol.PAS-101, n.º8, p. 2869 – 2875, Aug. 1982.
- [11] Zhu, S.Z.; Zheng, Luo, G.M., Effect of load modeling on voltage stability, IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, Vol.1, 16-20 July 2000 p.395 - 400 vol. 1.
- [12] Martins, N.; Gomes, S., Jr.; Henriques, R.M.; Gomes, C.B., Impact of induction motor loads in system loadability margins and damping of inter-area modes, IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, Vol.3, 13-17 July 2003.

- [13] Pal, M.K., Voltage stability conditions considering load characteristics, IEEE POWER SYSTEMS, IEEE TRANSACTIONS ON, Vol. 7, Issue 1, Feb. 1992, p. 243 – 249.
- [14] M. K. Pal, Voltage stability analysis needs, modeling requirement, and modeling adequacy, IEE PROCEEDINGS OF PART C., vol. 140, pp. 279-286, July 1993.
- [15] CEPEL, Anatem - Manual do Usuário – versão V09-12/01, 2001.
- [16] CEPEL, Anarede – Manual do Usuário – versão V07-08/99, 1999.
- [17] CEPEL, Relatório técnico, Modelagem da carga do consumidor industrial Alumar nos programas Anarede e Anatem-Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Outubro de 1999.
- [18] The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis, Ajarapu V. and Christ C. IEEE transaction on Power System, Vol 7.No.1. Februray 1992. pp.416-423.
- [19] Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC System, Cañizares C.A. and Alvarado F.L IEEE transactions on Power Systems. Vol.8.No.1. February 1993.pp 1-8.
- [20] CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations; Chiang H-D. et al., IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. No.2, May 1995, pp.623-630.
- [21] Voltage Stability Assessment for Real-Time Operation Prada, R.B.; Palomino, E.G.C.; dos Santos, J.O.R.; Bianco, A.; Pilotto, L.A.S.; Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- Volume 149, Issue 2, March 2002 Page(s):175 – 181.
- [22] On Static Analysis of Long Term Voltage Stability. PhD thesis. Löf P-A. Royal Institute of technology, Stockholm. Sweden. 1995.
- [23] A Method for Calculation of Margins to Voltage Instability Applied on the Norwegian system for Maintaining required Security Level. Flatabo N. et al. IEEE Transaction on Power system; Vol.8.No.3.August 1993.pp.920-928.
- [24] Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power System, Obadina O.O and Berg G.J; IEEE Transactions on Power System. Vol.3.No4.Novembrer 1988. pp.1545-1552.
- [25] Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis, Gao B. et al, IEEE Transaction on Power System, Vol.7, No.4., November 1992, pp.1529-1536.
- [26] Point of Collapse Methods applied to AC/DC Power System, Cañizares C.A. et al IEEE transactions on Power Systems. Vol.7.No.2. May 1992.pp 673-680.

- [27] Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC System, Cañizares C.A. and Alvarado F.L IEEE transactions on Power Systems. Vol.8.No.1. February 1993.pp 1-8.
- [28] Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power System, Obadina O.O and Berg G.J; IEEE Transactions on Power System. Vol.3.No4. November 1988. pp.1545-1552.
- [29] A Method to Compute Reactive Power Margins with respect to Voltage Collapse, Van Cutsem, IEEE Transactions on Power System, Vol.6, No. 1, February 1991,pp.145-153.
- [30] New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations using Tangent Vectors de Souza, A.C.Z.; Canizares, C.A.; Quintana, V.H.; Power Systems, IEEE Transactions on Volume 12, Issue 3, Aug. 1997 Page(s):1380 – 1387.
- [31] Avaliação da Estabilidade de Tensão: Comparação entre a Análise por Autovalores/Autovetores e o Determinante da Matriz Reduzida [D'], Proc III Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, campos do Jordão, Novembro 1997.
- [32] An Indicator of the Risk of Voltage Profile Instability for Real-time Control Applications, C.Lamaitre, J.P. Paul, J.M.Tesson, Y.Harmand, and Y.S.Zhao, IEEE summer Meeting 1989, paper 89SM713-9 PWRs.
- [33] Voltage Stability Condition in a Power Transmission system calculated by Sensitivity Methods, IEEE Transaction Vol. PWRs-5, No 4,pp.1286-1293, November 1990.
- [34] R.L.Burden, J.D. Faires, Numerical Analysis, PWS-KENT Publishing Company, Boston 1989.
- [35] U.M. Ascher, L.R. Petzold, "Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations", Society for Industrial and Applied Mathematics-SIAM, 1998.
- [36] Flueck, Alexander J.; Chiang, Hsiao-Dong. (1998). Solving the Nonlinear Power Flow Equations with a Newton Process and GMRES. Transactions on Power Systems, vol. 13, no 2, pp. 67-273.
- [37] Vorst, H. A. Van Der. (2003). Iterative Krylov Methods for Large Linear Systems. Cambridge University Press.
- [38] E.Hairer, G. Wanner, Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems, 2nd revised Edition, Springer Series in Comput. Math., Vol. 14, Springer, Berlin, 1996, 614pp.

- [39] J.R. Cash, Modified Extended Backward Differentiation Formulae for the Numerical Solution of Stiff Initial Value Problems in EDOs and DAEs, *Comput. Math.* 125. (2000) 117 - 130.
- [40] J.R. Cash, The Integration of Stiff Initial Value Problems in EDOs Using Modified Extended Backward Differentiation Formulae, *Comp. Math. Appl.* 9 (1983) 645 - 660.134
- [41] J.R. Cash, S. Considine, An MEBDF Code for Stiff Initial Value Problems, *ACM Trans. Math. Software* 18 (1992) 142 - 160.
- [42] R. (1880). Étude Sur les Formulas D'approximation qui Servent à Calculer la Valeur Numérique D'une Intégrale Définie, *J. Math, Pures Appl. Sér. 3, 6*, 283-336.
- [43] J. Crank, P. Nicolson, A Practical Method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of the Heat-Conduction Type, *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 43 (1947) 50-67.
- [44] C.F. Curtiss, J.O. Hirschfelder, Integration of Stiff Equations. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 38, pp.235-243.
- [45] L. Fox, E.T. Goodwin, Some New Methods For The Numerical Integration Of Ordinary Differential Equations, *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 45 (1949) 373-388.
- [46] W.S. Loud, On The Long-Run Error In The Numerical Solution Of Certain Differential Equations, *J. Math. Phys.* 28 (1) (1949) 45-49
- [47] G. Dahlquist, A Special Stability Problem for Linear Multistep Methods. *BIT*, vol. 3, pp. 27-43, (1963).
- [48] J.C. Butcher, Integration Processes Based on Radau Quadrature Formulae, *Math. Comput.* 18 (1964) 233-244.
- [49] B.L. Ehle, On Padé Approximations To The Exponential Function and A-stable Methods For The Numerical Solution Of Initial Value Problems, Report CSRR 2010, Dept. AACS, Univ. of Waterloo, Ontario, Canada.
- [50] O. Axelsson, A class of A-stable methods, *BIT* 9 (1969) 185-199.
- [51] E.Hairer, G. Wanner, Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems, 2nd revised Edition, Springer Series in Comput. Math., Vol. 14, Springer, Berlin, 1996, 614pp.
- [52] Alex.A.Paz, Implementação de um Simulador Numérico Num Programa Computacional de Estabilidade, Dissertação de Mestrado,CPGEE, UFMA, Fevereiro, 2004.

[53] P.W. Sauer, M.A. Pai, "A Comparison of Discrete vs Continuous Dynamic Model of Tap-Changing-Under-Load Transformers", III Seminar on Voltage Stability, Security & Control, 22-26 August 1994. Davos, Switzerland.

[54] J.E.O. Pessanha, Análise do Fenômeno da Estabilidade de Tensão no Domínio do Tempo: Simulação dos Períodos Transitórios e de Longo - Termo, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC - Rio, Dezembro, 1997.

[55] J.L. Jardim, "Utilização de Ferramentas de Simulação Dinâmica de Longa Duração na Análise de Fenômenos de Colapso de Tensão e no Treinamento de Operadores", XIV SNTPEE, Belém, Pará, Outubro 1997.