



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS – UFT
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL DE
SISTEMAS

ANTÔNIO CARLOS PEREIRA CAMAROTTO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM EQUIVALENTE
DINÂMICO PARA O SISTEMA ELÉTRICO NEW ENGLAND**

Palmas – TO.

2015

ANTÔNIO CARLOS PEREIRA CAMAROTTO

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM EQUIVALENTE
DINÂMICO PARA O SISTEMA ELÉTRICO NEW ENGLAND

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional de Sistemas da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional de Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. George L. Ribeiro de Brito

Palmas – TO.

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

CAMAROTTO, Antônio C. P.

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM EQUIVALENTE DINÂMICO PARA O SISTEMA ELÉTRICO NEW ENGLAND – Palmas - Tocantins, 2015.

Nº de páginas: 154

Área de concentração: Ciência da Computação, Modelagem Computacional.

Orientador: Prof. Dr. George L. R. BRITO

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Tocantins – UFT – Programa de Pós Graduação Modelagem Computacional de Sistemas.

1. Equivalente dinâmico; 2. Ajuste de parâmetros; 3. Sistema de potência; 5. Modelagem computacional.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Anastácio e Tereza, exemplos de amor e espelho da minha vida... à Letícia, Júlia e Núbia, mulheres, donas do meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS que nos piores momentos sempre demonstrou sua presença a esse filho, não merecedor de sua Graça.

À minha esposa Núbia e minhas filhas, Letícia e Júlia, por serem o mote desta empreitada e pelo companheirismo do dia a dia.

Ao meu orientador Prof. Dr. George Lauro R. Brito, pela paciência na orientação e compartilhamento de seu tempo e sua sabedoria, para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Frangiosi de Moura pela participação na Banca de Defesa da Dissertação e por sua contribuição neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Patrick Letouze Moreira, por sua persistência no incentivo a esse trabalho e pela dedicação ao PPGMCS.

Ao Prof. Dr. Marcelo Lisboa Rocha, pelas oportunidades dadas e pelo voto de confiança.

Ao Prof. Dr. David Nadler Prata, coordenador do Mestrado Profissional, pelo incentivo a esse trabalho e pela dedicação ao PPGMCS.

Aos meus professores e colegas, que compartilharam conhecimentos durante toda a jornada acadêmica.

Aos meus familiares e amigos, que torceram pela conclusão dessa etapa.

Aos amigos Abraham Zuniga e Valéria Momenté, pelo incentivo.

Aos amigos Marluce e Krumare Zacariotti.

À amiga Viviane Cristina Oliveira pela ajuda na leitura e revisão dos textos.

Ao IFTO na pessoa de seu gestor máximo Prof. Francisco Nairton do Nascimento, pelo apoio logístico e monetário e em especial aos Prof. Danilo Gomes Martins e Adriano dos Guimarães de Carvalho, pelo companheirismo.

A todos que de alguma forma se envolveram neste trabalho, meu obrigado.

**“ A mente que se abre a uma
nova ideia, jamais
voltará a seu tamanho
original.”**

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho foi baseado na metodologia desenvolvida para modelagem computacional de equivalentes dinâmicos de sistemas elétricos de potência apresentada em BRITO, 2009 [5]. Sendo que nesse trabalho desenvolveu um método de modelagem de equivalentes dinâmicos de sistemas elétricos de potência com geradores, máquinas e seus controladores. O equivalente dinâmico consiste em uma substituição de uma parcela de um Sistema Elétrico de Potência, composta por linhas de transmissão, barras de carga e barras geradoras, de forma que estas serão sintetizadas e minimizadas de forma que o número de elementos seja diminuído, mas conservem o comportamento dinâmico elétrico da área original, sendo o mais próximo possível do encontrado no sistema elétrico de potência original. Foram realizados cálculos teóricos para obtenção dos equivalentes estáticos e dinâmicos do referido sistema de potência. Para isso utilizamos o programa ANAREDE para obtenção dos resultados dos fluxos de carga do sistema completo e do sistema reduzido. Estes resultados foram utilizados em um programa de análise de pequenas perturbações, denominado PACDYN, o qual verifica o comportamento dinâmico dos sistemas. Para possibilitar essa análise foi incluída uma pequena perturbação de tensão no sistema, próxima à sua barra de referência angular. Os resultados encontrados pelo programa PACDYN foram exportados para um programa de análise matemática e simulações, denominado MATLAB, onde foram gerados os gráficos dos resultados obtidos e aplicada a técnica de mínimos quadrados, para ajuste dos resultados. Por meio da comparação dos fluxos de potência dos sistemas completo e equivalente, obteve-se a validação do trabalho, sendo utilizado o sistema *New England*, como sistema-teste. Neste trabalho aplicamos a metodologia desenvolvida em BRITO, (2009) [5] no sistema de potência-teste *New England*, complementando o trabalho original, em que a parte interna e externa do sistema, escolhida para construção do equivalente dinâmico eram interligadas por uma única barra de fronteira. Em nosso trabalho utilizamos uma área que nos demandou a utilização de quatro barras de fronteira, quatro linhas de transmissão e uma barra fictícia de acoplamento, onde foi conectado o gerador equivalente e cargas equivalentes. Comparando os resultados do sistema completo e reduzido obtivemos valores próximos o bastante para comprovar a robustez do sistema fictício e validar mais uma vez a metodologia.

Palavras-chave: Equivalente dinâmico; Ajuste de parâmetros; Redução de sistemas elétricos; Sistema elétrico de potência.

ABSTRACT

This work was based on the methodology developed for computer modeling of dynamic of electric power systems equivalents presented in BRITO, 2009 [5]. And in this work we developed a method of modeling of dynamic equivalents of electric power systems with generators, machines and their controllers. The dynamic equivalent consists of a substitution of a portion of an Electric Power System, consisting of transmission lines, the load buses and generating bars, so that these will be synthesized and minimized so that the number of elements is decreased, but retain the electric dynamic behavior of the original area, with the closest to the found in the electrical system of original power. Theoretical calculations for obtaining the static and dynamic equivalents of said power system were performed. For that use the ANAREDE program to obtain the results of the full system load flows and reduced system. These results were used in a parsing program small disturbances, called PACDYN, which checks the dynamic behavior of the system. To enable this analysis has included a small voltage perturbation in the system, next to its angular reference bar. The results found by PACDYN program were exported to a mathematical analysis and simulation program called MATLAB, which graphs the results obtained and applied the technique of least squares were generated to adjust the results. By comparing the equivalent of complete systems and power flows obtained if the validation work, by using the New England system as test system. In this paper we apply the methodology developed in BRITO, (2009) [5] in the New England power test system, complementing the original work, in which the inside and outside of the system, chosen to build the dynamic equivalent were joined by a single border bar. In our work we use an area which required us to use four border bars, four transmission lines and a dummy coupling bar, which was connected to the equivalent generator and equivalent charges. Comparing the results of the full and reduced system obtained values close enough to demonstrate the robustness of the dummy system and to validate again the methodology.

Keywords: power system; Load Flow; Dynamic equivalent; Parameter setting; Reduction systems.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - SEP New England, composto de 10 geradores, 39 barras, sendo uma barra de referência, 46 linhas de transmissão, 11 transformadores..... | 23 |
| Figura 2 - Estrutura completa de um SEP, Fonte: BRITO [5]. | 26 |
| Figura 3 - Eixos síncronos de d-q, e coordenados. Fonte: Brito [5]..... | 28 |
| Figura 4 - Modelo clássico de gerador. Fonte: BRITO [6] | 29 |
| Figura 5 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação de um gerador síncrono. Fonte: Manual CEPEL [8]..... | 31 |
| Figura 6 - Diagrama de blocos da representação de espaços de estado, retirado de [5]..... | 34 |
| Figura 7 - Divisão do SEP pelo equivalente dinâmico. Fonte: BRITO [5]..... | 39 |
| Figura 8 - Diagrama unifilar com gerador e carga equivalente. Fonte: BRITO [5]. | 42 |
| Figura 9 - Processo de ajuste de parâmetros. Fonte: BRITO [5]..... | 45 |
| Figura 10 – Modelo de Equivalente dinâmico com dois geradores. Fonte: BRITO [6]..... | 49 |
| Figura 11 - Linha de transmissão, modelada somente com reatância, Fonte: CEPEL [8]. | 50 |
| Figura 12 - Equivalente estático de um SEP. Fonte: CEPEL [8]. | 50 |
| Figura 13 - SEP New England com indicação da área A1. | 59 |
| Figura 14 - Diagrama unifilar do sistema New England, com o equivalente dinâmico da área A1..... | 59 |
| Figura 15 - Reguladores automático de tensão modelo 1. Fonte: CEPEL [8] | 63 |
| Figura 16 - Ângulos δ da tensão do gerador equivalente. | 65 |
| Figura 17 - Tensões nas barras de fronteira da área A1 | 66 |
| Figura 18 - gráfico de comparação da potência ativa entre os geradores da área A1. | 67 |
| Figura 19 - gráfico de comparação da potência reativa dos geradores da área A1. | 68 |
| Figura 20 - gráfico de comparação da potência ativa entre as barras da área A1. | 69 |
| Figura 21 - gráfico de comparação da potência reativa entre as barras da área A1. | 70 |
| Figura 22 - gráfico das tensões da área A1 com o ajuste da tensão da barra de acoplamento | 71 |
| Figura 23 - gráfico dos ângulos das tensões..... | 72 |
| Figura 24 - gráfico da potência ativa na linha 4-5 e linha 4-200(1). | 73 |
| Figura 25 - gráfico da potência ativa da linha 4-14 e 4-200(2). | 74 |
| Figura 26 - gráfico de potência ativa da linha 14-15 e 200-15..... | 75 |
| Figura 27 - gráfico de potência ativa na barra 39-9 e 200-39. | 76 |
| Figura 28 - gráfico de potência reativa da linha 4-5 e 4-200(1)..... | 77 |
| Figura 29 - gráfico da potência reativa da linha 4-14 e 4-200(2). | 78 |
| Figura 30 - gráfico de potência reativa da linha 14-15 e 200-15..... | 79 |
| Figura 31 - Gráfico de potência reativa da linha 9-39 e 39-200 | 80 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Dados do fluxo de potência entre as barras de fronteira. | 60 |
| Tabela 2 - Magnitude e fase da tensão nas barras 39, 4 e 15 do sistema completo. | 60 |
| Tabela 3 - Dados do fluxo de potência entre as barras de fronteira do sistema reduzido. | 60 |
| Tabela 4 - Valor de ajuste das reatâncias das linhas de interconexão. | 61 |
| Tabela 5 - Magnitude e fase da tensão na barra fictícia 200 para o sistema reduzido. | 61 |
| Tabela 6 - Parâmetros preliminares do gerador equivalente. | 63 |
| Tabela 7 - Parâmetros preliminares do RAT. | 64 |
| Tabela 8 - Parâmetros finais do gerador equivalente | 81 |
| Tabela 9 - Parâmetros finais do RAT equivalente. | 82 |
| Tabela 10 - Dados de linhas e transformadores - New England | 91 |
| Tabela 11 - Dados das barras do New England | 92 |
| Tabela 12 - Dados dos reguladores de Tensão do New England | 93 |
| Tabela 13 - Dados das máquinas do New England | 93 |

Lista de Símbolos

Símbolos Latinos

| | |
|------------------|--|
| A, B, C, D | Matrizes de estado, entrada, saída e de transmissão direta. |
| D_t | Constante de amortecimento do gerador. |
| E'_d, E'_q | Tensões interna do gerador nos eixos direto (d) e quadratura (q). |
| V_d, V_q | Tensões do gerador nos eixos d e q . |
| i_d, i_q | magnitudes das correntes, no tempo, do estator nos eixos d e q . |
| I_d, I_q | Correntes de armadura nos eixos d e q . |
| I_i | Injeção de corrente na barra terminal da máquina i . |
| M | Variável igual a duas vezes a constante de inércia. |
| H | Constante de Inércia em MW.s/MVA. |
| R_a | Resistência de armadura. |
| P_g, Q_g | Potências, ativa e reativa, nas barras terminais do gerador (pu). |
| P_e, P_m | Potências, elétrica no entreferro e mecânica do gerador (pu). |
| S_i | Potência aparente nominal do i -ésimo gerador. |
| x_d, x_q | Reatâncias síncrona de eixo direto e em quadratura, |
| f | Frequência em Hz. |
| V | Tensões de terminal do gerador. |
| E_{fd} | Tensões de campo do gerador. |
| u_{mi}, u_{fi} | Sinais de entrada do regulador de velocidade — turbina e do sistema de excitação. |
| G_{mi}, G_{fi} | Funções de transferência do regulador de velocidade — turbina e do sistema de excitação. |
| Y_{GG} | Submatriz de admitância de dimensão ($m \times m$). |
| Y_{Gt} | Submatriz de admitância de dimensão ($m \times m_t$). |
| Y_{tG} | Submatriz de admitância de dimensão ($m_t \times m$). |
| Y_{tt} | Submatriz de admitância de dimensão ($m_t \times m_t$). |

Símbolos Gregos

| | |
|------------|---|
| δ | Ângulo do rotor do gerador (ou de carga). |
| Δ | Designação para variação instantânea em relação a um ponto de operação para duas grandezas similares. |
| ϵ | Valor positivo suficientemente pequeno para designar tolerância numérica. |
| λ | Designação usada para autovalor. |
| θ | Ângulo das barras terminais de uma barra. |
| ω | Velocidade angular do rotor do gerador. |

Siglas

| | |
|---------|---|
| ANAREDE | Programa de Análise de Redes. |
| ANATEM | Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos. |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica. |
| CEPEL | Centro de Pesquisas de Energia elétrica. |
| COA | Centro angular (Center Of Angles). |
| COI | Centro de Inércia (Center Of Inertia). |
| ESP | Estabilizador de Sistema de Potência. |
| FACTS | Sistema de Transmissão CA Flexível (Flexible AC Transmission System). |
| HVDC | Sistema de Transmissão de energia elétrica CC em alta tensão (High-Voltage Direct Current). |
| IEEE | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos. |
| LT | Linha de Transmissão de energia. |
| MATLAB | Programa de cálculo numérico e análises. |
| MIMO | Sistema com múltiplas entradas e múltiplas saídas (Multiple Input Multiple Output). |
| MQ | Método de ajuste de curvas por Mínimos Quadrados. |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico. |
| PACDYN | Programa de Análise Dinâmica para Análise de Estabilidade a Pequenos Sinais. |
| RAT | Regulador Automático de Tensão. |
| REI | Estrutura Radial, Equivalente, em uma única barra e Independente do restante do sistema. |

| | |
|------|--|
| RV | Regulador de Velocidade. |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência. |
| SIN | Sistema Interligado Nacional. |
| SISO | Sistema com uma única entrada e uma única saída (Single input Single Output). |
| SVC | Compensador Estático de Reativo (Static Var Compensator). |
| TCSC | Compensador Série Controlado a Tiristor (Thyristor Controlled Series Compensato. |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM EQUIVALENTE DINÂMICO PARA O SISTEMA ELÉTRICO NEW ENGLAND | 1 |
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 Justificativa | 17 |
| 1.2 Objetivo Geral | 18 |
| 1.3 Objetivos Específicos | 18 |
| 1.4 Estrutura do Trabalho | 18 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 20 |
| 2.1 Sistemas e Modelos | 20 |
| 2.2 Abordagem Sistemática de Modelos | 20 |
| 2.3 Modelos de Sistemas | 20 |
| 2.4 Verificação e validação do Modelo | 21 |
| 2.5 Sistemas Elétricos de Potência | 21 |
| 2.6 Equivalente Dinâmico | 22 |
| 2.7 Definição das áreas de um SEP | 22 |
| 2.8 Agregação dinâmica dos geradores e dos controladores para a área delimitada | 24 |
| 2.9 Ajuste dos parâmetros do equivalente dinâmico | 25 |
| 2.9.1 Modelagem de Sistema Elétrico de Potência | 26 |
| 2.9.2 Modelo de um SEP. | 26 |
| 2.9.3 Modelagem de Máquinas Síncronas | 29 |
| 2.9.4 Sistema de Excitação | 31 |
| 2.9.5 Equações de Estado | 32 |
| 3 METODOLOGIA | 36 |
| 3.1 Delimitação de Área do SEP | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.2 Equivalente estático de Rede | 38 |
| 3.3 Agregação dinâmica dos geradores | 40 |
| 3.4 Agregação dos elementos de controle | 44 |
| 3.5 Método dos mínimos quadrados | 46 |
| 3.5.1 Conceitos | 46 |
| 3.5.2 Cálculo dos parâmetros | 47 |
| 3.6 Ajuste de parâmetros do equivalente dinâmico por mínimos quadrados | 47 |
| 3.7 Procedimento para o Equivalente dinâmico | 48 |
| 3.8 Redução estática da rede | 49 |
| 3.9 Identificação dos parâmetros do gerador e controlador equivalente | 51 |
| 3.10 Equivalente dinâmico com base em um gerador com modelo clássico | 53 |
| 3.11 Ferramentas computacionais | 55 |
| 4 DESENVOLVIMENTO | 58 |
| 4.1 Estimativa de parâmetros | 61 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 65 |
| 5.1 Ajuste de parâmetros com modelo 3 (PACDYN) de gerador e mínimos quadrados. | 81 |
| 6 CONCLUSÕES | 83 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 85 |
| 8 ANEXOS | 91 |

1 INTRODUÇÃO

Com o sistema nacional de transmissão de energia todo interligado, as empresas de energia são obrigadas a considerar suas áreas de concessão e também outras áreas limítrofes, cuja propagação de distúrbios provenientes de fora de sua concessão pode influenciar bastante a estabilidade de seus sistemas. Faz-se, portanto, a obrigatoriedade do planejamento nos sistemas e a modelagem dinâmica do sistema, completa, para que possam prevenir suas atuações. Com o advento da desregularização do setor elétrico, em que os grandes consumidores podem contratar seu fornecimento de energia de concessionárias que ficam distantes de suas unidades consumidoras, as empresas são obrigadas a realizar monitoramento e coordenar transações de fornecimento e recebimento de energia que ocorreram a longas distâncias.

Outro fator que se deve considerar é o crescimento demográfico das regiões com aumento do número de consumidores. Todos esses fatores motivam a utilização de equivalentes dinâmicos, bem como as avaliações da segurança dinâmica em SEP; implementação de eficiência estratégica de controle de manutenção do sistema; fortalecimento do SEP em situações de ilhamento do sistema [12]; estabelecimento de índice de confiabilidade e qualidade de um sistema de potência interconectado.

O custo de simulações dinâmicas de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) de grande porte, considerando todos os detalhes, torna-se muito dispendioso e requer um esforço computacional imenso, por isso, a utilização de modelos, que possam ser reduzidos e que mantenham as características do modelo original. Os SEP interconectados são divididos em áreas externas, as quais possam ser representadas por equivalentes dinâmicos de sistemas elétricos e áreas internas que conservem suas características originais para estudos mais aprofundados. Esse método de modelagem desenvolvido em BRITO, 2009 [5] consiste em restringir uma ou mais áreas do sistema em áreas reduzidas que mantenham as suas características dinâmicas, sem grandes variações, possibilitando que sejam realizadas avaliações de segurança dinâmica de sistemas elétricos [47], estabilidade transitória [30], estudos de funções de energia [22] e dimensionamento de controladores para o SEP [17].

Esse trabalho consiste na aplicação da metodologia desenvolvida em BRITO, 2009 [5] e segue um roteiro preestabelecido para a modelagem computacional de equivalente dinâmico de um SEP.

Considerando que um sistema de potência divide-se em áreas, por meio da coerência de geradores, divisão geográfica ou mesmo por área de concessão das concessionárias, escolhe-se uma ou mais áreas, para que seja a área a ser reduzida. Chamaremos esta área escolhida de **área externa**. O restante do sistema será classificado como área interna e permanecerá inalterado. Preparamos os dados da área a ser reduzida, (dados de barras, dados de linhas de transmissão, de geradores e de cargas) e utilizamos o programa ANAREDE para cálculo do fluxo de carga da área completa, através do método de solução de Newton Raphson. Reduzimos a área externa o máximo possível e através do programa ANAREDE solucionamos o cálculo do fluxo de carga da área reduzida. Utilizando os dados do ANAREDE elaboramos um **equivalente estático** para o sistema reduzido, sendo esse procedimento detalhado no capítulo de desenvolvimento. Exportamos os dados do sistema completo e reduzido para ao programa PACDYN, onde acrescentamos uma pequena perturbação na referência angular dos sistemas e analisamos o comportamento dinâmico dos mesmos.

O programa PACDYN gera um arquivo de saída para ser lido no programa MATLAB. Com esses dados do programa PACDYN geramos os gráficos de comparação de diversas grandezas dos sistemas completo e reduzido e comparamos os resultados.

Para melhorar o ajuste das curvas no sistema reduzido é utilizado dentro do MATLAB o método dos mínimos quadrados.

1.1 Justificativa

Este trabalho tem como principal justificativa a demonstração de que a metodologia apresentada no trabalho de BRITO, 2009 [5] é válida em diversas situações e pode ser aplicada em outras áreas dos SEPs já estudados, formando uma ferramenta completa de redução de esforço computacional e otimização do tempo na obtenção dos resultados nos cálculos de fluxo de carga. Podendo ser aplicada também em facilitação de estudos de estabilidade transitória; segurança dinâmica de SEP e estabelecimento de índices de confiabilidade em SEPs.

1.2 Objetivo Geral

Obter um equivalente dinâmico de um sistema elétrico de potência, utilizando a metodologia desenvolvida em BRITO, 2009 [5] que a partir da redução e substituição de uma parte de um sistema elétrico de potência, mantém no sistema reduzido as características do sistema original, diminuindo a quantidade de equações algébricas e diferenciais a serem utilizadas, minimizando o esforço computacional para o cálculo de fluxo de carga.

1.3 Objetivos Específicos

Considerando o SEP-teste New England, já utilizado, necessitamos:

- Escolher uma área do SEP-teste New England para construção de nosso equivalente dinâmico, dentre as áreas pré-divididas por BRITO, 2009 [5];
- Elaborar um equivalente estático a partir dos dados obtidos pelo cálculo do fluxo de carga do sistema reduzido;
- Elaborar um equivalente dinâmico através dos dados obtidos no equivalente estático, incluindo os parâmetros dos geradores e dos reguladores automáticos de tensão (RAT) e considerando um desequilíbrio pequeno na referência angular de nossa área;
- Apresentar os resultados do sistema reduzido e comparar com o sistema completo;
- Ajustar as curvas do sistema reduzido às curvas do sistema completo utilizando o método de mínimos quadrados.

1.4 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo, temos a introdução do trabalho, a justificativa, bem como os objetivos do mesmo.

No segundo capítulo, temos nossa fundamentação teórica do trabalho, falamos sobre modelagem de sistemas e discorremos também sobre a modelagem de máquinas síncronas, seu sistema de excitação e as equações de estado.

No terceiro capítulo, escrevemos sobre a metodologia aplicada, onde fazemos uma revisão sobre os trabalhos que abordam o equivalente dinâmico, baseados em análise modal e apresentamos as formas de delimitação do SEP para este trabalho. Demonstramos ainda a utilização do método de mínimos quadrados e a obtenção dos parâmetros dinâmicos aplicando o método. Calculamos o equivalente estático para o sistema reduzido, demonstramos a metodologia para a obtenção dos parâmetros dinâmicos.

No quarto capítulo, apresentamos os desenvolvimentos dos cálculos e como foram utilizados os programas de modelagem com o programa **ANAREDE**, para o equivalente estático; e **PACDYN**, para os dados dinâmicos e o programa **MATLAB**, nas análises e o ajuste das curvas, pelo método de Mínimos Quadrados.

No quinto capítulo, apresentamos gráficos dos resultados parciais e finais e as comparações entre o SEP teste completo e o sistema equivalente reduzido.

No sexto capítulo, trazemos a conclusão geral do trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros.

Trazemos na sequencia os Anexos ao Trabalho.

Incluimos neste capítulo as tabelas de dados do sistema New England contendo: a Tabela de dados de linhas e transformadores; a Tabela de dados das barras de carga e das barras de tensão controlada (geradoras); tabela de dados dos reguladores de tensão automáticos (RAT) e tabela de dados das máquinas síncronas (geradores);

O diagrama do sistema New England Completo, com os parâmetros de tensão, potência ativa e reativa das linhas, numeração das barras e dos geradores e potência elétrica dos transformadores, utilizamos todas as grandezas representadas por unidade ou em pu.;

Incluimos os arquivos gerados pelo programa ANAREDE com os dados do cálculo dos fluxos de carga do sistema completo e reduzido.

Incluimos os arquivos de parâmetros dos geradores e RATs do sistema completo e reduzido, que juntamente com os fluxos de carga geraram os arquivos “matlab.out” de cada sistema para que pudéssemos analisar o balanceamento dinâmico de cada SEP;

Encontram-se os programas-fonte dos arquivos **completo_15full.m**; **main_neweng_mod3_15f1.m** e **myfun_mod3_f.m** que são responsáveis pela análise dinâmica dos dados, pela plotagem dos gráficos e pelo ajuste das curvas pelo método de mínimos quadrados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas e Modelos

Os Sistemas têm um agrupamento coordenado de partes que possuem seu funcionamento, visando alcançar um determinado objetivo. São basicamente constituídos de entrada, processo de transformação e saída. Eles devem ter mecanismos de controle e avaliação da saída que visem avaliar a coerência e o alcance dos objetivos estabelecidos. Este mecanismo pode ou não realimentar sua entrada para otimizá-lo.

Os Modelos são basicamente a descrição do funcionamento de um sistema de forma tal que as principais e mais importantes características do sistema sejam contempladas.

2.2 Abordagem Sistemática de Modelos

A abordagem sistemática de modelos visa à transcrição de sistemas físicos em modelos matemáticos passíveis de utilização de modelagem computacional, simulação e análise dos resultados, visando à simplificação ou o aprimoramento dos equipamentos, processos ou métodos. Com a utilização da modelagem computacional podemos conseguir diversos resultados que atendem as nossas necessidades e que deverão ser analisados e validados, podemos assim nortear a escolha da melhor solução.

2.3 Modelos de Sistemas

Para que consigamos construir um modelo que melhor se adeque as nossas necessidades, diversos fatores devem ser analisados e nesse tópico verificamos a necessidade de conhecimentos interdisciplinares e nisso consiste a parte mais complexa de nosso estudo.

Definamos agora as etapas a serem cumpridas para a construção de nosso modelo:

- Definição do problema;
- Concepção do sistema;

- Representação do sistema;
- Comportamento do sistema;
- Avaliação do modelo;
- Estratégia de utilização do modelo.

2.4 Verificação e validação do Modelo

Para elaboração do modelo utilizado serão realizadas ações que verifiquem a forma conceitual adotada na formulação do modelo que irá satisfazer nossas expectativas e utilização das linguagens de programação ou de softwares específicos. Consideramos essa verificação para variados tipos de entrada e para parâmetros do sistema. Para a validação do trabalho utilizamo-nos de um ou diversos parâmetros preestabelecidos para verificação da consistência dos dados obtidos.

2.5 Sistemas Elétricos de Potência

Os sistemas elétricos de potência - SEP são responsáveis pela transmissão de energia em grandes áreas, onde diferentes empresas de energia podem atuar. São compostos por diversos geradores (hidrelétricas, termoelétricas e outras fontes de energia), centenas de linhas de transmissão e equipamentos que contemplam uma alta complexidade de operações e de planejamento. Lembrando que em nosso país todos os sistemas são interconectados, aumentando muito a complexidade dos cálculos nos sistemas. As empresas são obrigadas a levar em consideração não somente a área de sua concessão, mas também todos os sistemas do entorno [28].

Para que esse trabalho seja possível, existe uma demanda muito grande de planejamento e engenharia operacional, necessitando que os sistemas sejam modelados de forma a poder prever perturbações provenientes de fora de sua área de concessão. Com isso, a simulação dinâmica dos sistemas torna-se vital para as Concessionárias de Energia.

Para que o SEP seja avaliado em seus diversos parâmetros é efetuado o cálculo do fluxo de carga. Este consiste em determinar os fluxos de potências ativa e reativa (grandeza e sentido da direção) nas linhas de transmissão de energia, as tensões nas

barras ou subestações (módulo e ângulo) e outras grandezas de interesse. Esses estudos são usados no planejamento do sistema e em planejamento do futuro para o sistema de potência [28].

2.6 Equivalente Dinâmico

Consideramos o sistema em estudo um equivalente dinâmico com características desejáveis. É um elemento que substituirá uma parte do nosso sistema de potência (SEP) e a que chamaremos de **parte externa**. Isto é, será assim chamada, porque não será objeto de estudo minucioso em nosso fluxo de carga. Definiremos como **parte interna**, aquela em que consideraremos todos os detalhes, em análise minuciosa.

Na verdade, o esforço para chegarmos a um equivalente dinâmico confiável é bastante extenso, mas depois de concluído, este tende a minimizar o esforço computacional, no cálculo de fluxo de carga de um SEP [17].

2.7 Definição das áreas de um SEP

Para este trabalho definiremos o limite entre a parte externa e a parte interna do SEP, através da utilização da área de concessão das empresas de energia elétrica, no limítrofe entre as partes interna e externa do sistema em estudo. Para maior facilidade na validação do método utilizaremos um sistema de potência-teste chamado New England. Este sistema é composto de 10 geradores, 39 barras, sendo 29 barras PQ (barras de carga), 10 barras geradoras (barras de tensão controlada - PV), sendo a barra de nº 39 a referência angular do sistema e 46 linhas de transmissão. Foi delimitada a área A1 do SEP New England como a **parte externa** do sistema.

A figura a seguir nos dá uma topologia do sistema New England.

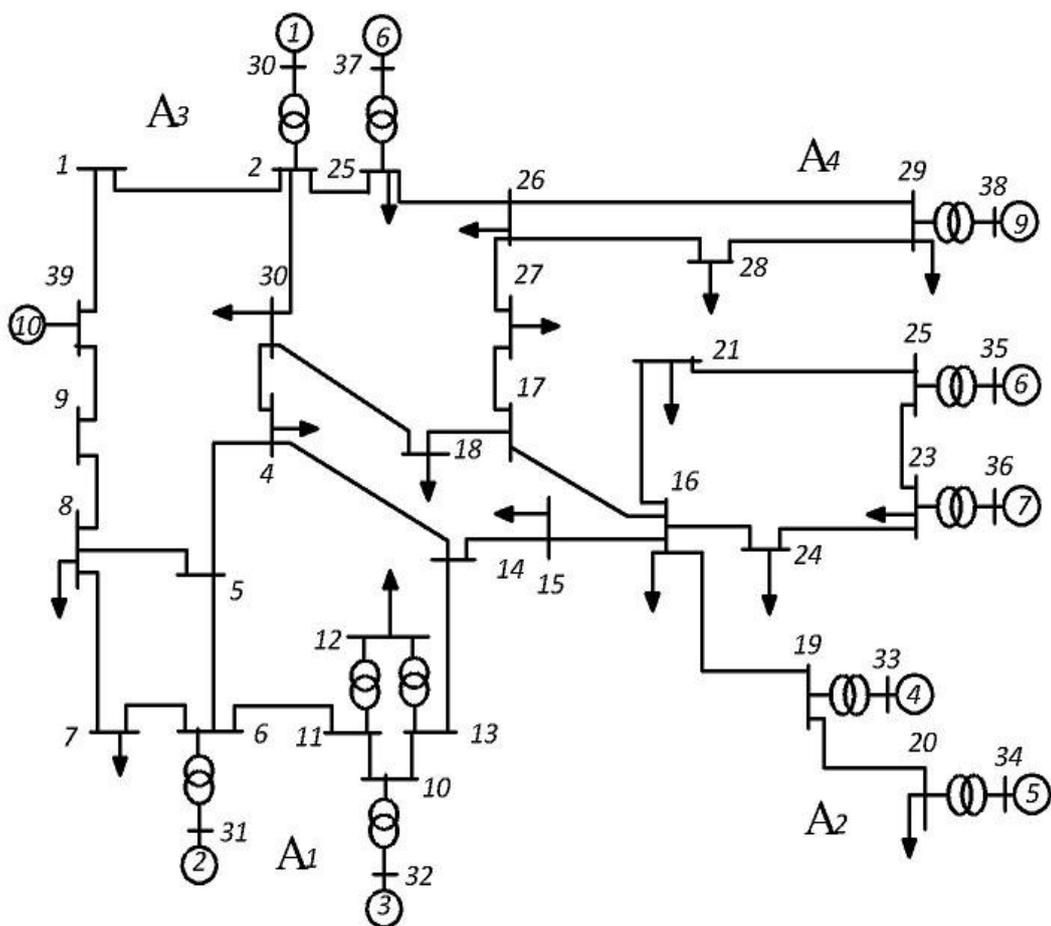


Figura 1 - SEP New England, composto de 10 geradores, 39 barras, sendo uma barra de referência, 46 linhas de transmissão, 11 transformadores.

Apresentamos uma sequência de ações para construção de um equivalente dinâmico:

- Definição das áreas de um SEP;
- Redução estática da rede elétrica interconectada;
- Agregação dinâmica dos geradores e dos controladores para a área delimitada;
- Ajuste dos parâmetros do equivalente dinâmico, através de otimização, baseada na técnica de Mínimos Quadrados (MQ).

Considerando a metodologia já comprovada pelo trabalho de Brito, 2009 [5], utilizaremos o fluxo de carga obtido pelo Programa de Análise de Rede - ANAREDE e pelo (Centro de Pesquisas de Energia elétrica - CEPTEL) para validar os resultados.

Delimitamos como objeto deste trabalho o recorte da área A1 do sistema New England para nosso equivalente dinâmico, no limítrofe entre as partes interna e externa, que chamaremos de agora em diante de Barra ou Barras de Acoplamento, sendo definida como área externa do sistema.

Pela própria topologia do desenho devemos considerar mais de uma barra de acoplamento. Estas barras serão as barras 39, 4, 15, consideradas as linhas de transmissão 39 – 9; 4 – 5; 4 – 14 como acoplamento entre as áreas 1 e 2 e a linha 14 – 15 como acoplamento entre as áreas 1 e 3.

Definimos nossa barra fictícia equivalente como a barra 200. Esta barra formará as linhas de acoplamento seguintes: linha 39-200; 4-200(1); 4-200(2); entre as áreas 1 e 2 e a linha de acoplamento 200-15, entre as áreas 1 e 3.

2.8 Agregação dinâmica dos geradores e dos controladores para a área delimitada

Após o cálculo do fluxo de carga do sistema completo e do sistema equivalente, ajustamos as reatâncias percentuais (X%) das barras de acoplamento para que a potência ativa das linhas de transmissão de acoplamento seja o mais próxima possível, pois assim mantém-se o balanceamento do sistema [5].

Para verificação da parte dinâmica dos sistemas utilizaremos o programa PACDYN da CEPEL [8]. Será criado um pequeno distúrbio de tensão (surto de 10% de elevação na tensão, próxima a barra de referência) nos dois sistemas e serão gerados arquivos de saída para análise, pelo MATLAB.

No MATLAB, os dados dos arquivos de saída do PacDyn serão transformados em gráficos e comparados entre si. Para um aprimoramento da curva de saída do sistema equivalente utilizaremos o método de mínimos quadrados, adequando a saída do sistema equivalente o máximo possível à saída do sistema completo.

2.9 Ajuste dos parâmetros do equivalente dinâmico

Neste trabalho, o procedimento para determinar um equivalente dinâmico de um SEP é descrito da seguinte forma:

- a) Delimitação das áreas do SEP;
- b) Redução estática da rede interconectada;
- c) Agregação das máquinas de uma mesma área externa;
- d) Identificação dos parâmetros do equivalente dinâmico.

Para fins de identificação dos parâmetros, as equações do SEP podem ser assim descritas:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\tau).\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\tau).u(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(\tau).\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(\tau).u(t) \quad (2)$$

onde os vetores de variáveis a serem atualizadas, sendo $\mathbf{x}(t)$ variáveis de estado; $\mathbf{y}(t)$ variáveis de saída e $u(t)$, variáveis de entrada.

No procedimento principal, para calcular os parâmetros do equivalente, as matrizes $\mathbf{A}(\tau)$, $\mathbf{B}(\tau)$ e $\mathbf{C}(\tau)$ são ajustadas em função dessas variáveis. Esse procedimento continua iterativamente até que as saídas no modelo completo e com o equivalente sejam aproximadamente iguais, a menos de uma dada tolerância. Com esse objetivo, realiza-se simulação no domínio do tempo para computar os sinais de saída no modelo completo, uma vez; e no modelo com equivalente, tantas vezes necessárias até que haja convergência dos parâmetros.

O ajuste dos parâmetros é feito com base na minimização do índice (função objetivo). A função objetivo utilizada compara os valores de $\Delta'P$ e $\Delta'Q$ (variação de fluxos de potência ativa e reativa) nas interligações de fronteira, comparando então com os valores de ΔP e ΔQ do sistema original completo. Assim, o problema consiste em resolver simultaneamente as seguintes equações:

$$\text{Min} \left\| \sum_{k=0}^{NP} \Delta P_{ij}(k) - \Delta'P_{ij}(k) \right\| \quad (3) \quad \text{e}$$

$$\text{Min} \left\| \sum_{k=0}^{NP} \Delta Q_{ij}(k) - \Delta'Q_{ij}(k) \right\| \quad (4)$$

Esse processo é iterativo e usa o método de mínimos quadrados (MQ). O melhor ponto desse problema fornece sua solução. Como é um método iterativo, a sua convergência é influenciada pelos valores iniciais de partida.

Consideramos a manipulação das equações do sistema New England, área A1, como área externa e objeto-região do método para determinação de equivalentes dinâmicos proposto neste trabalho.

2.9.1 Modelagem de Sistema Elétrico de Potência

Apresentamos as principais etapas para modelagem de um SEP. Esta modelagem é de fundamental importância para a análise de estabilidade.

É um estudo baseado na formulação do problema com equações diferenciais e algébricas de máquinas síncronas, sistemas de excitação, reguladores de tensão e de velocidade, cargas e linhas de transmissão que com suas particularidades afetam a compreensão do propósito dos equivalentes dinâmicos.

2.9.2 Modelo de um SEP.

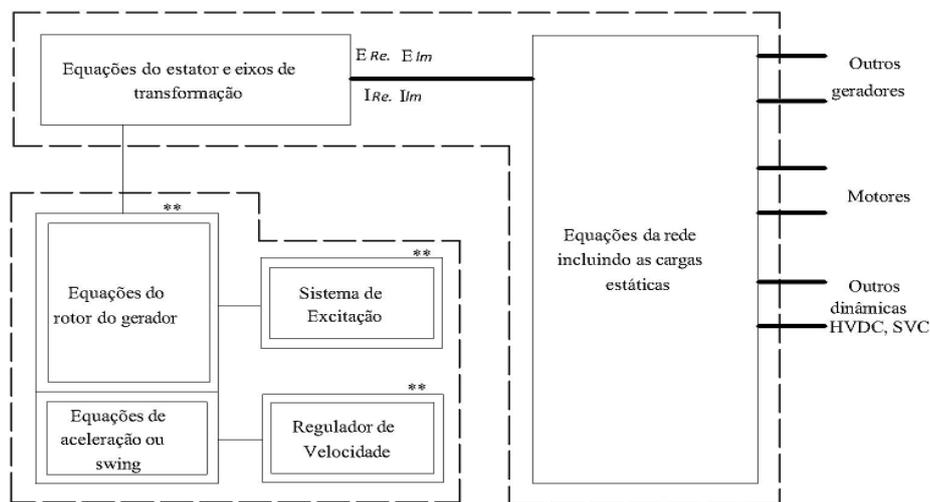


Figura 2 - Estrutura completa de um SEP, Fonte: BRITO [5].

A representação completa de um SEP inclui a modelagem dos seguintes componentes:

- Geradores síncronos, sua turbina e seus sistemas de excitação;
- A Rede de transmissão interconectada ao SEP;
- Cargas estáticas, motores de indução e síncronos;
- Dispositivos reguladores e conversores tipo HVDC e FACTS.

A análise do estudo de estabilidade requer uma modelagem apropriada de cada elemento do SEP, devendo as equações ser organizadas de forma que possa aplicar a metodologia adequada para o estudo de cada questão.

Os elementos do SEP serão representados por equações diferenciais e algébricas e cada modelo de máquina tem expresso sua própria referência $d-q$ que acompanha o movimento do rotor. Para solução em redes interconectadas, todas as tensões e correntes devem ter uma referência comum, normalmente uma referência em velocidade síncrona é utilizada nesses casos. As equações dos eixos de transformação são usadas para efetivar a transformação entre a referência $d-q$ e a referência comum (síncrona). Como demonstraremos na figura 3. Para organização do conjunto completo de equações algébricas, as equações do estator também acompanham a referência comum.

Partindo do eixo Re como referência para medição do ângulo do rotor da máquina, tomando uma representação detalhada de uma máquina, com os efeitos dinâmicos dos circuitos do rotor, utilizamos o ângulo δ pelo qual o eixo q avança em relação ao eixo Re , como demonstraremos na figura 3 e nas equações (5) a (8), a seguir.

Na utilização do modelo clássico de máquina síncrona, o ângulo do rotor é o ângulo pelo qual a tensão transitória interna E' se adianta em relação ao eixo Re .

Sob condições dinâmicas, o ângulo δ varia com a velocidade do rotor, conforme será demonstrado na fig. 3.

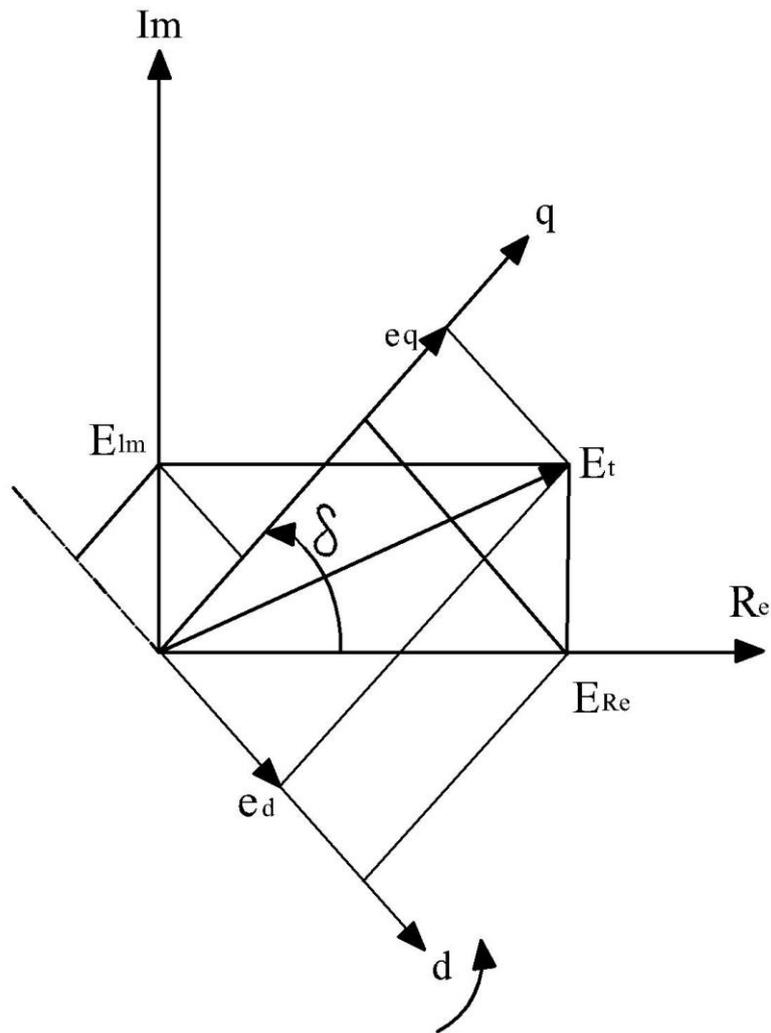


Figura 3 - Eixos síncronos de d-q, e coordenadas. Fonte: Brito [5]

$$e_d = E_{Re} \cdot \text{sen} \delta - E_{Im} \cdot \text{cos} \delta \quad (5)$$

$$e_q = E_{Re} \cdot \text{cos} \delta - E_{Im} \cdot \text{sen} \delta \quad (6)$$

$$E_{Re} = e_d \cdot \text{sen} \delta - e_q \cdot \text{cos} \delta \quad (7)$$

$$E_{Im} = -e_d \cdot \text{cos} \delta + e_q \cdot \text{sen} \delta \quad (8)$$

O Sistema acima definido pelas equações (5) a (8) é utilizado em [5] e no aplicativo PACDYN [8]. As equações de estado para análise do SEP devem ser formuladas através de equações lineares, conforme um dos oito modelos pré-definidos pelo software [8], em torno de um ponto de operação e as outras variáveis que não são

de estado devem ser eliminadas. Dessa forma, para que possamos formular as equações de estado, devemos seguir um procedimento sistemático.

2.9.3 Modelagem de Máquinas Síncronas

A Máquina Síncrona tem como principais elementos um rotor e um estator, sendo o primeiro um elemento girante e o segundo um elemento fixo. Para acionamento da mesma, é necessária uma fonte que lhe forneça potência mecânica, sendo uma parte desta energia transformada em energia elétrica e a outra parte fornece aceleração ao rotor da máquina.

A figura 4 nos traz um modelo simples chamado de clássico, onde é demonstrado o circuito elétrico equivalente para o modelo.

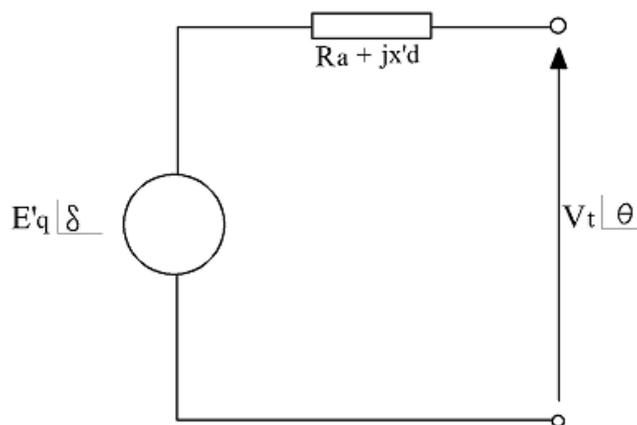


Figura 4 - Modelo clássico de gerador. Fonte: Brito [6]

Consideramos $x_d' = x_q'$ e a tensão interna E'_q / δ , sendo que neste caso δ é aproximadamente igual ao ângulo do rotor, em que δ varia com o tempo e o módulo da tensão E'_q é mantido constante. Através do circuito da fig. 4 encontramos a equação:

$$E'_q / \delta = (R_a + jx'_d) \cdot I + V_t / \theta \quad (9)$$

Sendo V_t a magnitude da tensão terminal do gerador e θ é o ângulo de fase da tensão.

A equação de oscilação da máquina (swing), representada na equação nº 3, tem-

$$2H \dot{\omega} = P_m - P_e - D_t \omega \quad (10)$$

$$\delta = \dot{\omega}_0 (\omega - 1) \quad (11)$$

Sendo:

H – constante de inércia, em MW.s/MVA;

P_m – potência mecânica, em pu;

P_e – potência elétrica, em pu;

D_t – é a constante de amortecimento, em pu/pu;

δ – é o ângulo do rotor, em rad;

$\dot{\omega}$ – é a velocidade angular, em pu.

Linearizando as equações (3) e (4), temos:

$$2H \Delta \dot{\omega} = \Delta P_m - \Delta P_e - D_t \Delta \dot{\omega} \quad (12)$$

$$\Delta \delta = \omega_o \Delta \omega \quad (13)$$

Representando somente os efeitos transitórios no eixo q ($x_d' = x_q'$, $E_d' = 0$), temos:

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} \text{sen } \delta & -\text{cos } \delta \\ \text{cos } \delta & \text{sen } \delta \end{vmatrix} \bullet \begin{pmatrix} V_{\text{Re}} \\ V_{\text{Im}} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Sendo V_d e V_q componentes de tensão no sistema (d, q);

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} \text{sen } \delta & -\text{cos } \delta \\ \text{cos } \delta & \text{sen } \delta \end{vmatrix} \bullet \begin{pmatrix} I_{\text{Re}} \\ I_{\text{Im}} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Analogamente I_d e I_q são correntes no sistema (d, q); conseguimos calcular P_e , sendo:

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q + R_a (I_d^2 + I_q^2) \quad (16)$$

2.9.4 Sistema de Excitação

O sistema de excitação fornece corrente contínua para o circuito de campo das máquinas síncronas, controlando a tensão e a corrente de campo girante das máquinas síncronas [25], devendo, portanto, ajustar a corrente de campo dos geradores síncronos para manter a tensão terminal dentro dos padrões apropriados. Além disso, pode contribuir com a estabilidade da máquina, fortalecendo assim a própria estabilidade dinâmica do sistema, melhorando a velocidade das respostas em distúrbios transitórios.

Elementos de um sistema de excitação

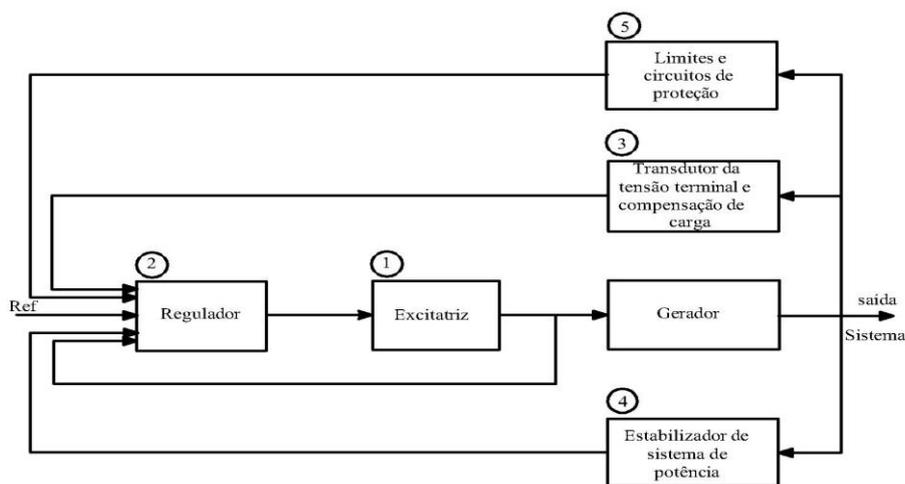


Figura 5 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação de um gerador síncrono.

Fonte: Manual CEPEL [8]

- (1) Excitatriz: responsável pelo fornecimento de corrente contínua ao enrolamento de campo da máquina síncrona;
- (2) Regulador: Processa e amplifica os sinais de entrada de controle para um nível e formato adequado a excitatriz. Regula e estabiliza o sistema da excitatriz;
- (3) Transdutor de tensão terminal e compensação de carga: Identifica a tensão do terminal do gerador, retifica e filtra para o nível necessário de corrente contínua, tendo como base uma tensão de referência;
- (4) Estabilizador do sistema de potência: fornece um sinal de entrada adicional ao regulador, com a finalidade de amortecimento das oscilações eletromecânicas do SEP;

(5) Limites e circuitos de proteção: é formado por diversas funções de controle e proteção que asseguram que a capacidade da excitatriz e da máquina síncrono não sejam ultrapassados.

Os modelos de máquinas e seus reguladores podem ser então demonstrados através de equações de estado, como faremos a seguir.

2.9.5 Equações de Estado

Podemos representar o modelo linearizado de cada dispositivo dinâmico com a seguinte expressão:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i \Delta v \quad (17)$$

$$\Delta i_i = C_i x_i - Y_i \Delta v \quad (18)$$

Onde:

$x_i \rightarrow$ valores perturbados das variáveis de estado do dispositivo individual;

$i_i \rightarrow$ injeção de corrente na rede do dispositivo;

$v \rightarrow$ vetor das tensões de barra da rede.

Nas equações (12) e (13), B_i e Y_i são obtidos através de características específicas de cada componente, sendo então:

$$\dot{x}_i = A_D x + B_D \Delta v \quad (19)$$

$$\Delta i = C_D x - Y_D \Delta v \quad (20)$$

Onde \dot{x} é o vetor de estado do sistema completo e A_D e C_D são matrizes bloco diagonal compostas de elementos A_k e C_k associados com os dispositivos individuais k . Sendo a rede de transmissão interconectada representada pela equação:

$$\Delta i = Y_N \Delta v \quad (21)$$

Onde Y_N é a matriz de admitância nodal, incluído os efeitos de cargas estáticas nas barras.

Resolvendo a equação (20) associada aos dispositivos e a equação (21) associada a rede, temos:

$$C_D x - Y_D \Delta v = \Delta v \quad (22)$$

Portanto,

$$\Delta v = (Y_N + Y_D)^{-1} \cdot C_D x \quad (23)$$

Substituindo a equação (23) na equação (19), obtemos a equação de estado do sistema completo:

$$\dot{x}_i = A_D x + B_D (Y_N + Y_D)^{-1} \cdot C_D x = Ax \quad (24)$$

Portanto, a matriz de estado A do sistema completo é:

$$A = A_D + B_D (Y_N + Y_D)^{-1} \cdot C_D \quad (25)$$

Então, o Sistema linearizado completo pode ser expresso nas seguintes equações:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (26)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (27)$$

Sendo:

Δx o vetor de estado de dimensão n;

Δy o vetor de estado de dimensão r;

Δu o vetor de entrada de dimensão m;

A é a matriz de estado de dimensão n x n;

B é a matriz de entrada de controle, de dimensão n x m;

C é a matriz de saída, de dimensão r x m;

D é a matriz que define a proporção de entrada que aparece diretamente na saída de dimensão r x m.

Aplicando a Transformada de Laplace às equações (26) e (27) obtemos as equações de estado no domínio da frequência.

$$s \Delta x(s) - \Delta x(0) = A \Delta x(s) + B \Delta u(s) \quad (28)$$

$$\Delta y(s) = C \Delta x(s) + D \Delta u(s) \quad (29)$$

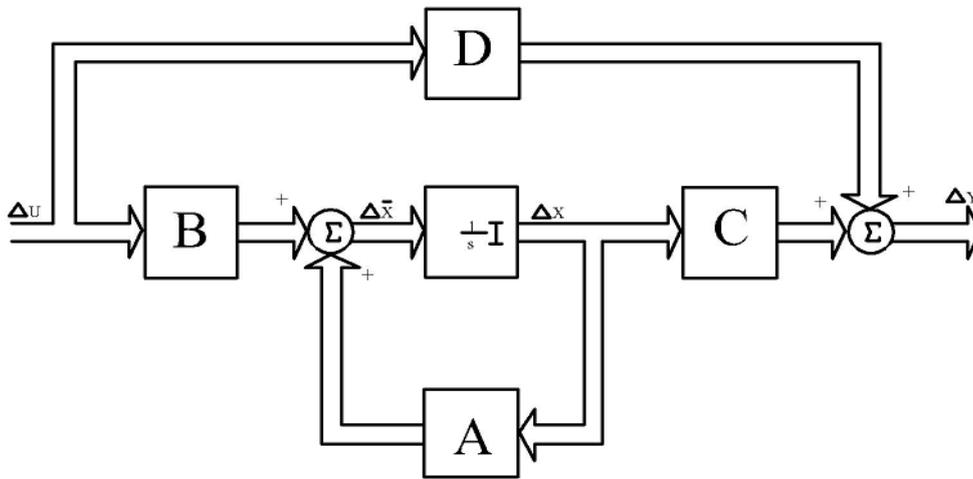


Figura 6 - Diagrama de blocos da representação de espaços de estado, retirado de [5].

A figura 6 nos mostra o diagrama de blocos da representação do espaço de estados. Para representação da função de transferência do sistema, as condições iniciais $\Delta x(0)$ são consideradas nulas.

Considerando uma obtenção de uma solução formal, utilizamos a solução de $\Delta y(s)$ em função de $\Delta x(s)$, como demonstraremos a seguir:

$$(sI - A)\Delta x(s) = \Delta x(0) + B\Delta u(s) \quad (30)$$

Temos então:

$$\Delta x(s) = (sI - A)^{-1}[\Delta x(0) + B\Delta u(s)] = \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} \cdot [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \quad (31)$$

$$\Delta y(s) = C \cdot \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} \cdot [\Delta x(0) + B\Delta u(s) + D\Delta u(s)] \quad (32)$$

Temos ainda uma modelagem mais geral e abrangente, com a seguinte equação:

$$E\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (33)$$

Onde temos E como a matriz singular, sendo que além das equações diferenciais temos equações algébricas, sendo este tipo de representação chamada de *sistema descritor*. Para essa representação teremos um maior número de equações para que se possa realizar análises de estabilidade a pequenas perturbações, obtemos matrizes bastante esparsas, o que nos favorece.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, vamos apresentar o processo de elaboração de um equivalente dinâmico, demonstrando algumas metodologias utilizadas para isso.

O procedimento de construção do equivalente dinâmico segue, a priori, a seguinte sequência:

- a) Delimitação das áreas do SEP, [12];
- b) Redução estática da rede interconectada, [33], [47];
- c) Agregação das máquinas de uma mesma área externa, [40], [45];
- d) Determinação dos parâmetros do equivalente dinâmico, [4], [6];

A metodologia de construção de equivalente dinâmico influencia diretamente na representação e na precisão da dinâmica das oscilações do SEP. Podemos basicamente resumir em dois grandes grupos de soluções: uma no domínio do tempo e outra no domínio da frequência.

Utilizamos essencialmente as soluções no domínio da frequência para buscar soluções que nos deem elementos da estrutura do SEP e soluções no domínio do tempo que nos levem à identificação dos parâmetros do sistema equivalente.

Através dos trabalhos de SOWA, 2008 [48] foram encontradas as seguintes especificidades de cada um dos métodos.

- Nos métodos que utilizam o domínio da frequência não representam o comportamento do sistema durante perturbações não simultâneas;
- Os métodos que utilizam o domínio do tempo são bons para identificação dos parâmetros de um sistema equivalente e não são bons nos estudos de estabilidade eletromecânica;
- Equivalentes calculados pelo domínio da frequência, utilizando-se de parâmetros não lineares não tem precisão aceitável;
- Estruturas otimizadas dos equivalentes não podem ser utilizadas em transitórios eletromecânicos.

O modelo do sistema no domínio do tempo é representado por equações diferenciais, sendo utilizadas para identificação de modelos de tempo discreto. Alguns

métodos de otimização determinísticos são utilizados para identificação dos parâmetros de sistemas equivalentes. São exemplos:

- Método de mínimos quadrados;
- Método Quase-Newton;
- Algoritmo de Powell sem derivadas.

A eficiência na identificação de parâmetros para equivalentes de redes depende dos seguintes fatores:

- Modelo estrutural do sistema;
- Números de parâmetros;
- Tamanho do passo computacional;
- Número de mínimos relativos da função.

Para que encontre um modelo ótimo reduzido deve-se utilizar de técnicas de identificação de parâmetros que garantam uma solução com o sistema sujeito a perturbações transitórias para qualquer configuração de sistema de potência. Quando não é possível a conclusão da identificação de parâmetros, podemos escolher um novo valor inicial com o intuito de se alcançar um erro mínimo global; ou então podemos alterar a estrutura básica do modelo.

3.1 Delimitação de Área do SEP

A maioria dos trabalhos de elaboração de equivalente dinâmico delimita a área em pelo menos duas divisões: **área interna** que será a área em que os estudos serão bastante detalhados e permanecerá intacta e a **área externa** que será utilizada na elaboração do equivalente dinâmico, sendo reduzida e compactada e deverá manter as dinâmicas da parcela original do SEP, mesmo quando submetido a perturbações.

Os SEP podem ser divididos por diversos critérios como: i) coerência de geradores [12], [31]; ii) delimitação física (limites geográficos de concessionária de energia elétrica) e iii) delimitação jurisdicional (determinadas por lei, decretos, etc.).

3.2 Equivalente estático de Rede

Para que seja realizada a redução estática, um primeiro passo é a eliminação das barras geradoras e barras de carga com impedância constante, obtendo-se a formação da rede elétrica equivalente. Para que isso seja possível, os geradores da área externa devem ser agregados em uma ou mais barras. Devemos lembrar que o fluxo de potência deverá permanecer constante durante qualquer período transitório. Verificamos que as barras de fronteira, tendo o sentido do sistema interno, recebem as variações de potências dos geradores que são refletidas radialmente neste sentido.

A literatura nos demonstra diversas técnicas para determinação de redes estáticas. Destacando-se a técnica do equivalente tipo REI [32] e a do equivalente tipo Ward [6], apresentando diversas questões importantes:

a) A identidade da barra não se perde, mas tem sua representação implicitada, quando da substituição pelo equivalente;

b) A potência reativa pode ser fornecida pelo equivalente, mas tem sua exatidão em torno do ponto de operação do caso base do fluxo de carga. Mas, para esse método, a utilização da tensão no problema garante maior precisão.

Sendo o Equivalente REI uma representação da rede, que preserva o conjunto de injeções de potência do caso base dos sistemas nas barras equivalentes.

Para o Equivalente Ward as questões importantes são:

a) Apresenta resultados razoavelmente exatos para fluxos de potência reais;

b) A precisão nos fluxos de potência reativos não é garantida nas variações no sistema.

O equivalente Ward-PV é uma variante do método original que retém as barras externas PV, suportando as respostas da potência reativa do sistema externa durante perturbações e consegue, assim, melhor exatidão do fluxo de potência reativo.

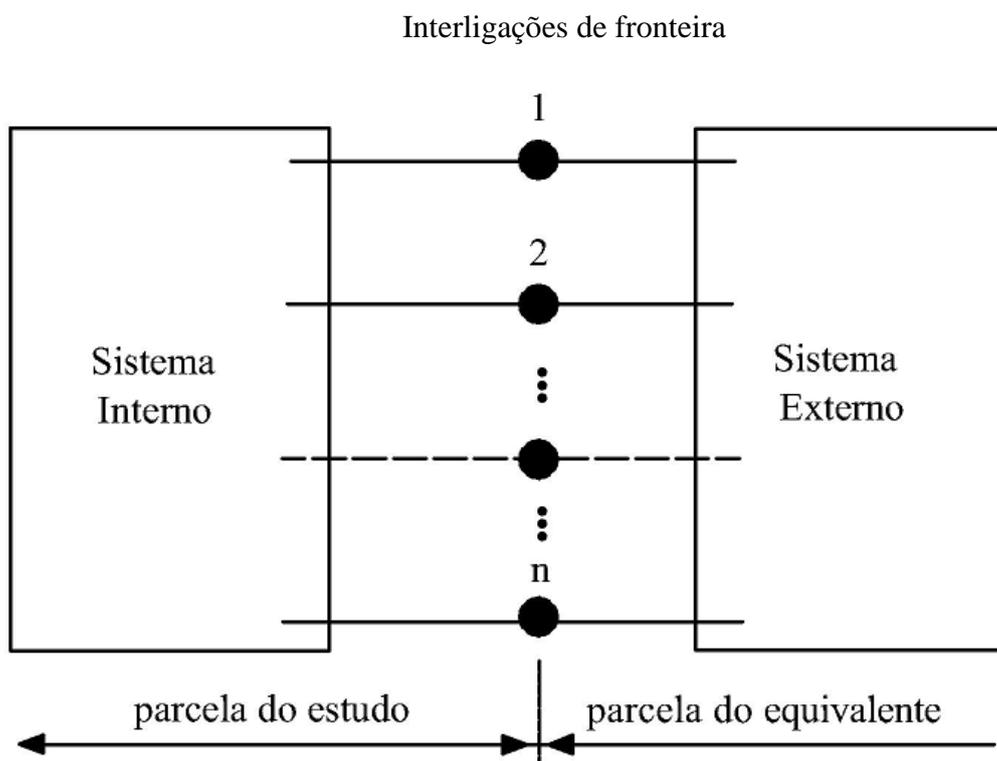


Figura 7 - Divisão do SEP pelo equivalente dinâmico. Fonte: Brito [5].

A figura 7 demonstra a divisão do SEP, quando da utilização do equivalente dinâmico. Chamamos de área interna, a parte do SEP que permanece inalterada e chamamos de área externa, a parte do SEP que será alterada para elaboração do equivalente dinâmico e será formada por barra ou barras equivalentes e interligações fictícias com o sistema interno, as quais chamamos de interligações de fronteira.

O equivalente estático tem a função de agregar as injeções de potência de um grupo de barras em uma ou mais barras fictícias. Sendo essas injeções das redes distribuídas entre a barra equivalente e o sistema interno. Todas as barras com injeção zero serão eliminadas.

O procedimento para se obter um equivalente estático de rede contém duas etapas:

- i) Com a solução do fluxo de carga do caso base, retiramos as barras que compõem o sistema externo, inserindo a barra ou barras equivalentes, os valores de admitância Y_i referentes à injeção de potência complexa S_R da rede, na barra R e sua tensão V_R são dados assim:

$$Y_i = -S_i^{**}/|V_i|^2, \quad i = 1, \dots, n \quad (34)$$

$$S_R = \sum_{i=1}^n S_i \quad (35)$$

$$V_R = \frac{S_R}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{V_i}\right)} \quad (36)$$

onde S_i é a injeção de potência complexa da rede na barra i .

ii) Eliminar as barras 1,2,...,n (nós passivos) pelo método de redução de Kron, onde a subtração de um ou mais nós é feita por operações numéricas, realizadas nas linhas e colunas das matrizes nodais de modo a obter a barra R, nesse caso consideramos a esparsidade da rede como critério de eliminação de barras.

Eliminando-se automaticamente as barras de rede, conforme o critério de modificação e ordenação definido, temos o caso de uma matriz de admitâncias da rede original Y e o subscrito B será o conjunto de barras a serem eliminadas, sendo o subscrito A, a matriz das barras que permanecerão na rede, teremos Y como:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} \\ Y_{BA} & Y_{BB} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Eliminando os nós passivo B, obtemos uma nova matriz admitância:

$$Y_{new} = \left[Y_{AA} - Y_{AB} \cdot Y_{BB}^{-1} \cdot Y_{BA} \right] \quad (38)$$

Em nosso caso de teste (sistema New England), todas as barras PQ e PV da área externa serão agrupadas em uma única barra de fronteira, onde todos os geradores com os seus controladores serão transformados em um único gerador equivalente e cargas da área externa serão transformadas em uma carga equivalente. Utilizaremos ainda quatro linhas de interligação fictícias para ligação da área interna e a área externa do SEP.

3.3 Agregação dinâmica dos geradores

A agregação dinâmica é definida pela substituição do conjunto de geradores e seus controladores de uma área definida (área externa) por um ou mais geradores fictícios equivalentes, que conservem as características dinâmicas do sistema original.

Na figura 9, temos um exemplo encontrado em BRITO [6] com um SEP com 5 geradores e 13 barras. Para ilustração do problema, definimos a mesma figura com a mesma divisão no sistema, ou seja, a área externa será formada pelos geradores 2, 4 e 5. Utilizando de um gerador equivalente G_{eq} .

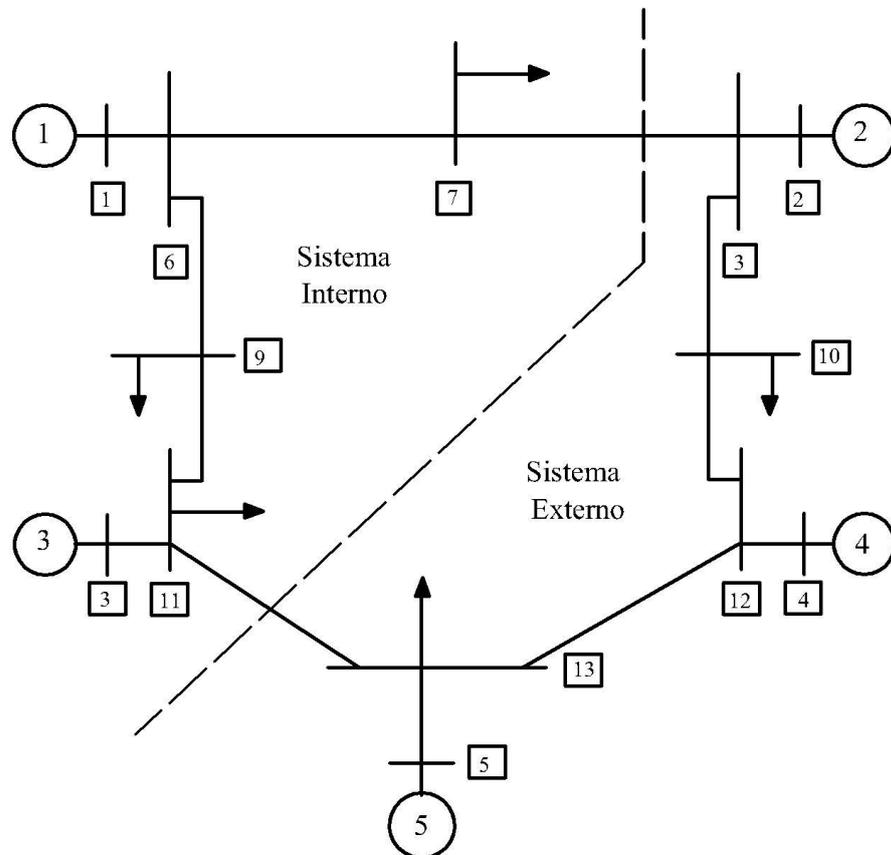


Figura 8 - Diagrama unifilar de um SEP com uma divisão de áreas interna e externa. Fonte: BRITO [5].

Como podemos verificar o sistema original na figura tem cinco geradores, portanto, a matriz admitância do sistema original é da ordem 5×5 . Para o equivalente dinâmico do sistema, substituiremos os geradores 2, 4 e 5 pelo gerador equivalente G_{eq} , temos, assim, uma nova matriz admitância de ordem 3×3 . Todos os elementos da área interna não sofrem alteração, entretanto, para a área externa, as linhas 7-8, 8-2, 8-10, 10-

12, 12-4, 12-13, 13-5 e 13-11, serão eliminadas e substituídas pelas linhas 7-beq e 11-beq, conforme nomenclatura em BRITO [6] e figura 10.

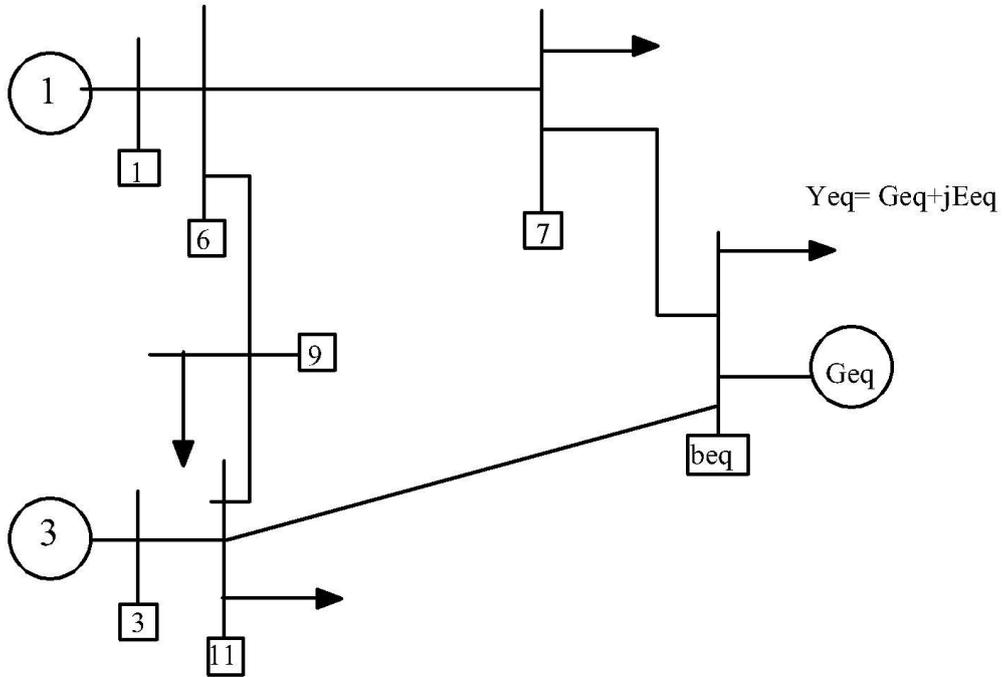


Figura 8 - Diagrama unifilar com gerador e carga equivalente. Fonte: Brito [5].

Considerando a modelagem de máquinas síncronas para nossos geradores, temos que as equações dinâmicas dos nossos geradores podem ser escritas da seguinte forma:

$$2H_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei}, i = 1, 2, \dots, n \quad (39)$$

Onde:

H_i : constante de inércia do $i^{\text{éssimo}}$ gerador;

δ_i : ângulo do rotor de do $i^{\text{éssimo}}$ gerador em uma estrutura síncrona;

P_{mi} : potência mecânica de entrada do $i^{\text{éssimo}}$ gerador;

P_{ei} : potência elétrica no entreferro do $i^{\text{éssimo}}$ gerador;

Sendo a potência elétrica do entreferro do $i^{\text{éssimo}}$ gerador é dada por:

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}), i = 1, 2, \dots, n \quad (40)$$

Onde:

$$C_{ij} = V_i V_j B_{ij} \quad (41)$$

$$D_{ij} = V_i V_j G_{ij} \quad (42)$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (43)$$

$$Y_{ij} = (G_{ij} + jB_{ij}) \quad (44)$$

Temos, portanto, que Y é a matriz admitância obtida pela eliminação de todas as cargas e todas as barras terminais dos geradores. Sendo V_i e V_j as tensões internas dos geradores i e j [28].

Pegando a equação (35) da potência do entreferro e simplificando-a, temos:

$$P_{ei} = V_i^2 G_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (45)$$

Por definição:
$$P_{ii} = P_{mi} - V_i^2 G_{ii} \quad (46)$$

$$P_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (47)$$

Sendo, portanto, a potência elétrica de saída do gerador equivalente.

A somatória das potências aparentes da parcela a ser reduzida, será:

$$\overline{S_T} = \sum_{i=1}^m \overline{E_i^* I_t} \quad (48)$$

A tensão interna,

$$\overline{E_t} = \overline{V_t} + jX'_{di} \overline{I_t} \quad (49)$$

Rearranjando a equação (44), tem-se que :

$$\overline{E_e} = \sum_{i=1}^m \overline{E_i^*} \frac{\overline{I_t}}{\overline{I_e}} = \frac{\overline{E_1^*} \overline{I_1} + \overline{E_2^*} \overline{I_2} + \dots + \overline{E_m^*} \overline{I_m}}{\overline{I_1} + \overline{I_2} + \dots + \overline{I_m}} \quad (50)$$

Onde :
$$\overline{I_e} = \sum_{i=1}^m \overline{I_i} \quad (51)$$

Sendo m , o número de geradores da parcela que deverá ser reduzida do sistema. Portanto, a equação (45) apresenta a tensão interna do gerador e a equação (46) à

corrente que circula internamente aos terminais do gerador equivalente. Dessa forma, a equação (34) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{2H_i}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \delta_i(t)}{dt^2} = P_{mi}(t) - P_{ei}(t) \quad (52)$$

Onde δ está em rad.

Podemos declarar que a equação (52) também pode ser expressa em função da referência angular da máquina. Nessa direção, o gerador com o maior momento de inércia torna-se a referência do sistema e o ângulo do rotor dos outros geradores são medidos através deste parâmetro. Para esse tipo de orientação, a instabilidade do sistema pode ser verificada, se o gerador exceder 180° no período, após a ocorrência de uma falha. Apesar de a fórmula utilizar o desenvolvimento para o modelo clássico de gerador, nada impede que a mesma seja aplicada em outros modelos.

3.4 Agregação dos elementos de controle

Não podemos desconsiderar a importância dos controles no comportamento dinâmico dos SEP, por isso não devemos fazê-lo quando da construção de equivalente dinâmico. Os sistemas de controle deverão ser considerados no processo de identificação de área e na agregação dos geradores.

A seguir definimos as principais etapas para isso:

- A divisão das áreas do sistema deve considerar o grupamento de geradores com sistemas de controle similares;
- Escolha de um controlador para substituição dos outros do grupo.

Uma tentativa empírica utilizada na prática é a utilização do controlador do maior gerador para substituição dos demais. Devendo posteriormente verificar a atuação do controlador equivalente no amortecimento das perturbações que for submetido. Geralmente, isto ocorre satisfatoriamente. Para que sejam avaliadas as respostas ou mesmo de reajuste dos parâmetros do sistema equivalente, consideramos o esquema na figura 11.

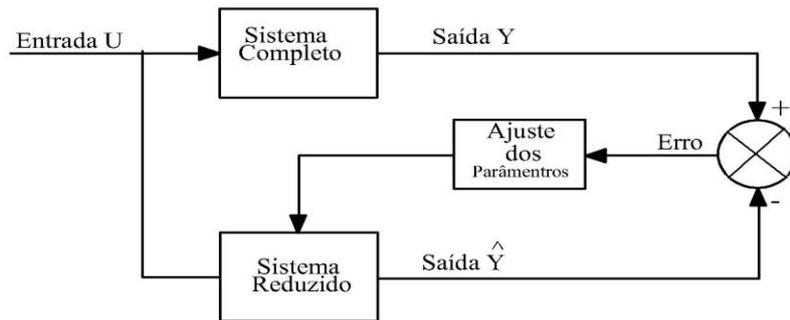


Figura 9 - Processo de ajuste de parâmetros. Fonte: Brito [5].

No diagrama anterior, verificamos que ambos os sistemas avaliados utilizam a mesma entrada u . Comparando-se as saídas dos sistemas, verificamos o erro entre a saída do sistema completo e a saída do sistema reduzido, encontrando-se uma diferença entre as saídas dos sistemas, encontramos um valor de erro e verificamos uma estimativa de ajuste. O processo se repete até que as saídas sejam bastante próximas ou dentro de valor de erro preestabelecido. Para entradas iguais e um equivalente dinâmico robusto as saídas serão iguais ou bem próximas.

Quando trabalhamos com sistemas de grandes áreas existe uma enorme dificuldade na obtenção de um equivalente dinâmico de qualidade. Uma das dificuldades encontrada é a de a representação por um ou mais geradores equivalentes com parâmetros desconhecidos. Nesses casos, a estimativa dos parâmetros segue medições internas de sinais do sistema em estudo [20].

Modelos de equivalentes dinâmicos desenvolvidos e testados em [27] e [28] apontam a importância da identificação adequada dos parâmetros para os equivalentes dinâmicos, considerando trabalhar-se essencialmente com equivalentes dinâmicos que utilizaram medidas em tempo real. Ficou comprovado que ao utilizarmos parâmetros de modelos não identificáveis, quando em regime pré e durante os distúrbios, mas são identificáveis, quando usamos dados pré, durante e pós distúrbios no SEP.

A forma de ajuste dos parâmetros utilizando-se do método de mínimos quadrados tem sido bastante empregada, sendo que a principal dificuldade para

solucionar o problema em mínimos quadrados é encontrar um conjunto de parâmetros que satisfaça plenamente as condições requeridas, bem como a convergência para um mínimo global. Para minimizar o problema foi proposto por BRITO [5] utilizar a técnica de Mínimos Quadrados, após uma estimativa inicial dos parâmetros do equivalente dinâmico.

3.5 Método dos mínimos quadrados

3.5.1 Conceitos

Consiste em determinar o melhor ajuste de pontos em relação a um modelo de referência definido. Devemos determinar o melhor ajuste para um conjunto de N_c curvas $\{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}$, tendo um conjunto de funções $f(t, \rho) \in \mathbb{R}^{N_c}$, sendo $y(t) \approx f(t, \rho)$, sendo $f(t, \rho)$ é função dos modelos dos parâmetros ρ que precisam ser ajustados. Assumimos que $y(t)$ nos instantes de tempo t_0, \dots, t_N são conhecidos. Com isso, para valores de $y(t)$ constituídos por elementos $y_j(t)$ representado a j -ésima curva, cuja representação é $f_j(t, \rho)$. Com isso, o problema dos MQ deve ser formulado, tendo como meta a minimização do desvio $|y_i(t) - f_j(t, \rho)|$ e considerando todas as curvas de forma simultânea nos seus respectivos instantes de tempo. Portanto, temos:

$$S(\rho) = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^N [y_j(t) - f_j(t, \rho)]^2 \quad (53)$$

Sendo N_c o número de curvas e N o número total de pontos na curva.

O nosso problema é encontrar um ρ que minimize $S(\rho)$. Como o problema envolve discretização no tempo, consideramos as seguintes convenções:

Y_{ij} é o valor ou medida de $y_j(t)$ no instante $t = t_i$;

$f_{ij}(\rho)$ é o valor estimado de $y_j(t)$ no instante $t = t_i$;

Portanto, o problema consiste em minimizar a soma dos desvios quadráticos, de cada curva $y_j(t)$ para cada tempo t_i , da seguinte forma:

$$E(\rho) = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^N [y_{ij} - f_{ij}(\rho)]^2 \quad (54)$$

3.5.2 Cálculo dos parâmetros

Para solucionar a equação (55) aplicamos primeiramente as condições de otimização de primeira ordem à função $E(\rho)$. Assim obtemos parâmetros ótimos $\rho^{(*)} = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{N_p}]$. As condições de otimização de primeira ordem considerando (56), são:

$$\frac{\partial E(\rho)}{\partial \rho_k} = 2 \cdot \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^N [y_{ij} - f_{ij}(\rho)] \left(\frac{\partial f_{ij}(\rho)}{\partial \rho_k} \right) = 0, k = 1, 2, \dots, N_c \quad (57)$$

Resolvendo a equação (50) é equivalente a determinar a solução do seguinte sistema:

$$\sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^N [y_{ij} - f_{ij}(\rho)] \left(\frac{\partial f_{ij}(\rho)}{\partial \rho_k} \right) = 0, k = 1, 2, \dots, N_c \quad (58)$$

Notamos que na equação (58), se $f_{ij}(\rho)$ for uma função não linear, então essa equação é também não linear. Portanto, os parâmetros deverão ser obtidos de forma iterativa, a partir de um ρ^0 . Esta estimativa inicial tem papel altamente importante no processo de convergência dos parâmetros para valores aceitáveis.

As condições de otimização de segunda ordem não serão avaliadas, assumindo-se que o ponto ótimo encontrado seja um mínimo local. Sendo assim, necessitaremos confirmar se a soma dos erros quadráticos acumulados é aceitável, sendo a solução viável.

3.6 Ajuste de parâmetros do equivalente dinâmico por mínimos quadrados

Apresentamos uma descrição sobre a construção do equivalente dinâmico. Para isso, como já declaramos anteriormente, primeiramente se elimina a parte do SEP identificada como área externa, em seguida efetua-se a identificação dos parâmetros dos geradores e seus controladores, pertencentes ao equivalente dinâmico.

3.7 Procedimento para o Equivalente dinâmico

Após haver determinado a área a parte externa do sistema, utilizaremos a concepção de que as potências que fluem do SEP completo, pela rede interna e nas barras de fronteira deverá ser a mesma quando uma parcela do SEP é substituída por um equivalente dinâmico, para que isso ocorra as potências de cada gerador deverão ser ajustadas convenientemente.

Validaremos essa afirmação acima utilizando um conjunto de equações algébrico-diferenciais que existem, tanto para o sistema completo, quanto para o sistema reduzido [33]:

$$\frac{dx}{dt} = f_c(x, y, u) \quad (59)$$

$$0 = g_c(x, y, u) \quad (60)$$

Onde $x \in \mathbb{R}^n$ é o vetor que representa as variáveis de estado, $y \in \mathbb{R}^q$ é o vetor que representa as variáveis algébricas de saída e $u \in \mathbb{R}^m$ as variáveis de entrada. Os vetores de estado do sistema completo são diferentes do vetor de estado do sistema com o equivalente dinâmico.

A forma discreta das equações (59) e (60) com um passo de integração Δt :

$$x_k = x_{k-1} + f_c(x_{k-1}, y_{k-1}, u_{k-1}) \cdot \Delta t \equiv f(x_{k-1}, y_{k-1}, u_{k-1}) \quad (61)$$

$$0 = g_c(x_k, y_k, u_k) \rightarrow y_k = h(x_k, u_k) \quad (62)$$

Assume-se que u_k e y_k são grandezas conhecidas ou mensuráveis no sistema completo. No entanto, como já havíamos comentado as equações (61) e (62) e as expressões de f e h são diferentes para os sistemas completo e reduzido.

O modelo deverá, portanto, levar em conta essas diferenças de valores de u_k e y_k do sistema equivalente reduzido, tendo como objetivo minimizar os erros quadráticos:

$$E = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^N (y_{ij} - z_{ij})^2} \quad (63)$$

Sendo N_c o número de curvas e N o número total de pontos por curva. Tomemos um exemplo, onde a **parte externa** será substituída por dois geradores conectados entre si e interligados a área interna por duas linhas de transmissão.

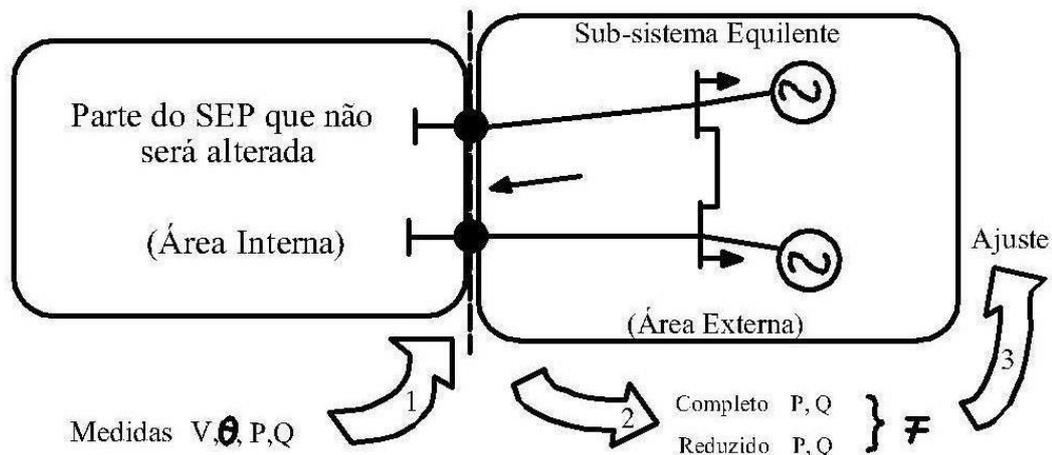


Figura 10 – Modelo de Equivalente dinâmico com dois geradores. Fonte: Brito [6]

O modelo descrito pelas equações (62) e (63) pode ser linearizado, quando conhecemos seu ponto de operação do sistema. Nesse caso, também é necessário uma estimativa de parâmetros. Como o sistema não é linear, o cálculo dos parâmetros deve ser realizado de forma iterativa, então, para cada iteração i o sistema pode ser apresentado em formato de tempo discreto, conforme as equações a seguir:

$$x_{k+1} = A_k(\rho_i)x_k + B_k(\rho_i)u_k \quad (64)$$

$$y_k = C_k(\rho_i)x_k + Du_k \quad (65)$$

Sendo A_k a matriz de estado do sistema, B_k o vetor de colunas de entrada, C_k o vetor linha de saídas e D a matriz de transmissão direta (para o SEP D costuma ser zero) e ρ_i os parâmetros na iteração i .

Para as equações (64) e (65) as matrizes dependem do modelo adotado para o equivalente dinâmico, também variando a quantidade de parâmetros a serem dimensionados. Posteriormente verificaremos que o equivalente dinâmico pode ter um ou mais geradores, cada um com seu próprio modelo e seu próprio controlador.

3.8 Redução estática da rede

Como procedimento de ajuste, devemos obter os fluxos P_{ij} e Q_{ij} , bem como a magnitude da tensão e a fase da tensão θ_i sejam idênticos ao do sistema completo ou pelo menos muito próximos. Portanto, para o equivalente, temos:

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{x_{ij}} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (66)$$

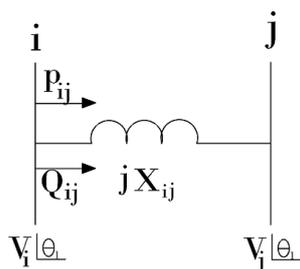


Figura 11 - Linha de transmissão, modelada somente com reatância, Fonte: CEPTEL [8].

Sendo a potência reativa que circula da barra i para a barra j:

$$Q_{ij} = \frac{V_i^2}{x_{ij}} - \frac{V_i V_j}{x_{ij}} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (67)$$

Para atender as condições da barra de fronteira, calculamos as reatâncias X_{ij} e ajustamos as potências geradas e consumidas para cada linha de interconexão, as potências, ativa e reativa do gerador equivalente; potência ativa e reativa das cargas equivalentes.

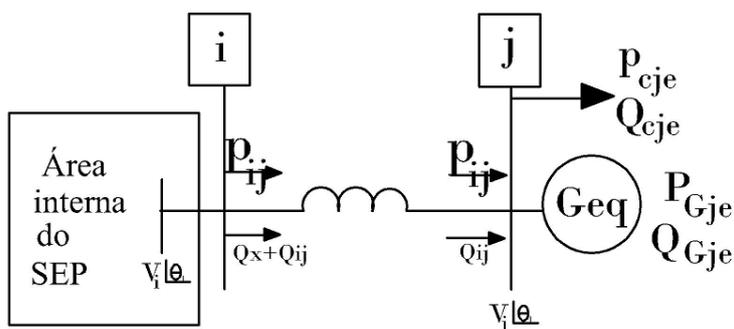


Figura 12 - Equivalente estático de um SEP. Fonte: CEPTEL [8].

Sendo P_{Gje} —é a potência ativa gerada pelo Gerador equivalente; Q_{Gje} é a potência reativa gerada; P_{Cje} é a potência ativa demandada por uma carga equivalente; Q_{Cje} é a potência reativa consumida pela carga equivalente e Q_x representa o consumo de potência reativa da linha.

No sistema mostrado na fig. 14, os valores de P_{Gje} e Q_{Gje} são os montantes de geração externa equivalente. Se a reatância X_{ij} for considerada como a reatância equivalente da interligação da rede completa, é possível calcular as parcelas demandadas da carga, assim calculamos a tensão na barra j, sendo a corrente de i para j igual a:

$$\overline{I}_{ij} = \frac{P_{ij} - Q_{ij}}{\overline{V}_i} \quad (68)$$

Sendo a tensão na barra j:

$$\overline{V}_j = \overline{V}_i - jX_{ij} \cdot \overline{I}_{ij} \quad (69)$$

O consumo de potência reativa na interligação equivalente é

$$Q_x = \frac{x_{ij}}{|\overline{I}_{ij}|^2} \quad (70)$$

Para o procedimento anterior, considerou-se uma barra de fronteira e um gerador equivalente. Para nosso SEP teste, temos quatro barras de fronteira e um gerador equivalente.

3.9 Identificação dos parâmetros do gerador e controlador equivalente

Concluindo a estrutura do equivalente estático, buscamos agora a estrutura para o equivalente dinâmico de cada equipamento, a partir das características e de parâmetros associados as equações (59) e (60) linearizadas para o sistema reduzido e colocadas na forma de *sistema descrito* são apresentadas a seguir, está etapa da modelagem dinâmica é a principal contribuição do trabalho de BRITO [5] e será novamente descrita abaixo:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x}(t, \rho) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1(\rho) & j_2(\rho) \\ j_3(\rho) & j_4(\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(t, \rho) \\ \Delta r(t, \rho) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1(\rho) \\ B_2(\rho) \end{bmatrix} \Delta u(t) \quad (71)$$

$$\Delta y(t, \rho) = [C_1(\rho) \cdot C_2(\rho)] x(t, \rho) + D \cdot \Delta u(t) \quad (72)$$

Onde $\Delta r(t, \rho) \in \mathbf{R}^{n_z}$ são variáveis algébricas e ρ é o vetor de parâmetros que buscamos .

Consequimos a matriz de estados do SEP, eliminando $\Delta r(t, \rho)$ da equação (71).

Como demonstração das equações (71) e (72), consideraremos um gerador i genérico conectado a um barra do equivalente de um sistema constituído por k geradores e l barras, com condições iniciais conhecidas. O gerador será representado pelo modelo clássico, ou seja, o modelo de primeira ordem com um regulador de tensão do tipo estático rápido de primeira ordem. Os parâmetros que nos interessam serão obtidos pelo vetor $\rho = [H_i \ T_{d0i}' \ K_a \ T_a \ R_{ai} \ x_d \ x_d' \ x_d]^\top$. Sendo que as equações dinâmicas correspondentes são:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta \omega}_i \\ \dot{\Delta \delta}_i \\ \dot{\Delta E}'_{qi} \\ \dot{\Delta E}_{FDi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-D_{ti}}{2H_i} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{d0i}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{ai}/T_{ai} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_i \\ \Delta \delta_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{FDi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I^* & -1 & 0 & 0 \\ \frac{2H_i}{2H_i} & 0 & \frac{-1}{2H_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{1-1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_n \\ \Delta \theta_n \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ei}/T_{ei} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\Delta V_{refi}] \quad (73)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K_{2-1} & x_d'/A_1 & 0 \\ 0 & K_{3-1} & -R_{ai}/A_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_i \\ \Delta \delta_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{FDi} \end{bmatrix} + [J_4] \begin{bmatrix} \Delta V_n \\ \Delta \theta_n \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (74)$$

Sendo que:

$$K_{1-1} = \frac{K_a}{T_a} \left(-\frac{V_r^0}{\Delta V_r^0} \Delta V_r \right) - \frac{V_m^0}{\Delta V_r^0} \Delta V_r + \Delta V_s \quad (75)$$

$$K_{2-1} = \frac{-R_{ai}}{A_1} E'_{q0} \sin \delta_0 + \frac{x_d'}{A_1} E'_{q0} \cos \delta_0 \quad (76)$$

$$K_{3-1} = \frac{-R_{ai}}{A_1} E'_{q0} \cos \delta_0 + \frac{x_d'}{A_1} E'_{q0} \sin \delta_0 \quad (77)$$

Onde $A_1 = x_d' x_q' + R_{at}^2$, $i = 1, \dots, k$; $n=1, \dots, l$ e J_4 é a matriz Jacobiana do fluxo de potência, incluindo as barras internas do SEP e do equivalente dinâmico.

Os vetores das grandezas tem a seguinte composição:

$$\Delta x_i(t) = [\Delta \omega_i, \Delta \delta_i, \Delta E'_{q0}, \Delta E_{fdi}]^\top \quad (78)$$

$$\Delta y_i(t) = [\Delta V_i, \Delta \theta_i, \Delta P_i, \Delta Q_i]^\top \quad (79)$$

Sendo que, essas expressões podem ser convertidas na forma de tempo discreto e então transformadas em equações algébricas, cujas incógnitas são parâmetros dados, em que as curvas de sinais de entrada e saída já são conhecidas, conforme a equação (55).

3.10 Equivalente dinâmico com base em um gerador com modelo clássico

Mostraremos agora a sequência necessária para obtenção dos parâmetros de um equivalente para apenas um gerador e um controlador mais simples, conforme figura (4), sendo R_a desprezada para este modelo. Através do fluxo de carga calculamos a corrente de armadura da máquina:

$$\bar{I}_a = \frac{S_g^*}{V_t^*} \quad (80), \text{ podemos então calcular a tensão interna da máquina através da}$$

reatância transitória $E'_q e^{j\delta} = \bar{V}_t + jx'_d \bar{I}_a$ (81), sendo que E'_q é a tensão constante do campo da máquina, δ é o ângulo de carga, medido em relação à referência síncrona e x'_d é a reatância transitória no eixo d. Para o modelo clássico, a tensão é supostamente constante enquanto durar o transitório, entretanto essa tensão é sensível a variações do parâmetro x'_d .

A potência elétrica fornecida pelo gerador pode ser expressa da seguinte forma:

$$P_e = \frac{|\bar{V}_t| E'_q}{x'_d} \sin(\bar{\delta}) \quad (82)$$

Sendo $\bar{\delta} = (\delta - \theta)$, sendo θ o ângulo da tensão nos terminais do gerador e $\bar{\delta}$ o ângulo do rotor com relação a θ . Temos então nas equações (81) e (82) três equações reais, sendo x'_d , E'_q e δ parâmetros a serem determinados.

Decompondo a corrente e a tensão em partes reais e partes imaginárias, teremos:

$$\bar{I}_a = I_R + jI_{im} \text{ e } \bar{V}_t = V_R + jV_i, \text{ a partir da equação (81), chegamos a:}$$

$$E'_q = \sqrt{(V_R - x'_d I_R)^2 + (V_i - x'_d I_i)^2} \quad (83)$$

Isolando x'_d na expressão, encontra-se:

$$x'_d = \frac{\overline{|V_t|} E'_q}{P_e} \sin \bar{\delta} \quad (84)$$

Assumindo que as curvas de tensão terminal sejam possíveis de serem medidas no tempo, bem como a corrente dos terminais do gerador. No instante $t = 0$, as condições iniciais devem ser atendidas, tendo um ângulo $\bar{\delta}_0$. No entanto, o mesmo é desconhecido para o gerador equivalente, podendo ser estimado se os parâmetros forem conhecidos.

É possível estimar os parâmetros x'_d , E'_q e $\bar{\delta}_0$ utilizando-se de dados do fluxo de carga. Portanto, estima-se o x'_d da máquina e a tensão interna E'_q , que se manterá constante durante a simulação. Considerando-se que a barra equivalente tem curvas de tensão e de corrente no domínio do tempo, é possível estimar-se a curva $\bar{\delta}(t)$. Conhecido o comportamento de $\bar{\delta}(t)$ para pequenas variações, calculamos a curva para variação de velocidade angular $\omega(t)$ do gerador equivalente. Podendo ainda calcular as variações de aceleração angular do gerador fictício. Após a obtenção dos resultados e calculando-se as variações de potência elétrica do gerador fictício, estimamos os outros dois parâmetros, D_t e H . Demonstraremos agora:

Os parâmetros H e D_t estão relacionados através da equação de swing na forma linear:

$$2H\Delta\dot{\omega}(t) = -\Delta P_e(t) - D_t\Delta\omega(t) \quad (85)$$

$$\Delta\dot{\delta}(t) = \omega_0\Delta\omega(t) \quad (86)$$

Sabendo-se que:

$$\Delta\delta(t) = \omega_0 \int_0^t \Delta\omega(t).dt + \Delta\delta(0) \quad (87)$$

Calcula-se $\Delta\omega(t)$, na condição que $\Delta\delta(t)$ seja conhecido, tendo as grandezas em $t=0$ nulas, sistema em equilíbrio, para $t = h$, temos o resultado da integral sendo:

$$\Delta\omega(h) = \frac{2\Delta\delta(h)}{\omega_0 h} \quad (88)$$

Como em condições iniciais $\delta(0) = 0$ e $\Delta\omega(0) = 0$, tendo $\Delta P_e(t)$, encontramos a seguinte equação:

$$2H\Delta\omega_k = -\frac{h}{2} [(\Delta P_{e_0} + D_t.\Delta\omega_0) + 2(\Delta P_{e_1} + D_t.\Delta\omega_1)] + \dots + (\Delta P_{e_k} + D_t.\Delta\omega_k) \quad (89)$$

Tendo $\Delta Pe_0 = 0$ e $\Delta \omega_0 = 0$, tem-se:

$$\frac{2H\Delta\omega_k}{h/2} + D_t [2\Delta\omega_1 + \dots + a\Delta\omega_{k-1} + \Delta\omega_k] = -[2\Delta Pe_1 + \dots + 2\Delta Pe_{k-1} + \Delta Pe_k] \quad (90)$$

Assim é possível obter o seguinte sistema de equações sobredeterminado em \overline{H} e \overline{D}_t , que são estimativas iniciais de H e D_t .

$$\left[\frac{4\Delta\omega_k}{h} \left(2 \sum_{l=0}^{k-1} \Delta\omega_l \right) + \Delta\omega_k \right] \cdot \begin{bmatrix} \overline{H} \\ \overline{D}_t \end{bmatrix} = - \left[\left(2 \sum_{l=0}^{k-1} \Delta Pe_l \right) + \Delta Pe_k \right] \quad (91)$$

Onde $k = 1, 2, \dots, N$, sendo N o número de pontos da curva.

A equação (83) pode ser escrita de uma forma compacta, e é equivalente a equação abaixo: $Px = b$ (84), tendo como solução $x = P^+b$, onde $P^+ = (P^T \cdot P)^{-1}$, sendo a equação pseudoinversa da matriz P .

Agora, recalculamos a estimativa da potência elétrica $\overline{\Delta P_e}(t)$, considerando \overline{H} e \overline{D}_t já calculados e para avaliar os parâmetros, temos:

$$-\overline{\Delta P_e}(t) = 2\overline{H}\Delta\dot{\omega}(t) + \overline{D}_t\Delta\omega \quad (92)$$

Sendo que, as derivadas numéricas foram estimadas a partir da seguinte equação:

$$\Delta\dot{\omega}_k = \frac{\frac{\Delta\omega_{k-1} - \Delta\omega_k}{h} + \frac{\Delta\omega_k - \Delta\omega_{k-1}}{h}}{2} = \frac{\Delta\omega_{k+1} - \Delta\omega_{k-1}}{2h} \quad (93)$$

3.11 Ferramentas computacionais

Apresentamos as ferramentas computacionais utilizadas neste trabalho:¹

O programa **ANAREDE** foi elaborado pelo CEPEL/COPPE e é formado por um conjunto de aplicações integradas que inclui cálculos de Fluxo de Potência, Equivalente

¹ As ferramentas utilizadas neste trabalho (ANAREDE, PACDYN E MATLAB) são versões estudantis dos programas.

de Redes, Análise de Contingências, Análise de Sensibilidade de Tensão e Fluxo e Análise de Segurança de Tensão. O programa dispõe ainda de modelos de curvas de carga, modelos de bancos de capacitores / reatores chaveados para controle de tensão, modelos de equipamentos equivalentes e individualizados, algoritmo para verificação de conflito de controles e facilidades para estudos de recomposição do sistema. Entre os usuários do programa destacam-se as empresas concessionárias que operam redes de transmissão ou subtransmissão, Universidades, ONS, EPE, MME, ANEEL e outras. Os arquivos de dados do **ANAREDE** estão disponíveis para download na web, em sítios de algumas das empresas listadas, permitindo o fácil acesso às informações de todo o sistema elétrico brasileiro no formato adequado ao programa.²

O programa **PACDYN** (Análise e Controle de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Potência) também elaborado pelo CEPEL/COPPE é voltado à análise e controle de oscilações resultantes de pequenas perturbações em sistemas elétricos de potência. O programa é dotado de modernos algoritmos para o cálculo de polos zeros, resíduos, resposta no tempo e resposta em frequência, utilizando técnicas de controle clássico e moderno para identificação e mitigação de problemas. Os estudos realizados pelo **PACDYN** permitem a identificação da natureza das oscilações crescentes ou pouco amortecidas e o ajuste dos diversos controladores para aumento dos seus amortecimentos. Além da análise de oscilações eletromecânicas, o **PACDYN** dispõe da análise de ressonância subsíncrona e ajuste de *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) em alta frequência, em que a representação da dinâmica da rede é modelada detalhadamente.³

A última ferramenta utilizada é o programa **MATLAB** que é um software destinado a fazer cálculos com matrizes, foi criado no fim dos anos 1970 por Cleve Moler, então presidente do departamento de ciência da computação da Universidade do Novo México. Sua utilização logo se espalhou para outras Universidades e encontrou um forte uso no âmbito da comunidade matemática aplicada. Jack Little, um engenheiro, conheceu a linguagem **MATLAB**, durante uma visita feita por Moler a Universidade de Stanford em 1983. Reconhecendo o seu potencial comercial, ele juntou-se a Moler e Steve Bangert, reescreveram **MATLAB** em C, e em 1984 fundaram

² <http://www.anarede.cepel.br/>

³ <http://www.cepel.br/pacdyn>

a *MathWorks* e prosseguiram no seu desenvolvimento. As bibliotecas reescritas ficaram conhecidas como LAPACK.

O MATLAB foi adotado por engenheiros de projetos de controle e rapidamente se espalhou para outros campos de aplicação. Agora é também utilizado nas áreas da educação, em especial o ensino da álgebra linear e análise numérica e é muito popular entre os cientistas envolvidos com o processamento de imagem. Trata-se de um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O programa integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos no modo como são escritas matematicamente, ao contrário da programação tradicional.⁴

⁴ www.mathworks.com/products/matlab/

4 DESENVOLVIMENTO

Neste trabalho, seguimos a metodologia do trabalho de Brito, 2009 [5], 2010 [6], para construção de um equivalente dinâmico, como em [5] foi utilizado um SEP teste para construção das estruturas.

Para o sistema teste, não foi utilizado nenhum teste de agregação de geradores, pois as áreas já estavam delimitadas. Foi escolhida a área A1 do sistema, considerando a sua própria topologia e verificando-se que possuía conexão com duas outras áreas. Observando a figura nº 13, temos entre as áreas A1 e A2 a linha de transmissão das barras 14-15, entre as áreas A1 e A3, temos as linhas de transmissão das barras 39-9; 4-5 e 4-14.

Para o sistema reduzido da área A1, todas as barras com impedância constante foram eliminadas e criou-se uma barra equivalente fictícia de nº 200, observando-se agora que quatro linhas de interligação entre três (3) barras de fronteira e a área interna, sendo as seguintes linhas de transmissão: linha 39-200, linha 4-200(1) e linha 4-200(2), Como podemos observar na figura nº 14, com a eliminação das barras temos duas linhas de transmissão de acoplamento em paralelo e foi convencionado a serem chamadas de linha 4-200(1) em substituição a linha 4-5 e linha 4-200(2) em substituição a linha 4-14. Os geradores das barras 31 e 32 de números 2 e 3 existentes na área A1 foram eliminados e criou-se um gerador equivalente G_{eq} . Apresentamos na figura nº 13 o diagrama do sistema New England completo com a indicação da área A1, definida como área externa em nosso trabalho e em seguida apresentamos o diagrama do sistema New England reduzido, com a indicação do equivalente dinâmico em vermelho e das linhas de acoplamento em azul.

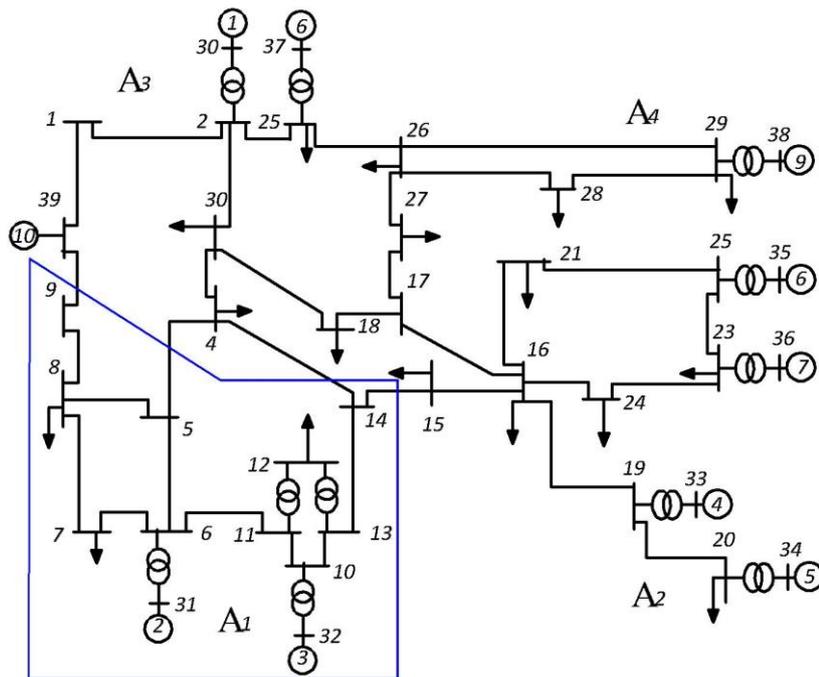


Figura 13 - SEP New England completo com indicação da área A1.⁵

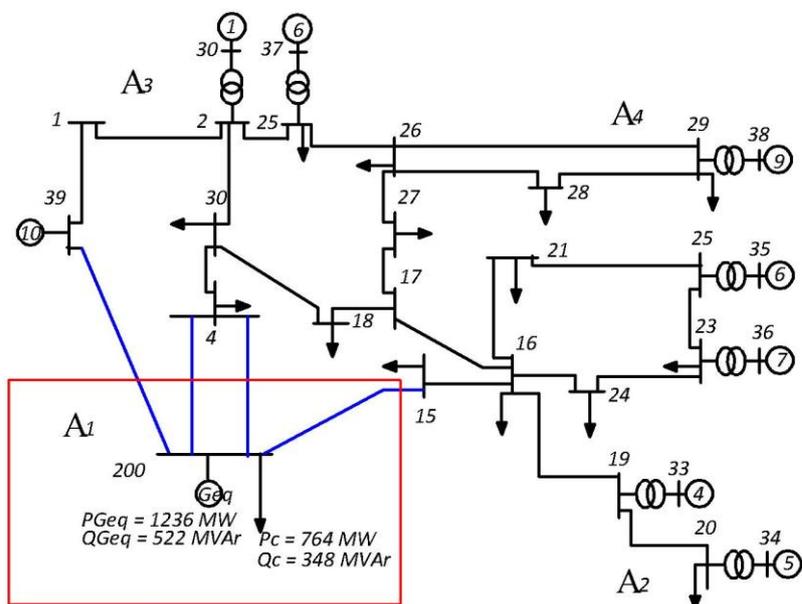


Figura 14 - Diagrama unifilar do sistema New England reduzido, com o equivalente dinâmico da área A1 assinalado em vermelho.

⁵ Tabela com os dados do SEP New England, inclusos nos Anexos.

Observando a figura 14, podemos verificar que a área A1 do diagrama, que escolhemos como área externa, está agora formada por um gerador equivalente com potência $P_{Geq} = 1236 \text{ MW}$ e $Q_{Geq} = 522 \text{ MVar}$ e com uma carga equivalente de potência $P_c = 764 \text{ MW}$ e $Q_c = 348 \text{ MVar}$, ligados a uma barra fictícia de número 200 e interligada as barras de fronteira por quatro linhas de transmissão fictícias: 200 – 39, 4 – 200(1), 4-200(2) e 200 – 15.

Foram calculados os fluxos de potência para o sistema completo e o sistema reduzido. Trazemos os cálculos dos fluxos de carga no anexo, capítulo 8.

Tabela 1 - Dados do fluxo de potência entre as barras de fronteira.

| Barra (de) | Barra (para) | P_{ij} (MW) | Q_{ij} (MVar) |
|------------|--------------|---------------|-----------------|
| 9 | 39 | 381,9 | 24,7 |
| 4 | 5 | -379,3 | 1,9 |
| 4 | 14 | -210,6 | -40,4 |
| 14 | 15 | 216,3 | -25,2 |

Tabela 2 - Magnitude e fase da tensão nas barras 39, 4 e 15 do sistema completo.

| Barra | Modulo | Ângulo |
|-----------|--------|--------|
| 39 | 1,030 | -11 |
| 4 | 1,004 | -11 |
| 15 | 1,016 | -9,1 |

Para os valores negativos de potência, consideramos o fluxo no sentido contrário ao que está indicado.

Para o caso da área A1, objetivou-se a criação de uma única barra fictícia (nº 200), na qual será conectado o gerador equivalente G_{eq} e uma carga equivalente.

Após a criação da barra nº 200, temos os seguintes valores do fluxo de potência.

Tabela 3 - Dados do fluxo de potência entre as barras de fronteira do sistema reduzido.

| Barra (de) | Barra (para) | P_{ij} (MW) | Q_{ij} (MVar) |
|------------|---------------|---------------|-----------------|
| 200 | 39 | -384,2 | 28,6 |
| 4 | 200(1) | 394,9 | 83,5 |
| 4 | 200(2) | 231,7 | 69,7 |
| 200 | 15 | 228,6 | 25,6 |

Na verdade os valores da reatância (X%) foram manipulados para que as potências de fluxo do sistema reduzido, que circulam nas linhas, sejam as mais próximas possíveis das potências das linhas no sistema completo, como realizado em Brito, 2009 [5].

Tabela 4 - Valor de ajuste das reatâncias das linhas de interconexão.

| Barra (de) | Barra (para) | Reatância % |
|-------------------|---------------------|--------------------|
| 200 | 39 | 2,15 |
| 4 | 200 | 3,65 |
| 4 | 200 | 4,65 |
| 200 | 15 | 4,12 |

Tabela 5 - Magnitude e fase da tensão na barra fictícia 200 para o sistema reduzido.

| Barra | Modulo | Ângulo |
|--------------|---------------|---------------|
| 200 | 1,041 | -11 |

Conforme o procedimento já adotado em BRITO, 2009 [5] as conexões entre a barra equivalente e as barras de fronteira são realizadas por impedâncias puramente indutivas, mantendo-se as cargas da área A1.

4.1 Estimativa de parâmetros

Devemos, inicialmente, estimar os parâmetros x'_d , H e D_t para o gerador equivalente, utilizando-se do modelo clássico de gerador. Após isso, verificaremos se os valores obtidos no fluxo de potência do sistema apresentam um comportamento dinâmico que reproduza o fluxo de potência do sistema completo. Utilizou-se um degrau na tensão do gerador 10 (barra 39) como perturbação do SEP, para efeitos de teste.

Para resolver a equação (49), inicialmente, devemos aplicar as condições de otimização de primeira ordem à função $E(\rho)$. Obtemos assim parâmetros ótimos $\rho^* = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{Np}]$, conforme descrito no capítulo 5.

As condições de otimização de primeira ordem são:

$$\frac{\partial E(\rho)}{\partial \rho_k} = 2 \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^N [y_{ij} - f_{ij}(\rho)] \left(\frac{\partial f_{ij}(\rho)}{\partial \rho_k} \right) = 0, k = 1, 2, \dots, N_p \quad (59)$$

Resolver a equação (50) é equivalente a resolver o seguinte sistema:

$$\sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^N \left[f_{ij}(\rho) \left(\frac{\partial f_{ij}(\rho)}{\partial \rho_k} \right) - y_{ij} \left(\frac{\partial f_{ij}(\rho)}{\partial \rho_k} \right) \right] = 0, k = 1, 2, \dots, N_p \quad (60)$$

Lembrando que: se a função $f_{ij}(\rho)$ for não linear, então a equação (59) também é não linear. Isto sendo verdade, a determinação dos parâmetros será realizada de forma iterativa, partindo de um ρ^0 inicial, sendo a escolha deste muito importante para a convergência dos parâmetros para valores aceitáveis.

As condições de otimização de segunda ordem não são avaliadas, assumindo-se que o ponto ótimo esteja em um mínimo local. Com isso, devemos verificar se a soma dos desvios ou erros quadráticos acumulados é aceitável. Devemos testar a aderência de cada curva do modelo ao conjunto de pontos dados.

Portanto: Calculando I_a através da eq.80, temos $I_a = (1069,8 + j718,9)$ pu.;

Substituindo I_a na equação 81, temos: .

Considerando $x'd = 0,0531$; $E_q = 3,2815$ e $\delta_0 = 0,8322$ rad, chegando aos parâmetros $\hat{H} = 73,93$ s e $D_t = 15,60$ pu/pu, calculados em pu na base 100 MVA, lembrando que consideramos uma carga equivalente de $P_c = 764$ MW e $Q_c = 348$ MVar. No gráfico seguinte, comparamos os valores do ângulo δ do gerador equivalente e do grupo de geradores da área A1.

Os gráficos obtidos são gerados pela exportação de arquivo de modelo dinâmico do sistema pelo programa PacDyn; com esse arquivo tipo *matlab.out*, utilizamos o programa pacdesc.m que tem como saída as variáveis A,b,c,d,iv,name.

Utilizamos outro arquivo chamado “jacobiano.m” para realizar a montagem da matriz jacobiana. Elaborado pelo Prof. George Brito, este programa faz a construção da matriz jacobiana, utilizando os dados gerados pelos resultados dos nossos fluxos de carga do sistema completo e reduzido; dessa matriz gerada realizamos a identificação dos dados e plotamos os gráficos para análise dos resultados.

Abaixo, temos um diagrama de RAT de modelo 1, apresentado no programa PACDYN e utilizado neste trabalho.

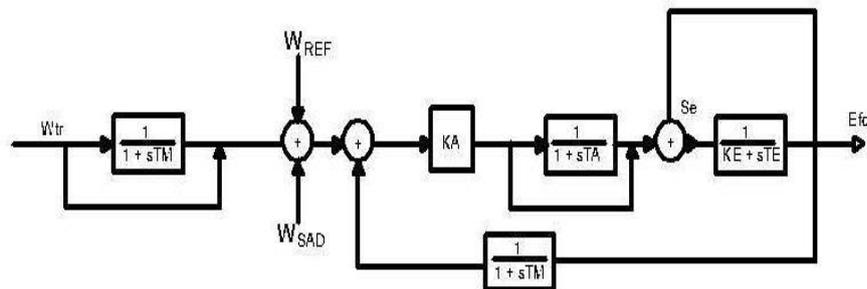


Figura 15 - Reguladores automático de tensão modelo 1. Fonte: CEPTEL [8]

Para o próximo gráfico apresentamos as potências elétricas P_e , obtidas com o gerador equivalente e na barra de interligação.

A partir das simulações feitas e dos gráficos gerados, compararemos os resultados antes e depois do ajuste. Apresentamos a seguir as tabelas dos parâmetros iniciais do gerador equivalente.

Tabela 6 - Parâmetros preliminares do gerador equivalente.

| Parâmetros | Barra 200 |
|------------|-----------|
| x_d | 0,189 |
| x_q | 0,0976 |
| x'_d | 0,0531 |
| x'_q | 0,0792 |
| x_p | 0,540 |
| T'_{do} | 5,00 |
| T'_{qo} | 0,400 |
| Dt | 15,60 |
| H | 73,93 |
| R_a | 0,0007 |

E os parâmetros iniciais do RAT equivalente.

Tabela 7 - Parâmetros preliminares do RAT.

| Parâmetros | Barra 200 |
|------------|-----------|
| K_a | 20,00 |
| T_a | 0,075 |
| K_f | 0,045 |
| T_f | 1,150 |
| K_e | 1,05 |
| T_e | 0,450 |

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo realizaremos as discussões referentes aos resultados obtidos preliminarmente e após os ajustes realizados, considerando, primeiramente, os gráficos conseguidos como a elaboração do equivalente estático.

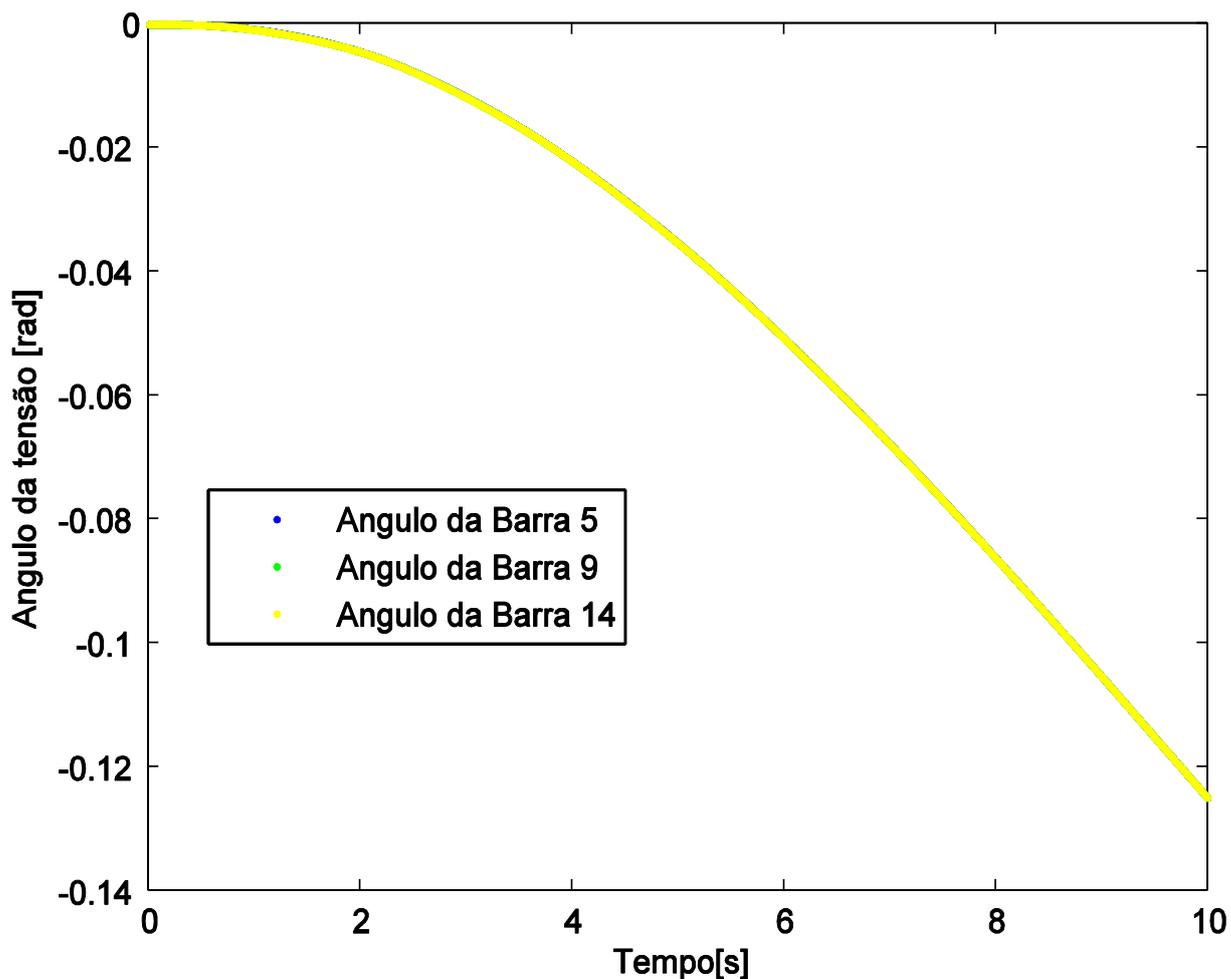


Figura 16 - Ângulos δ da tensão do gerador equivalente.

A figura nº 16 nos traz os ângulos das tensões das barras 5, 9 e 14 e como podemos verificar, as curvas se sobrepõem demonstrando que os ângulos são muito próximos.

O gráfico a seguir representa os módulos das tensões da área A1, considerando as barras de fronteira no sistema completo e a barra fictícia de acoplamento no sistema reduzido.

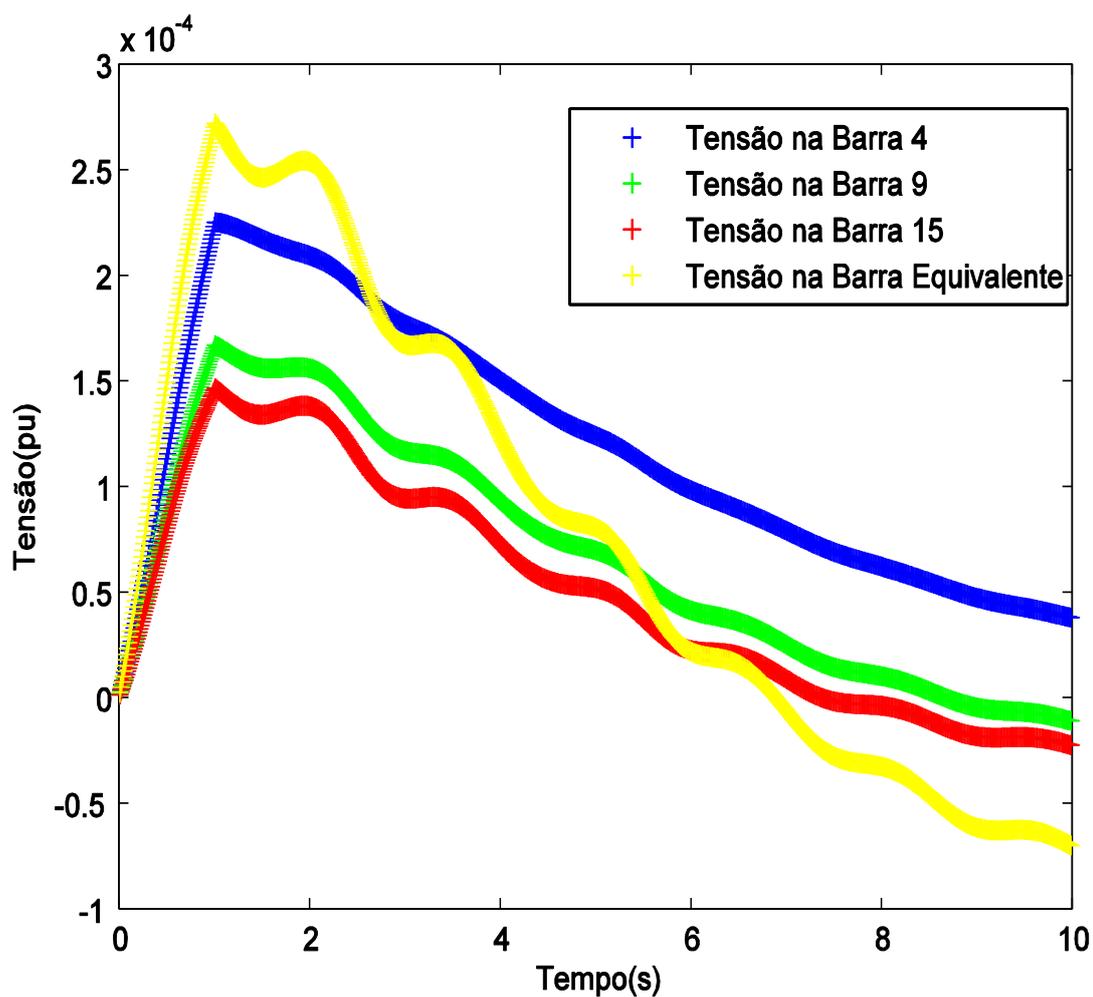


Figura 17 - Tensões nas barras de fronteira da área A1

O gráfico acima representa a tensão em pu nas barras 5, 9 e 14, que serão substituídas pela nossa barra fictícia 200; para que o equivalente seja eficiente às tensões não podem variar muito. Podemos verificar que a escala de tensão do gráfico é muito pequena, pois necessitamos demonstrar como ocorre a variação da tensão entre as barras. Verificamos pelo gráfico que todas as tensões estão em fase e que se observarmos a amplitude das curvas, entre a maior e a menor tensão temos uma variação de $1,25 \times 10^{-4}$ pu. O que demonstra, como desejado, que as tensões estão muito próximas. Esta relação é primordial para que o equivalente dinâmico seja satisfatório.

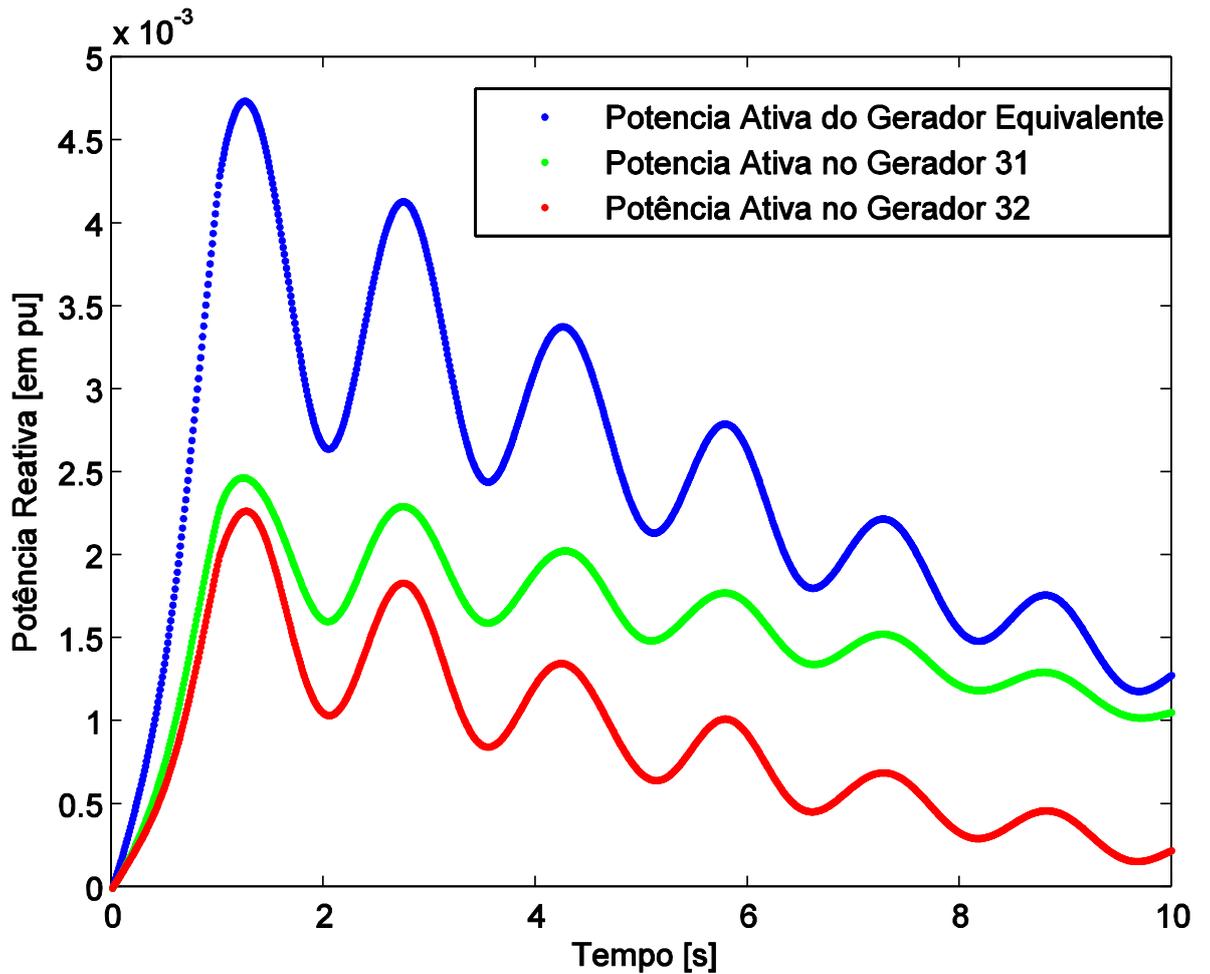


Figura 18 - gráfico de comparação da potência ativa entre os geradores da área A1.

Pela figura nº 18, verificamos que as potências ativas estão oscilando de uma forma bastante semelhante, e que a potência ativa do gerador equivalente é superior a dos geradores originais, isso é esperado já que o gerador equivalente é composta da potência dos dois geradores originais.

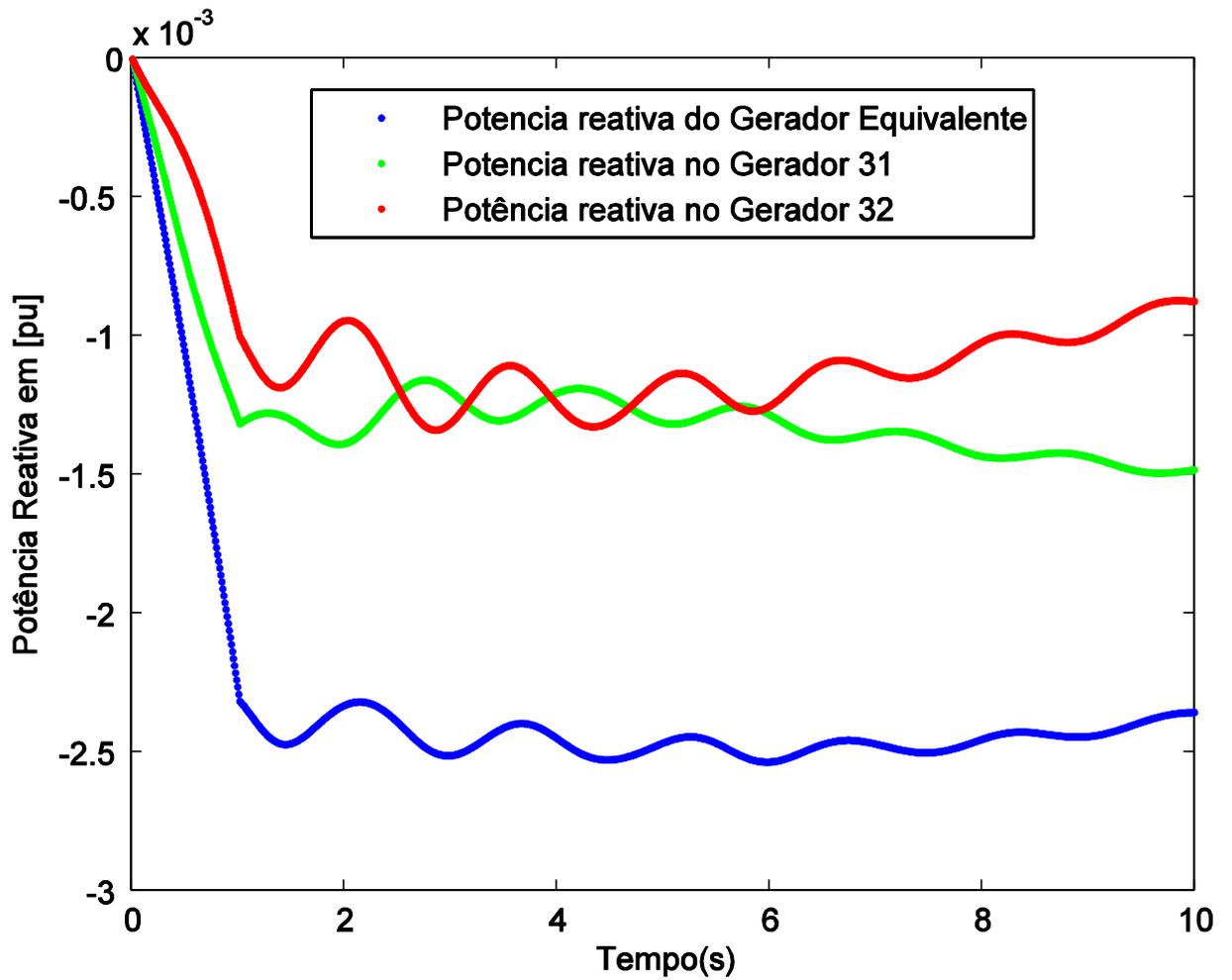


Figura 19 - gráfico de comparação da potência reativa dos geradores da área A1.

Pela figura nº 19 analogamente a potência ativa, verificamos que a potência reativa do gerador equivalente é superior a dos geradores originais, isso é esperado já que o gerador equivalente é composta da potência dos dois geradores originais.

A seguir o gráfico da figura nº 20 demonstra as potências ativas da área A1. Estes dados foram retirados do cálculo do fluxo de carga do sistema completo.

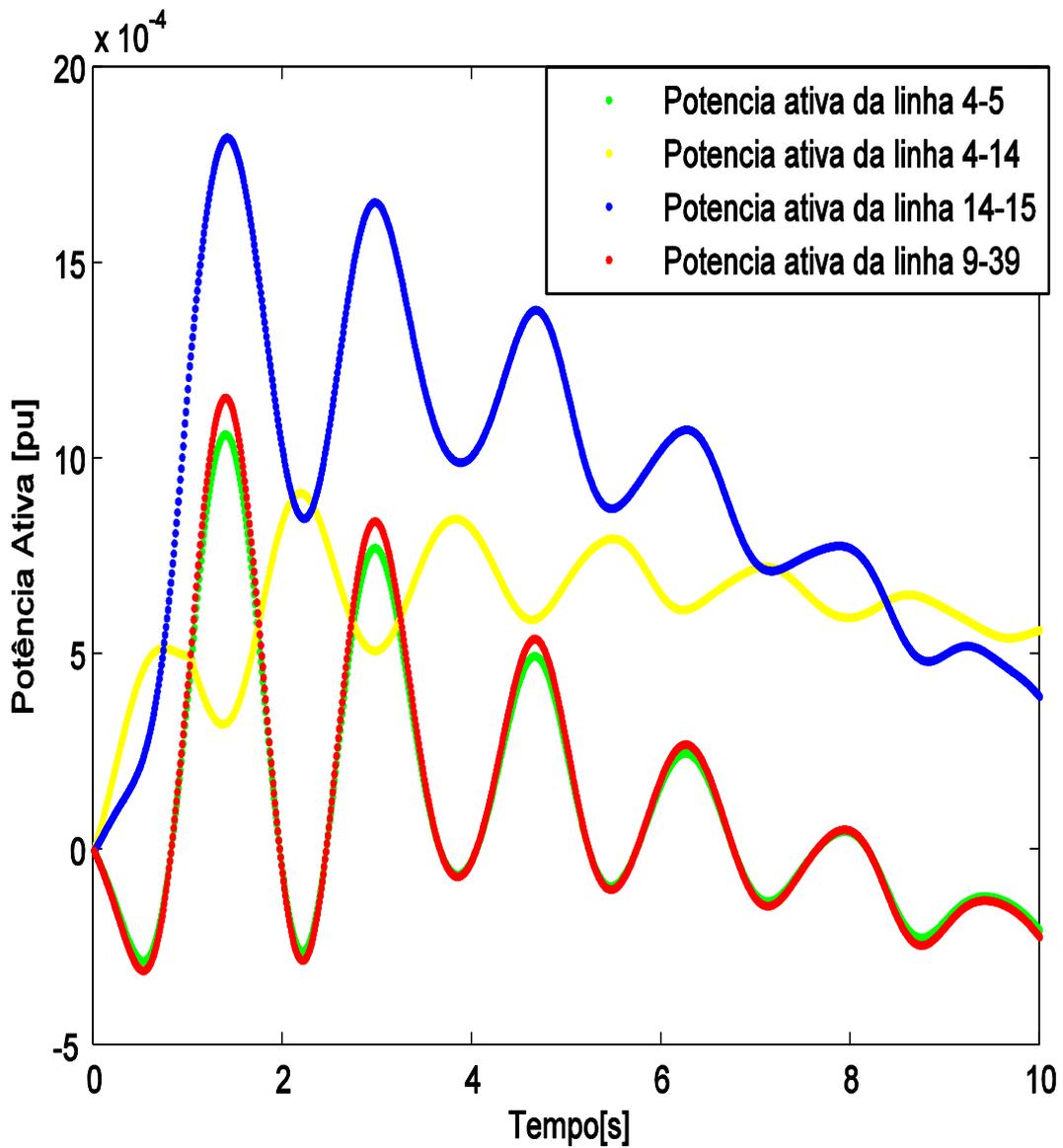


Figura 20 - gráfico de comparação da potência ativa entre as barras da área A1.

Apresentamos as potências ativas nas barras de fronteira, conforme fluxo de carga obtido pelo programa ANAREDE [9], e analisado dentro do programa PACDYN [8], ambos softwares da CEPTEL. Verificamos as curvas das de potência ativa das linhas 4-5, 9-39 e 14-15 estão em fase, ou seja oscilam juntas mantendo o mesmo ciclo. Na curva da linha 4-14 curva amarela, observamos uma distorção em relação às outras curvas, podendo ser causado por erro de leitura de dados do programa de análise.

Abaixo temos o gráfico de comparação das potências reativas na área A1 para o SEP completo.

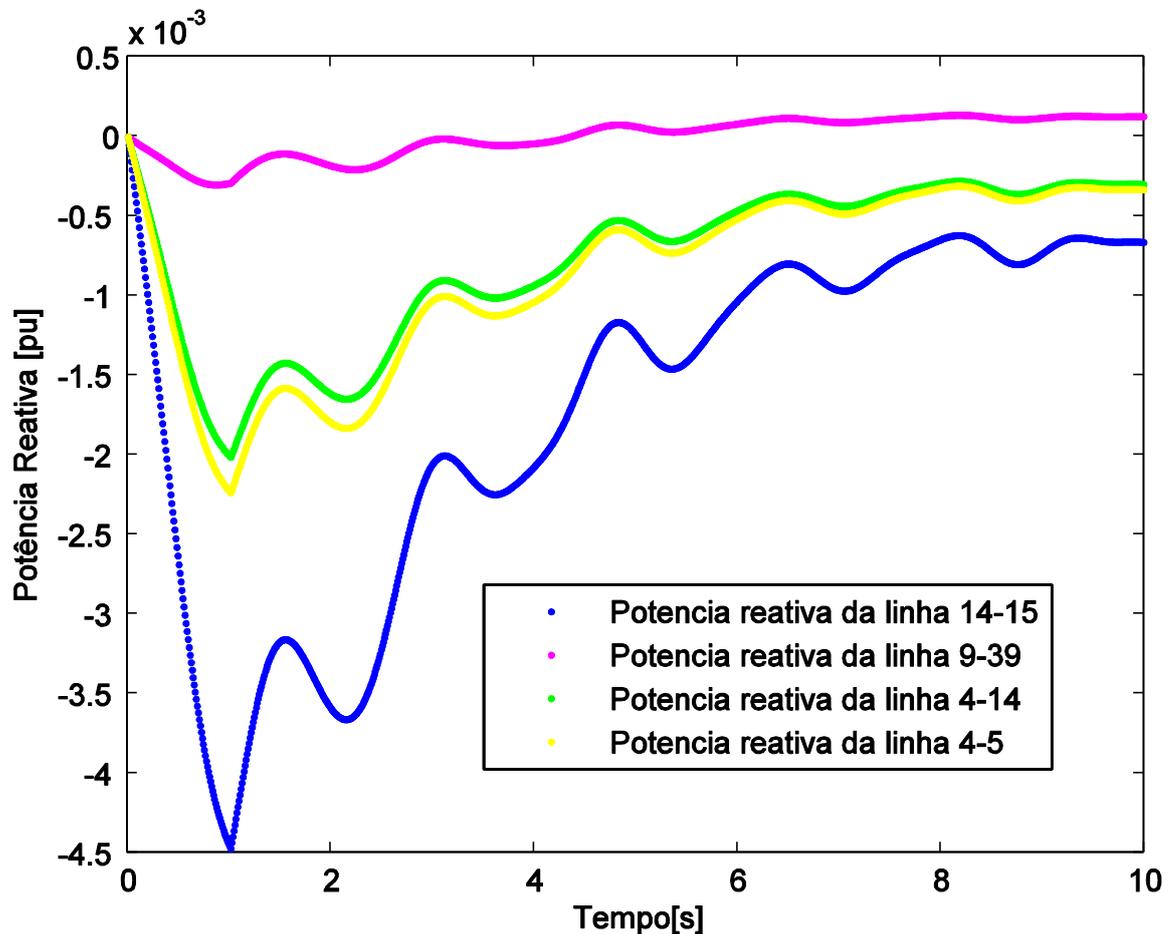


Figura 21 - gráfico de comparação da potência reativa entre as barras da área A1.

Verificamos agora, na potência reativa da barra 39, devido à utilização desta barra como referência angular a distorção é muito menor que das outras curvas.

A partir de agora, iremos realizar as comparações entre os parâmetros do sistema completo e do sistema reduzido. Lembrando que as barras de fronteira entre o sistema interno e externo são: Barra 39, 4 e 15, que formam as Linhas de Transmissão de fronteira fictícias com a barra de acoplamento 200.

A seguir, apresentaremos os gráficos de comparação do sistema completo e reduzido, já com o ajuste das curvas pelo método de mínimos quadrados.

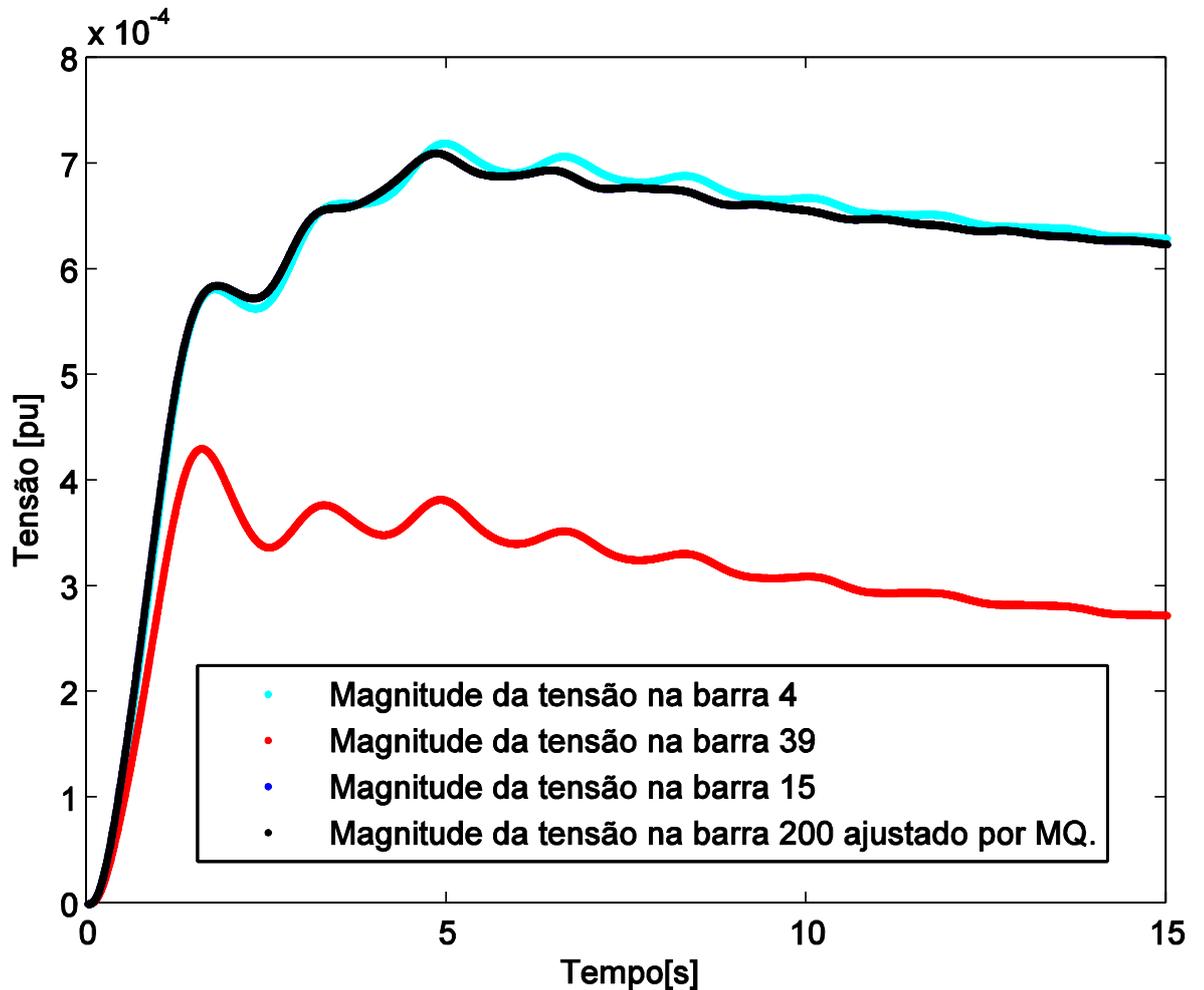


Figura 22 - gráfico das tensões da área A1 com o ajuste da tensão da barra de acoplamento.

Na figura 22 temos a magnitude das tensões nas Barras de fronteira 4, 39 e 15 e magnitude tensão na barra fictícia 200. Observamos que as tensões variaram muito pouco, exceção a barra 39, que como chamamos a atenção anteriormente, é utilizada como referencia angular para as outras tensões do sistema, e neste gráfico teve sua variação curva distorcida em relação às outras curvas. Voltando nossa atenção para a barra de acoplamento, barra 200, está manteve a tensão muito próxima das barras de fronteira, o que é essencial para o nosso trabalho.

Abaixo, temos o gráfico de comparação dos ângulos de tensão das LTs.

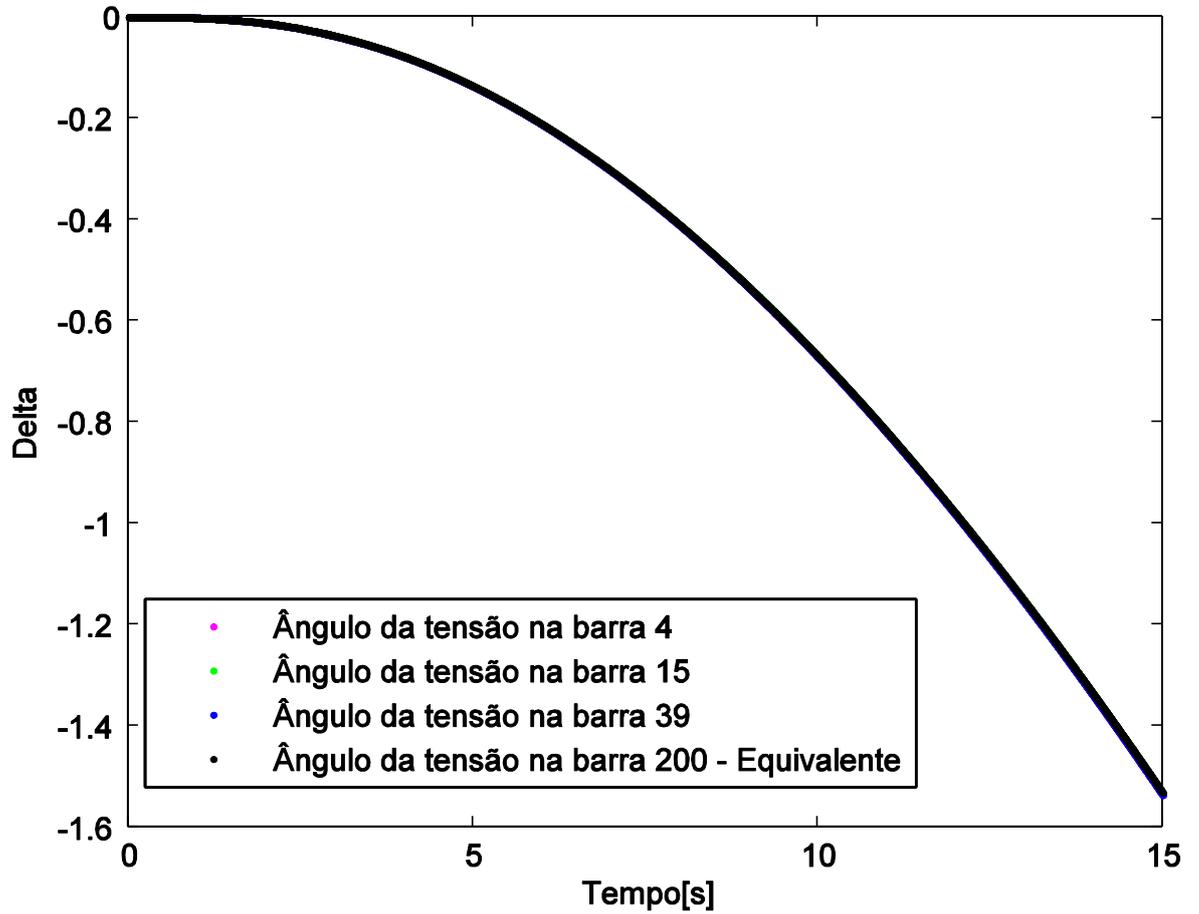


Figura 23 - gráfico dos ângulos das tensões.

A figura 23 nos traz a comparação dos ângulos das tensões entre as Barras de fronteira 4, 15 e 39 e a barra de acoplamento fictícia 200, e pudemos observar que os ângulos são muito próximos, tendo que, as curvas estão sobrepostas.

Gráfico de comparação entre a linha 4-5 do sistema completo e 4-200, já com o ajuste da curva.

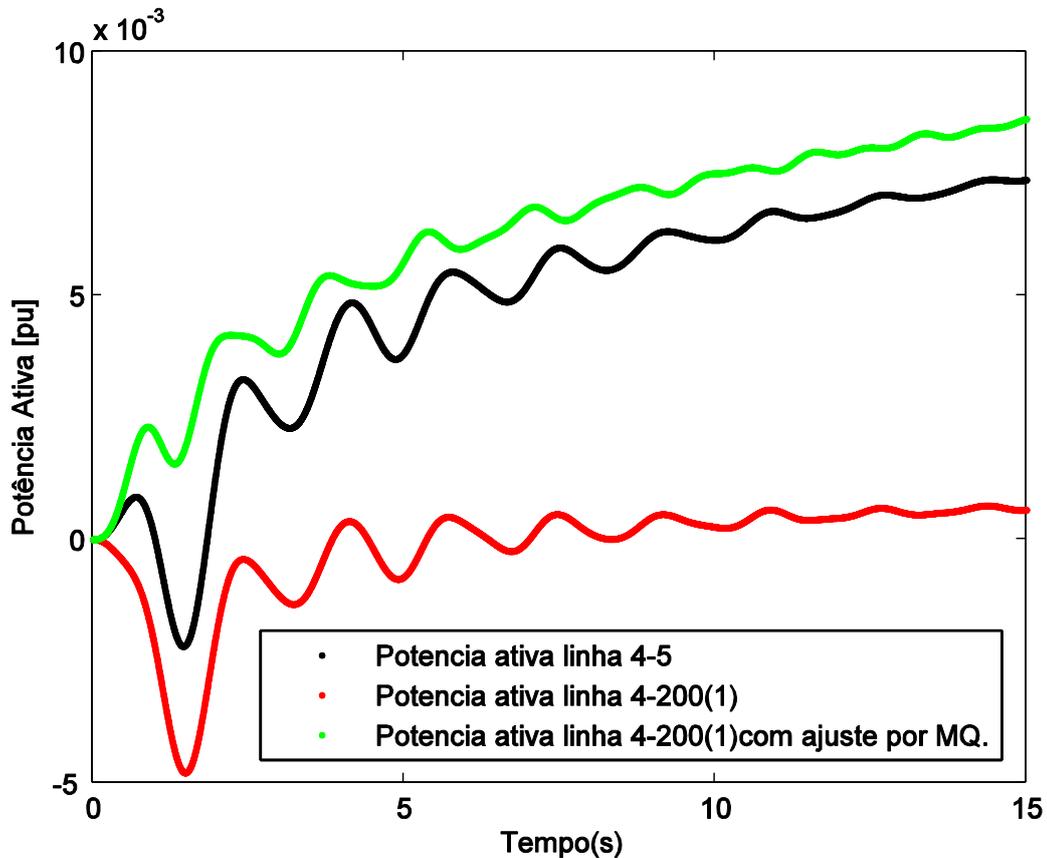


Figura 24 - gráfico das potências ativas das LT 4-5 do sistema completo e LT 4-200(1) do sistema reduzido.

A figura 24 nos traz as potências ativas das LT 4-5 do sistema completo, na cor vermelha. Da LT 4-200(1) do sistema reduzido, na cor preta, e da LT 4-200(1) com o ajuste pelo método de mínimos quadrados, na cor verde. A curva em preto representa a curva de potência ativa na LT 4-200(1) calculada pelo equivalente dinâmico. Verificamos que a curva da LT 4-200(1) variou um pouco em relação a curva original, quando aplicamos o ajuste por MQ, verificamos uma melhora significativa em relação a aproximação das curvas original e equivalente, apesar do ajuste não ter seguido a distorção inicial como da curva, como na curva estimada primeiramente.

Abaixo, temos o gráfico da potência ativa para a LT 4-14 do SEP completo e para a LT 4-200 do equivalente dinâmico.

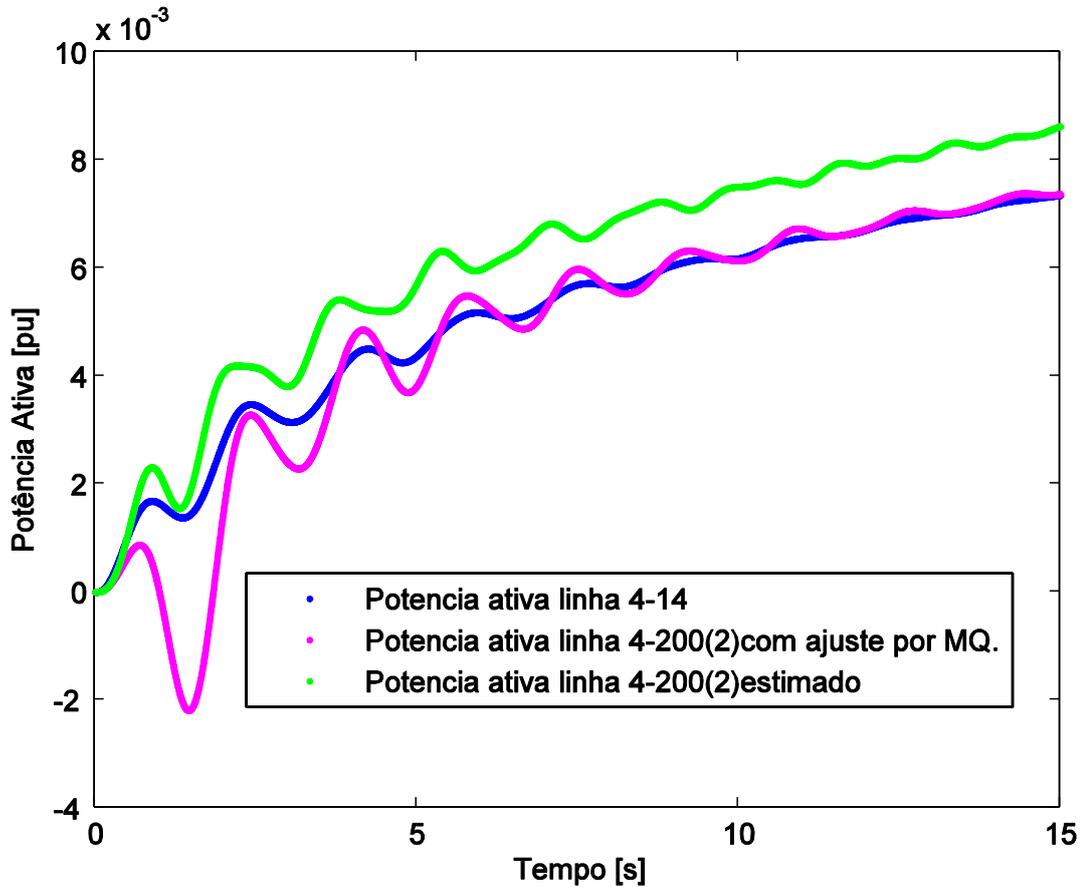


Figura 25 - gráfico das potências ativas das LTs 4-14 e LT 4-200(2).

Para que pudéssemos perceber as diferenças entre as curvas, a escala da vertical do gráfico foi bastante diminuída.

A figura 25 nos traz as potências ativas das LT 4-14 do sistema completo, na cor azul. Da LT 4-200(2) do sistema reduzido, na cor verde, e da LT 4-200(2) com o ajuste pelo método de mínimos quadrados, na cor magenta. A curva em verde representa a curva de potência ativa na LT 4-200(2) calculada pelo equivalente dinâmico. Verificamos que a curva da LT 4-200(2) variou muito pouco em relação a curva original, quando aplicamos o ajuste por MQ, verificamos uma melhora significativa em relação a aproximação das curvas original e equivalente, havendo uma sobreposição de curvas, o que demonstra um ótimo ajuste das mesmas.

Agora, mostramos o gráfico da potência ativa para a LT 14-15 do SEP completo e para a LT 200-15 do equivalente dinâmico.

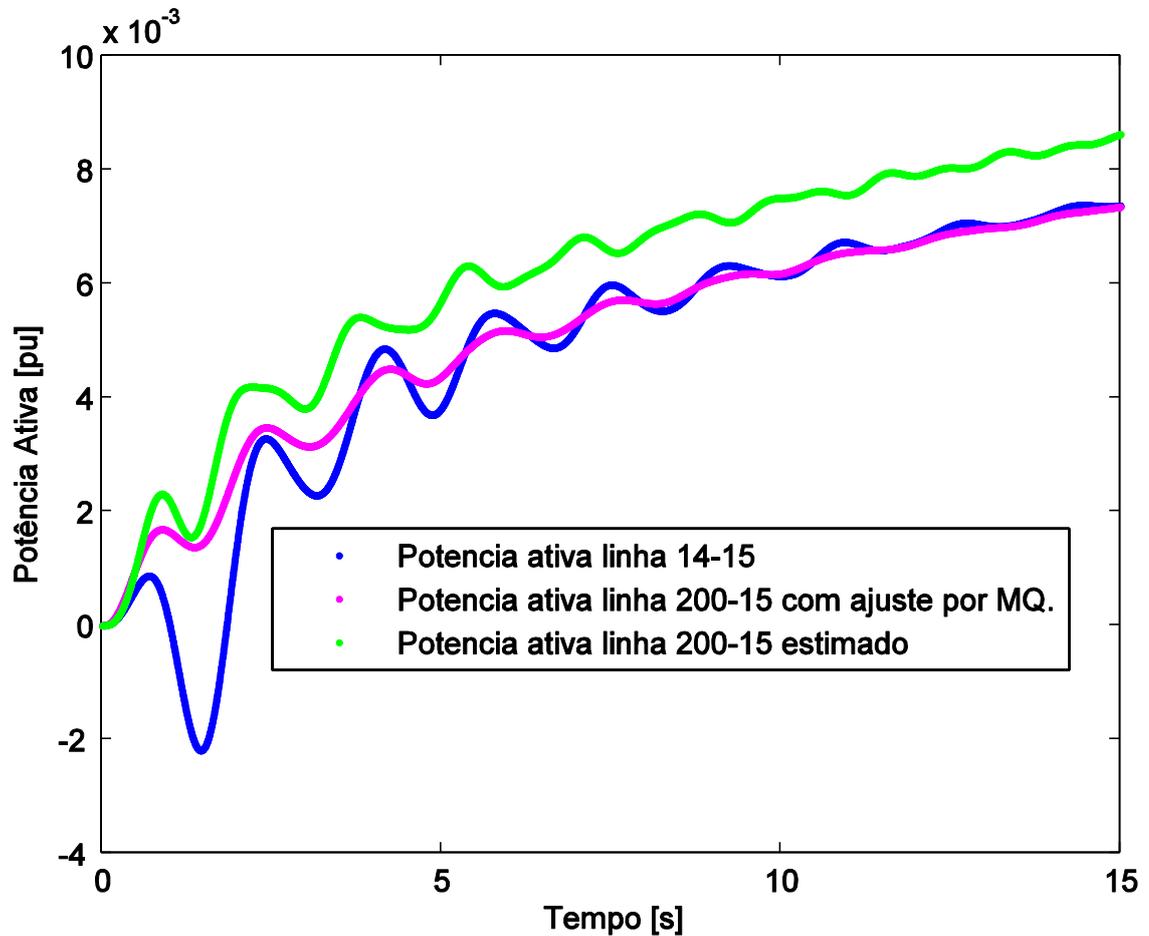


Figura 26 - gráfico de potência ativa da linha 14-15 e 200-15.

A figura 26 nos traz as potências ativas das LT 14-15 do sistema completo, na cor azul. Da LT 200-15 do sistema reduzido, na cor verde, e da LT 200-15 com o ajuste pelo método de mínimos quadrados, na cor magenta. A curva em verde representa a curva de potência ativa na LT 200-15 calculada pelo equivalente dinâmico. Verificamos que a curva da LT 200-15 variou muito pouco em relação à curva original, quando aplicamos o ajuste por MQ, verificamos melhora significativa em relação a aproximação das curvas original e equivalente, havendo uma sobreposição de curvas, o que demonstra um ótimo ajuste da mesma.

Temos o gráfico da potência da potência ativa para a LT 39-9 do SEP completo e para a LT 39-200 do equivalente dinâmico.

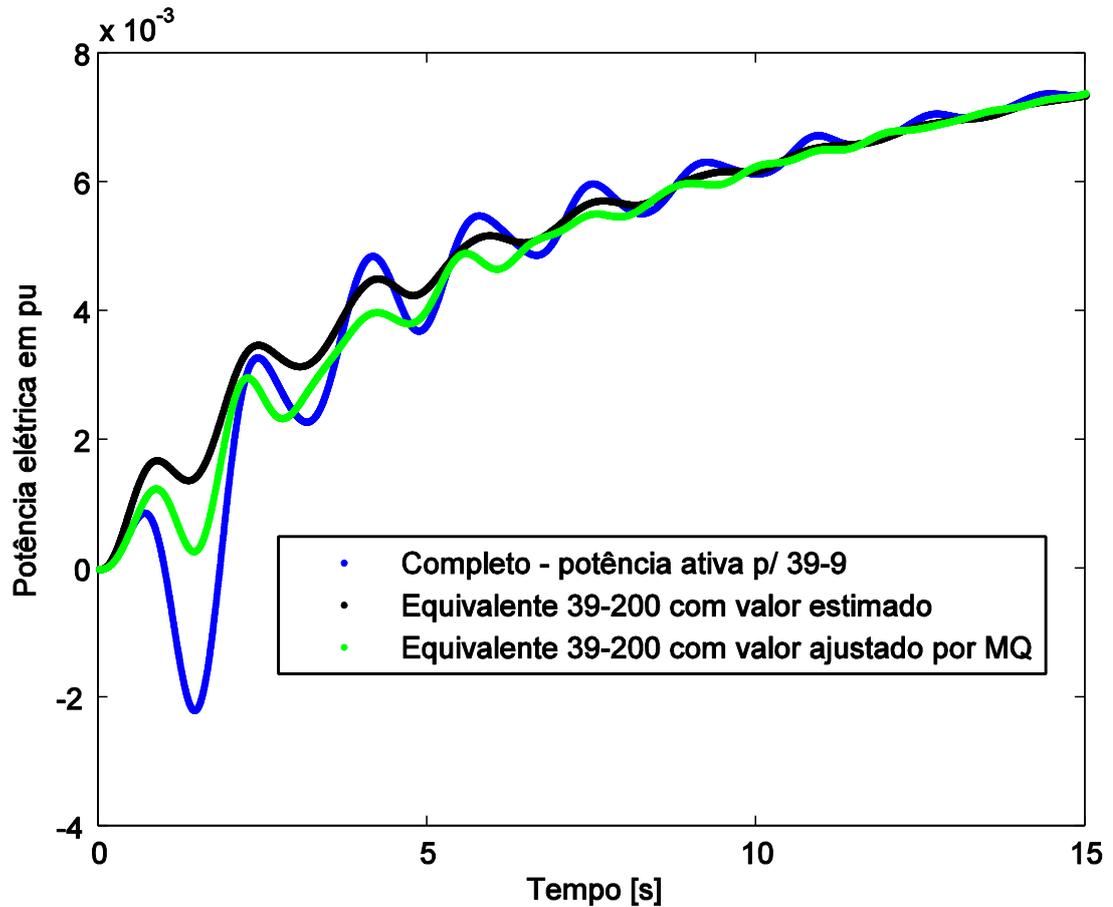


Figura 27 - gráfico das potências ativas nas LT 39-9 e LT 39-200.

A figura 27 nos traz as potências ativas das LT 39-9 do sistema completo, na cor azul. Da LT 39-200 do sistema reduzido, na cor preta, e da LT 39-200 com o ajuste pelo método de mínimos quadrados, na cor verde. A curva em preto representa a curva de potência ativa na LT 39-200 calculada pelo equivalente dinâmico. Verificamos que a curva da LT 39-200 variou muito pouco em relação à curva original, quando aplicamos o ajuste por MQ, verificamos uma melhora significativa em relação à aproximação das curvas original e equivalente, havendo uma sobreposição de curvas, o que demonstra um ótimo ajuste das mesmas.

Pudemos verificar que os ajustes nas figuras 25, 26 e 27 ficaram muito bons e que na figura 24 tivemos um ajuste menos preciso, devido a imprecisões de nosso programa de ajuste.

Apresentaremos os gráficos referentes à potência reativa das linhas transmissão de fronteira do SEP completo e do sistema reduzido, onde foi também utilizado o ajuste de curvas pelo método de Mínimos Quadrados.

Abaixo o gráfico de comparação de potência reativa entre a LT 4-5 do sistema completo e a LT 4-200(1) do equivalente dinâmico.

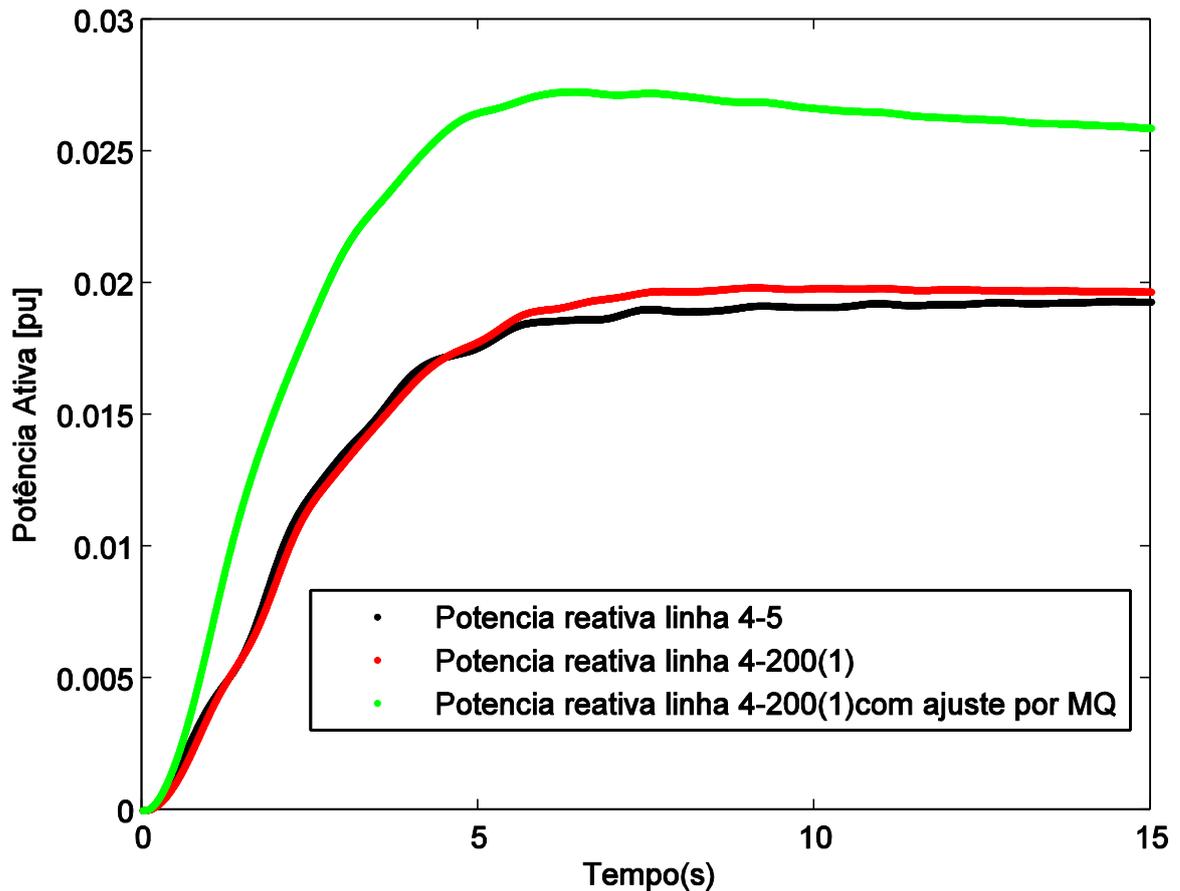


Figura 28 - gráfico das potências reativas nas LT 4-5 e LT 4-200(1)

A figura 28 traz-nos as potências reativas das LT 4-5 do sistema completo, na cor preta. Da LT 4-200(1) do sistema reduzido, na cor verde, e da LT 4-200(1) com o ajuste pelo método de mínimos quadrados, na cor vermelha. A curva em verde representa a curva de potência ativa na LT 4-200(1) calculada pelo equivalente dinâmico. Verificamos que a curva da LT 4-200(1) variou um pouco em relação à curva original, quando aplicamos o ajuste por MQ, verificamos uma melhora significativa em relação à aproximação das curvas original e equivalente, ocorrendo a sobreposição das curvas, o que demonstra um ajuste ótimo.

Temos abaixo o gráfico de comparação gráfico de comparação de potência reativa entre a LT 4-14 do sistema completo e a LT 4-200(12) do equivalente dinâmico.

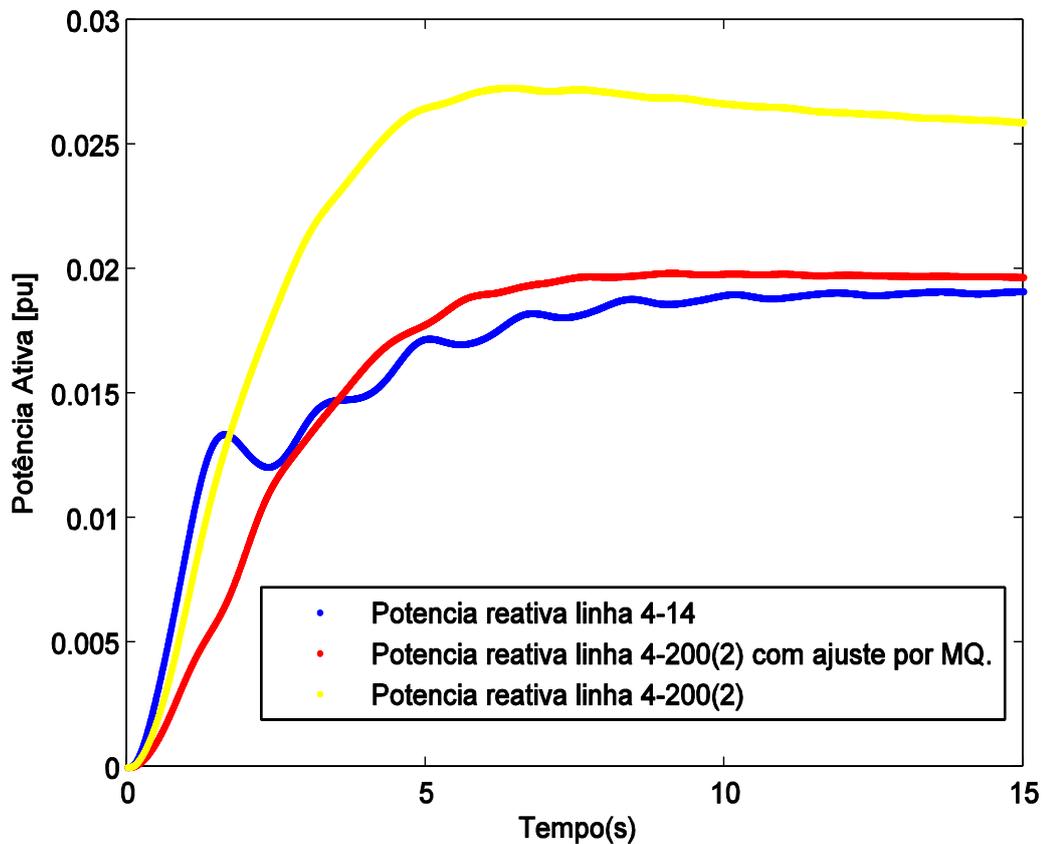


Figura 29 - gráfico da potência reativa da linha 4-14 e 4-200(2).

A figura 29 traz-nos as potências reativas das LT 4-14 do sistema completo, na cor azul. Da LT 4-200(2) do sistema reduzido, na cor amarela, e da LT 4-200(2) com o ajuste pelo método de mínimos quadrados, na cor vermelha. A curva em amarelo representa a curva de potência ativa na LT 4-200(1) calculada pelo equivalente dinâmico. Verificamos que a curva da LT 4-200(1) variou um pouco em relação à curva original, quando aplicamos o ajuste por MQ, verificamos uma melhora significativa em relação à aproximação das curvas original e equivalente, mesmo com o descolamento das curvas entre os instantes 5 e 10 segundos, logo aconteceu a sobreposição das curvas, O que nos leva a considerar o ajuste satisfatório.

Agora o gráfico de comparação gráfico de comparação de potência reativa entre a LT 14-15 do sistema completo e a LT 200-15 do equivalente dinâmico.

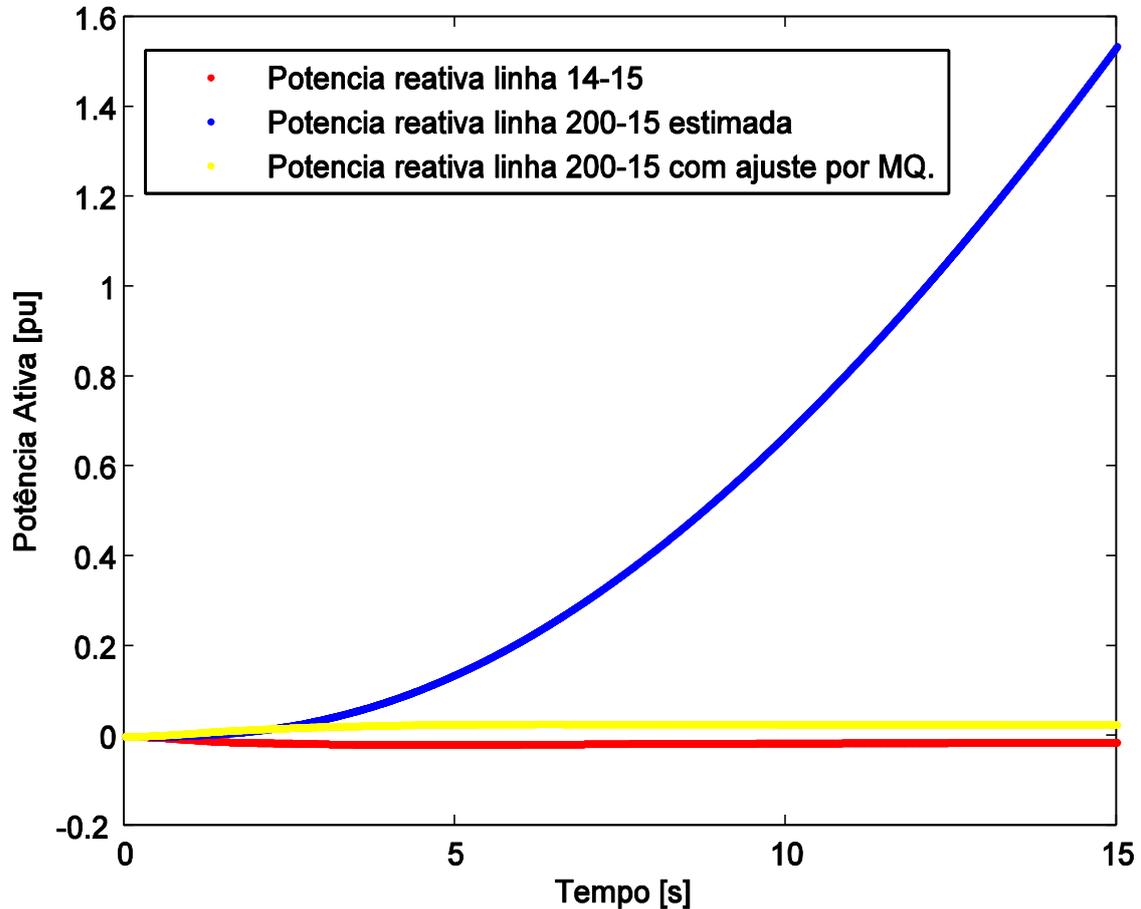


Figura 30 - gráfico de potência reativa da LT 14-15 e da LT 200-15.

Para a figura 30 nos mostra as curvas referentes a potência reativa da LT 14-15 e da LT 200-15, verificamos que a curva azul da LT 200-15 teve uma variação muito grande em relação a curva da LT 14-15 que representa a LT do sistema completo, isto foi corrigido pelo ajuste pro mínimos quadrados e pudemos observar que a curva da LT 200-15 ajustada, está muito próxima da curva original, validando assim nossa modelagem para esse caso.

Temos abaixo o gráfico de comparação gráfico de comparação de potência reativa entre a LT 39-9 do sistema completo e a LT 39-200 do equivalente dinâmico.

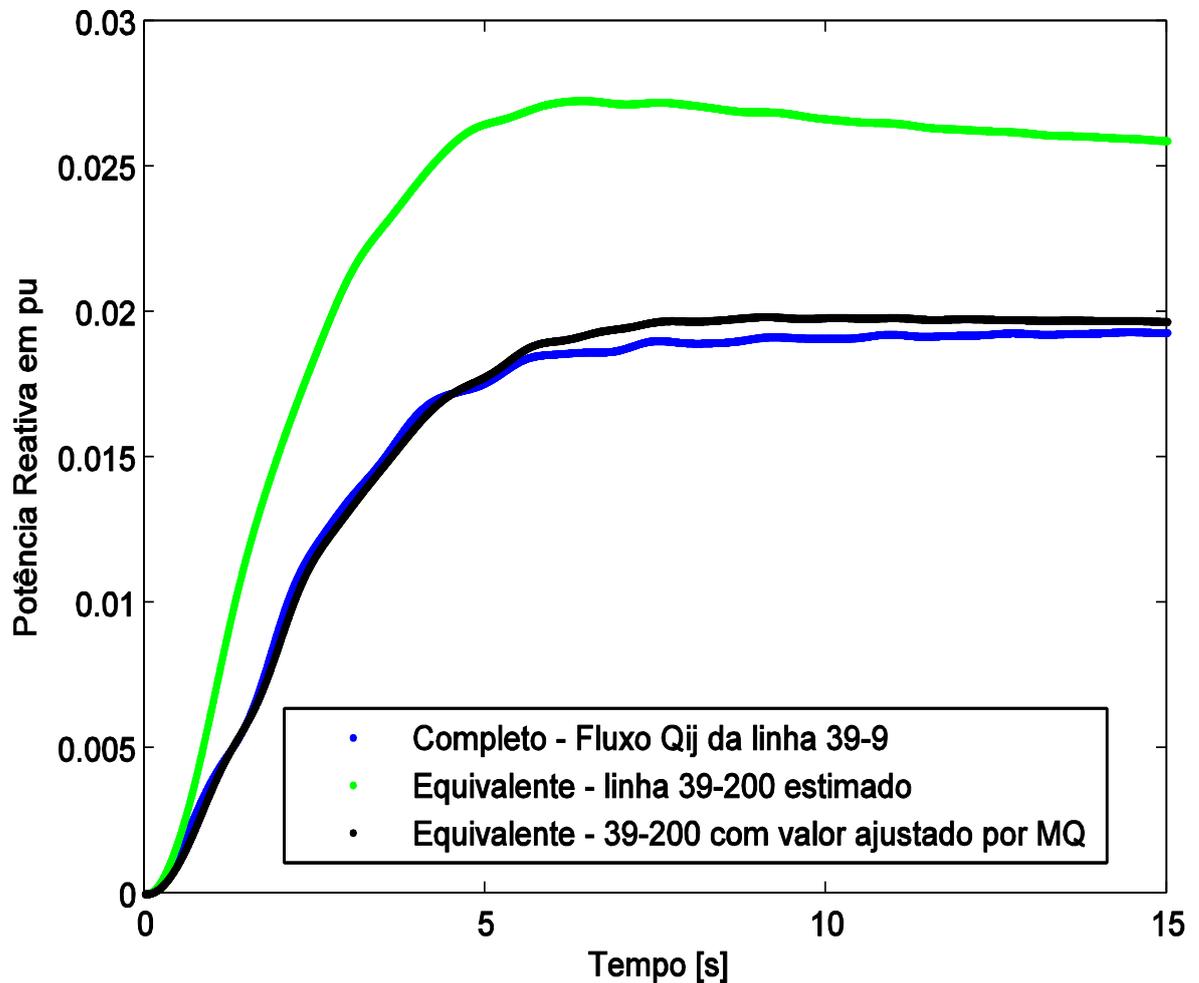


Figura 31 - Gráfico de potência reativa da linha 9-39 1 39-200

A figura 31 mostra as potências reativas das LT 39-9 do sistema completo, na cor azul. Da LT 39-200 do sistema reduzido, na cor verde, e da LT 4-200(1) com o ajuste pelo método de mínimos quadrados, na cor preta. A curva em verde representa a curva de potência ativa na LT 39-200 calculada pelo equivalente dinâmico. Verificamos que a curva da LT 39-200 variou um pouco em relação à curva original, quando aplicamos o ajuste por MQ, verificamos uma melhora significativa em relação à aproximação das curvas original e equivalente, ocorrendo a sobreposição das curvas, o que demonstra um ajuste ótimo e demonstrando a eficiência do método e a robustez do equivalente dinâmico.

Observando os gráficos de potência reativa, os quatro gráficos obtiveram sobreposição da curva original com a curva do equivalente ajustada por MQ sendo na figura 29 houve um descolamento das curvas por um pequeno período e na figura 39 a curva calculada por mínimos quadrados divergiu da curva original. Mais pelos resultados observados podemos considerar os ajustes satisfatórios.

5.1 Ajuste de parâmetros com modelo 3 (PACDYN) de gerador e mínimos quadrados.

Utilizando o mesmo procedimento de [5] com o sistema de excitação da figura 19, considerando os mesmos geradores do grupo A1, agregados à barra fictícia 200, inserimos os parâmetros do gerador e do sistema de excitação dos geradores 31 e 32 para o gerador equivalente da barra 200, realizando-se uma nova simulação no PACDYN [8] e exportando os resultados para o MATLAB.

Considerando o formato dos dados exportados como um sistema *descriptor*, conforme temos em [5], ou seja, um sistema de equações algébrico-diferenciais linearizadas, utilizamos a metodologia descrita no capítulo 5 para o ajuste das curvas por Mínimos Quadrados. Este procedimento resultou nos gráficos que apresentamos anteriormente.

A seguir, incluímos as tabelas dos parâmetros finais do gerador equivalente e do RAT equivalente, sendo estes dados obtidos através do MATLAB.

Parâmetros Finais encontrados com o ajuste de mínimos quadrados:

Tabela 8 - Parâmetros finais do gerador equivalente

| Parâmetros | Barra 200 |
|------------|-----------|
| x_d | 0,7780 |
| x_q | 0,0855 |
| x'_d | 0,0893 |
| x'_q | 0,4314 |
| x_p | 0,540 |
| T'_{do} | 5,00 |

| | |
|-----------|---------|
| T'_{qo} | 0,400 |
| Dt | 11,8899 |
| H | 30,1288 |
| Ra | 0,0007 |

Tabela 9 - Parâmetros finais do RAT equivalente.

| Parâmetros | Barra 200 |
|------------|-----------|
| K_a | 31,7417 |
| T_a | 0,0007 |
| K_f | 0,05 |
| T_f | 1,150 |
| K_e | 1,00 |
| T_e | 0,450 |

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho, referentes à aplicação da metodologia, utilização das ferramentas computacionais e utilização de programas para cálculos, análises e geração de gráficos, desenvolvidos no MATLAB.

A metodologia de elaboração dos equivalentes estáticos em BRITO, 2009 [5], é baseada na determinação das potências ativa e reativa nas linhas de fronteira entre na comparação dessas grandezas da parte interna e externa do SEP. A observação das tabelas 5 a 9 nos demonstra uma boa aproximação dos valores dos fluxos de potência ativa e reativa e da Tensão para o sistema equivalente e o SEP completo, o que era desejado. Sendo conseguido com o ajuste das reatâncias das linhas transmissão de interligação (fictícias) entre a barra equivalente e as barras de fronteira. Caso os valores apresentados tivessem diferenças significativas, isso prejudicaria a parte dinâmica do sistema, podendo inviabilizar o trabalho.

A grande dificuldade da elaboração desse trabalho encontrava-se em retirar dos dados fornecidos pelo programa de análise dinâmica de pequenas perturbações de SEPs PACDYN os dados necessários para obtenção dos parâmetros necessários em nossa modelagem, nisso foram gastos muito tempo, embasamento teórico e esforço.

Após encontrarmos o método de obter os dados dentro da matriz Jacobiana de cada sistema (completo e reduzido) o trabalho encaminhou a sua conclusão.

O desenvolvimento e a adaptação de programas que realizarão as análises dos dados e gerarão os gráficos foi outro grande desafio. Assim após vencer essas etapas, alcançamos os ajustes complementares.

A metodologia levou-nos a encontrar valores estimados próximos dos valores necessários ao ajuste, cujo mérito devesse ao modelo utilizado. Como Brito já declarava em seu trabalho: *“É importante lembrar que o método dos Mínimos Quadrados tende a encontrar resultados muito próximos do ideal quando os valores das condições iniciais tendem para valores factíveis.”* (BRITO, 2009 [5], grifo nosso).

Observando-se os gráficos conseguimos visualizar que a metodologia nos encaminhava para encontrar os resultados preliminares bastante razoáveis, que após o ajuste, puderam chegar aos nossos objetivos de forma satisfatória. Portanto, este trabalho demonstra que a aplicação da metodologia desenvolvida em BRITO, 2009 [5],

nos fornece uma ferramenta apropriada na construção de equivalentes dinâmicos que, com a elaboração sequencial para diferentes áreas de um mesmo SEP, nos abastece com uma ferramenta importante na diminuição de cálculos algébricos para solução de um fluxo de carga e para análise dinâmica em SEPs, o que, por conseguinte diminui o tempo e o esforço computacional na operação, estudo e manutenção desses sistemas.

Publicações e Trabalhos Futuros

Proveniente deste trabalho, foi elaborado um artigo denominado “*Modelagem Computacional de um Equivalente Dinâmico de Sistema de Potência com validação pelos programas Anarede, PacDyn e Matlab.*”, submetido ao Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2016, Natal - RN.

Conforme já apresentado em nossa conclusão, a elaboração sequencial de equivalentes dinâmicos de diferentes áreas de um mesmo sistema nos leva a uma ferramenta completa de redução de tempo e esforço computacional, portanto sugerimos como trabalhos futuros que sejam elaborados equivalentes dinâmicos das áreas A3 e A4 do sistema New England, completando assim as áreas do SEP.

Como sugestão, indicamos o estudo de outros métodos de ajuste de curvas na aplicação da elaboração de equivalentes dinâmicos.

Utilizar uma sistemática específica para identificação de parâmetros dentro da matriz jacobiana de um sistema não linear, talvez utilizando Redes Neurais, Lógica Fuzzi ou mesmo uma junção dos dois métodos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, A.B.; REGINATTO, R.; DA SILVA, R.J.G.C. *A software tool for the determination of dynamic equivalents of power systems*. Bulk Power System Dynamics and Control (iREP) - VIII (iREP), 2010 iREP Symposium, 2010, Pages: 1 - 10.
- [2] BAOZHEN ZHANG; YAO ZHANG; LINGXUE LIN; PEIPEI LIU. *Study on two Dynamic Aggregation Algorithms of Coherent Generators*. Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), Fourth International Conference on 2012 - Pages: 676 – 680.
- [3] BRITO, G. L. R; FREITAS, F. D.; and FERNANDES, L. F. J. *Redução da ordem de sistemas dinâmicos em sistemas de potência considerando soluções da equação de lyapunov de posto incompleto*, Proceedings do XXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, pages 1-16, 13 a 15 de Junho 2007.
- [4] BRITO, G. L. R; FREITAS, F. D; and FERNANDES, L. F. J. *Identificação dos parâmetros de equivalentes dinâmicos externos em sistemas elétricos de potência*. Proceeding of 8 the. Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, pages 1-9, October 2009.
- [5] BRITO, G. L. R. *Equivalentes dinâmicos de sistemas de potência com estruturas de modelo de geradores e seus controladores*. Tese de Doutorado – UNB - Brasília, pages 133p, 2009.
- [6] BRITO, G. L. R., FREITAS, F. D.; and FERNANDES, L. F. J.. *Determinação de Equivalente Dinâmico para Sistemas de Potência a partir de Grandezas de Fluxo de Potência e de Tensão*. (2010).
- [7] CARVALHO, MARTHA ROSA MARTINS. *Equivalente de rede generalizado para modelagem da resposta de sistemas externos às modificações internas de uma rede de distribuição*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- [8] CEPTEL. Manual do usuário do PacDyn. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [9] CEPTEL. Manual Programa de Análise de Rede – ANAREDE versão de 09-04-02. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [10] CHANIOTIS, D. and PAI, M. A. *Model reduction in power systems using krylov subspace methods*. IEEE Transactions on Power Systems, 20(2):888-894, May 2005.

- [11] COSTA, T. R. V.; and FREITAS, D. *"Identificação de sistemas para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência."* XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente SBAI e XI Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações-DINCON. 2013.
- [12] DE TUGLIE, E.; IANNONE, S. M.; and TORELLI, F. *A coherency recognition based on structural decomposition procedure*, IEEE Transactions on Power Systems, 23(2):555 - 563, Maio 2008.
- [13] DONGCHEN HU AND VAITHIANATHAN "MANI" VENKATASUBRAMANIAN. *New wide-area algorithms for detecting angle instability using synchrophasors*. In Western Protective Relay Conference, pages 1-36, Spokane, WA, 2006.
- [14] DURIC, M. B.; RADJJEVIC, Z. Ma and TURKOVIC, E. D. *A reduced order multimachine power system model suitable for small signal stability analysis*. *Electrical Power & Energy Systems*, 20(5):369 374, 1998.
- [15] EL-KADY, M, A.; ALASKAR, B. A.; SHAALAN, A. M; and AL-SHAMMARI, B. M., *Composite reliability and quality assessment of interconnected power systems*. *International Journal for Computation and mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 26(1):7 21, 2007.
- [16] FENG Ma; VITTAL, V. *RIGHTSIZED Power System Dynamic Equivalents for Power System Operation*. IEEE Transactions on Power Systems. - 2011, Volume: 26, Issue: 4 Pages: 1998 – 2005.
- [17] FERNANDES, L. F. J.. *Identificação de sinais ruidosos em sistemas de potência e representações na forma de pólos e resíduos*. Engenharia elétrica, Universidade de Brasília, Brasília -DF, Dezembro 2007. Tese de Doutorado.
- [18] FIROUZI, B. B; JAMSHIDPOUR, E. and XIKNAM, T. *A new method for estimation of large synchronous generator parameters by genetic algorithm*. *World Applied Sciences Journal*, 4(3):326—331, 2008,
- [19] FREITAS, F. D. and BRITO, G. L. R. *Redução de ordem de sistemas dinâmicos em sistemas elétricos de potência utilizando o método de lanczos com*

- reinicialização implícita*, Proceedings do XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, pages 1-15, 2 a 6 de Setembro 2006,
- [20] FREITAS, F. D., ROOMMES, J. and MARTINS, X. *Gramian-based reduction method applied to large sparse power system descriptor models*. IEEE Transactions on Power Systems, 23(3):1258-1270, August 2008.
- [21] GACIC, X.; ZECEVIC, A. I.; and SILJAK, D. D. *Coherency recognition using epsilon decomposition*, IEEE Transactions on Power Systems, 13(2):314, May 1998.
- [22] HUANG, Z.; DU, P.; KOSTEREV, D. and YANG, B. *Application of extended kalman filter techniques for dynamic model parameter calibration*. Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, pages 1-8, August 2009.
- [23] IEEE Committee report. *Excitation system dynamics characteristic Transactions on Power Apparatus and Systems, pages 64-75, May – 1972*
- [24] JAYAPAL, R.; MENDIRATTA, J.K. *H_{∞} loop shaping based robust power system stabilizer for dynamic equivalent multi-machine power system*. Modern Electric Power Systems (MEPS), Proceedings of the International Symposium - 2010 - Pages: 1 – 6.
- [25] JONSSON, M.; BEGOVIC, M.; and DAALDER, J. *A new method suitable for real-time generator coherency determination*. IEEE Transactions on Power Systems, 19(3): 1473 - 1482, Agosto 2004.
- [26] JU, P.; XI, L. Q.; and WU, F.; and HE, X. Q. *Dynamic equivalents of power systems with on-line measurements, part 2: applications*, IEEE Proceedings.
- [27] JU, P.; XI, L. Q.; and WU, F. *Dynamic equivalents of power systems with on-line measurements, part 1: theory*, IEE Proceedings - Generation Transmission e. Distribution, 151 (2): 1T5 ITS, March 2004.
- [28] KUNDUR, P. *Power system stability and control*. EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.

- [29] LEI, X.; POVH, D.; and RUHLE, O. *Industrial approaches for dynamic equivalents of large power systems*, Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2:1036- 1042, 2002.
- [30] LINO, O; FETTE, Y. M; and DONG, A. Y. *Splitting-based dynamic equivalencing in power systems*. Proceedings of 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech, (1) :17, 27-30 June 2005.
- [31] M, H, HAQUE and A, H, M, A, RAHIM, *Identification of coherent generators using energy function*, IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 137(4):255 - 260, Julho 1990.
- [32] MIN, L; and ABUR, A. *Rei-equivalent based decomposition method for multi-area ttc computation*. Proceedings of IEEE 2005 Transmission and Distribution, pages 1-5, October 2005.
- [33] MIN, L; and ABUR, A. *Total transfer capability computation for multi-area power systems*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21 (3.):1141-1147, August 2006.
- [34] MORAES, R. M.; VOLSKIS, H. A. R; and HU, Yi. *Deploying a large-scale pmu system for the brazilian interconnected power*. IEEE Third International Conference, on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pages 143-149, 6-9 April 2008.
- [35] NABAVI, S.; CHAKRABORTTY, A. *Topology identification for dynamic Equivalent models of large power system networks*. American Control Conference (ACC), 2013 - Pages: 1138 – 1143.
- [36] NETO, A. C. A; RODRIGUES, B. R; PRADA, B. and SILVA, M. G. *External equivalent for electric power distribution networks with radial topology*, IEEE Transactions on Power Systems, 23(3):889-895, August 2008.
- [37] OURARI, M. L.; DESSAINT, L. A. and DO, V. Q. *Dynamic equivalent modeling of large power systems using structure preservation technique*, IEEE Transactions Power Systems, 21 (3): 1284—1294, 2006.

- [38] OURARI, M. L.; DESSAINT, L. A. and DO, V. Q. *Generating units aggregation for dynamic equivalent of large power systems*. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2:1535-1541, 6-10 Jun 2004.
- [39] PACO, D. F. D. *Agregação dinâmica de turbinas e reguladores de velocidade: Modelos 02, 03 e 05 do anatem*. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Agosto 2004.
- [40] PESSANHA, J. E. O; SAAVEDRA, O. R.; BUZAR, J. C. R, Paz, A. A. and Poma, C. P. *Power system stability reinforcement based on network expansion: A practical case*. Electrical Power and Energy Systems, 29:208-216, 2007.
- [41] PIRES DE SOUZA, E. J. S. *Identification of coherent of generators considering the electrical proximity for drastic dynamic equivalents*. Electric Power Systems Research, 78:1169 - 1174, 2008.
- [42] PREDA, T.N.; UHLEN, K.; NORDGÅRD, D.E.; TOFTEVAAG, T. *Dynamic equivalents of active distribution power systems for investigation of transient stability*. Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on. 2013 Pages: 1 – 4.
- [43] RAMIREZ, A.; MEHRIZI-SANI, A.; HUSSEIN, D.; MATAR, M.; ABDELRAHMAN, M.; CHAVEZ, J.J.; DAVOUDI, A.; KAMALASADAN, S. *Application of Balanced Realizations for Model Order Reduction of Power System Equivalents*. Power Delivery, IEEE Transactions on 2015, Volume: PP, 99, Pages: 1 – 1.
- [44] REDDY, J.; KISHORE, M.J. *H_∞ loop shaping based robust power system stabilizer for dynamic equivalent multi-machine power system*. Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International - 2010, Pages: 582 – 587.
- [45] ROOMMES, J; and MARTINS, X. *Computing large-scale eigenvalues most sensitive to parameter changes, with applications to power system small-signal stability*. IEEE Transactions on Power Systems, 23(23):434-442, May 2008.

- [46] SAVULESCU, S. C; *Equivalentes for security analysis of power systems*. IEEE Transactions power Apparatus and Systems, PAS-100(3):1324-1332, March – 1981.
- [47] SHAKOURI, G, H; and RADMANESH, H, R. *Identification of a continuous time nonlinear state space model for the external power system dynamic equivalents by neural networks*. Electrical Power & Energy Systems, 31(Issue 6):1—11, July 2009.
- [48] SOWA, P. *Representation of power system for eletromagnetic transient calculation. Proceedings of world academy of science., engineering and technology*, 30:840-843, July 2008.
- [49] XAVIER, F.; MARINESCU, B. *Analysis of a dynamic equivalent for representation of wind generation for modal analysis of large-scale power systems*. PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble - 2013 Pages: 1 – 6.
- [50] XIAO YUANYUAN; LI XINRAN; ZHANG YUANSHENG; LI XIAOJU; CHEN DESHENG. *Dynamic modeling and equivalent description of directly driven wind powersystem*. Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on 2011, Volume: 2, Pages: 906 – 910.
- [51] WANG, S, K; CHIOU, J, P; and , LIU, C, W. *Parameters tuning of power system stabilizers using improved ant direction hybrid differential evolution*. Electrical Power & Energy Systems, 31 (Issue 1) :34 42, January 2009.
- [52] YU, Y. *Eletric Power System Dynamics*. Academic Press, New York, 1983.
- [53] ZHOU YANG; WANG KUI; ZHANG BUHAN. *A real-time dynamic equivalent solution for large interconnected power systems*. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on 2011 Pages: 871 – 875.

8 ANEXOS

Nessa seção incluímos dados complementares de nosso trabalho, bem como o resultado das aplicações das ferramentas computacionais ANAREDE, PACDYN e MATLAB.

8.1 Dados do Sistema New England

Tabela 10 - Dados de linhas e transformadores - New England

| Da Barra | Para Barra | Resistência (%) | Reatância (%) | Susceptância (Mvar) | Tape (pu) |
|----------|------------|-----------------|---------------|---------------------|-----------|
| 1 | 2 | 0,350 | 4,110 | 68,870 | 0,00 |
| 1 | 39 | 0,100 | 2,500 | 75,000 | 0,00 |
| 2 | 3 | 0,130 | 1,510 | 25,720 | 0,00 |
| 2 | 25 | 0,700 | 0,860 | 14,600 | 0,00 |
| 2 | 30 | 0,010 | 1,810 | 0,000 | 1,00 |
| 3 | 4 | 0,130 | 2,130 | 22,140 | 0,00 |
| 4 | 5 | 0,080 | 1,280 | 13,420 | 0,00 |
| 4 | 14 | 0,080 | 1,290 | 13,820 | 0,00 |
| 5 | 6 | 0,020 | 0,260 | 4,340 | 0,00 |
| 5 | 8 | 0,080 | 1,120 | 14,760 | 0,00 |
| 6 | 7 | 0,060 | 0,920 | 11,300 | 0,00 |
| 6 | 11 | 0,070 | 0,820 | 13,890 | 0,00 |
| 6 | 31 | 0,010 | 2,500 | 0,000 | 1,00 |
| 7 | 8 | 0,040 | 0,460 | 7,800 | 0,00 |
| 8 | 9 | 0,023 | 3,630 | 38,040 | 0,00 |
| 9 | 39 | 0,100 | 2,500 | 120,00 | 0,00 |
| 10 | 11 | 0,040 | 0,430 | 7,290 | 0,00 |
| 10 | 13 | 0,040 | 0,430 | 7,290 | 0,00 |
| 10 | 32 | 0,010 | 2,000 | 0,000 | 1,00 |
| 12 | 11 | 0,160 | 4,350 | 0,000 | 1,00 |
| 12 | 13 | 0,160 | 4,350 | 0,000 | 1,00 |
| 13 | 14 | 0,090 | 1,010 | 17,230 | 0,00 |
| 14 | 15 | 0,180 | 2,170 | 36,600 | 0,00 |
| 15 | 16 | 0,090 | 0,940 | 17,100 | 0,00 |
| 16 | 17 | 0,070 | 0,890 | 13,420 | 0,00 |
| 16 | 19 | 0,160 | 1,950 | 30,400 | 0,00 |
| 16 | 21 | 0,080 | 1,350 | 25,480 | 0,00 |
| 16 | 24 | 0,030 | 0,590 | 6,800 | 0,00 |
| 17 | 18 | 0,070 | 0,820 | 13,19 | 0,00 |

| | | | | | |
|----|----|-------|-------|--------|------|
| 17 | 27 | 0,130 | 1,730 | 32,16 | 0,00 |
| 19 | 20 | 0,070 | 1,380 | 0,00 | 1,00 |
| 19 | 33 | 0,070 | 1,420 | 0,00 | 1,00 |
| 20 | 34 | 0,090 | 1,800 | 0,00 | 1,00 |
| 21 | 22 | 0,080 | 1,400 | 25,65 | 0,00 |
| 22 | 23 | 0,060 | 0,960 | 18,46 | 0,00 |
| 22 | 35 | 0,010 | 1,430 | 0,00 | 1,00 |
| 23 | 24 | 0,220 | 3,500 | 36,10 | 0,00 |
| 23 | 36 | 0,050 | 2,720 | 0,00 | 1,00 |
| 25 | 26 | 0,320 | 3,230 | 51,30 | 0,00 |
| 25 | 37 | 0,060 | 2,320 | 0,00 | 1,00 |
| 26 | 27 | 0,140 | 1,470 | 23,96 | 0,00 |
| 26 | 28 | 0,430 | 4,740 | 78,02 | 0,00 |
| 26 | 29 | 0,570 | 6,250 | 102,90 | 0,00 |
| 28 | 29 | 0,140 | 3,500 | 36,10 | 0,00 |
| 29 | 38 | 0,080 | 1,560 | 0,00 | 1,00 |

Tabela 11 - Dados das barras do New England

| Barra N° | Tipo | Tensão (pu) | Geração (MW) | Carga (MW) | Carga (MVA) |
|----------|------|-------------|--------------|------------|-------------|
| 1 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | PQ | 1,00 | 0,00 | 322,0 | 2,40 |
| 4 | PQ | 1,00 | 0,00 | 500,0 | 184,0 |
| 5 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | PQ | 1,00 | 0,00 | 233,8 | 84,00 |
| 8 | PQ | 1,00 | 0,00 | 522,0 | 176,6 |
| 9 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 10 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12 | PQ | 1,00 | 0,00 | 9,50 | 88,0 |
| 13 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 14 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 15 | PQ | 1,00 | 0,00 | 320,0 | 153,0 |
| 16 | PQ | 1,00 | 0,00 | 329,40 | 32,3 |
| 17 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 18 | PQ | 1,00 | 0,00 | 158,0 | 30,0 |
| 19 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | PQ | 1,00 | 0,00 | 680,0 | 103,0 |
| 21 | PQ | 1,00 | 0,00 | 274,0 | 115,0 |
| 22 | PQ | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 23 | PQ | 1,00 | 0,00 | 247,5 | 84,6 |
| 24 | PQ | 1,00 | 0,00 | 308,6 | -92,2 |
| 25 | PQ | 1,00 | 0,00 | 244,0 | 47,2 |

| | | | | | |
|----|----|-------|--------|--------|-------|
| 26 | PQ | 1,00 | 0,00 | 139,0 | 17,0 |
| 27 | PQ | 1,00 | 0,00 | 281,0 | 75,5 |
| 28 | PQ | 1,00 | 0,00 | 206,0 | 27,6 |
| 29 | PQ | 1,00 | 0,00 | 283,5 | 26,9 |
| 30 | PV | 1,048 | 250,0 | 0,00 | 0,00 |
| 31 | PV | 1,010 | 563,3 | 9,20 | 4,60 |
| 32 | PV | 1,020 | 650,0 | 0,00 | 0,00 |
| 33 | PV | 0,997 | 632,0 | 0,00 | 0,00 |
| 34 | PV | 1,012 | 508,0 | 0,00 | 0,00 |
| 35 | PV | 1,049 | 650,0 | 0,00 | 0,00 |
| 36 | PV | 1,050 | 560,0 | 0,00 | 0,00 |
| 37 | PV | 1,028 | 540,0 | 0,00 | 0,00 |
| 38 | PV | 1,027 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 39 | PV | 1,030 | 1000,0 | 1104,0 | 250,0 |

Tabela 12 - Dados dos reguladores de Tensão do New England

| Gerador Nº | Ka (pu/pu) | Ke | Kf (s) | Tm (s) | Ta (s) | Te (s) | Tf (s) |
|---------------|---------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 5,00 | 1,00 | 0,040 | 0,00 | 0,06 | 0,250 | 1,000 |
| 2 | 6,20 | 1,00 | 0,057 | 0,00 | 0,05 | 0,405 | 0,500 |
| 3 | 5,00 | 1,00 | 0,080 | 0,00 | 0,06 | 0,500 | 1,000 |
| 4 | 5,00 | 1,00 | 0,080 | 0,00 | 0,06 | 0,500 | 1,000 |
| 5 | 40,00 | 1,00 | 0,030 | 0,00 | 0,02 | 0,785 | 1,000 |
| 6 | 5,00 | 1,00 | 0,075 | 0,00 | 0,02 | 0,471 | 1,260 |
| 7 | 40,00 | 1,00 | 0,030 | 0,00 | 0,02 | 0,730 | 1,000 |
| 8 | 5,00 | 1,00 | 0,085 | 0,00 | 0,02 | 0,528 | 1,260 |
| 9 | 40,00 | 1,00 | 0,030 | 0,00 | 0,02 | 1,400 | 1,000 |

Tabela 13 - Dados das máquinas do New England

| Gerador Nº | H (s) | Dt (pu/pu) | X _e (%) | X _d (%) | X _q (%) | X _d ' (%) | X _d '' (%) | T _{do} ' (%) | T _{do} '' (%) | T _{qo} '' (%) | R _a (%) |
|---------------|----------|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1 | 42,0 | 4,0 | 1,25 | 10,0 | 6,90 | 3,10 | 2,83 | 10,2 | 0,05 | 0,10 | 0,014 |
| 2 | 30,3 | 9,75 | 3,50 | 29,5 | 28,2 | 6,97 | 4,00 | 6,56 | 0,048 | 0,12 | 0,270 |
| 3 | 35,8 | 10,0 | 3,04 | 24,95 | 23,7 | 5,31 | 3,70 | 5,70 | 0,048 | 0,11 | 0,0386 |
| 4 | 28,6 | 10,0 | 2,95 | 26,2 | 25,8 | 4,36 | 3,00 | 5,69 | 0,05 | 0,10 | 0,0222 |
| 5 | 26,0 | 3,0 | 5,40 | 67,0 | 62,0 | 13,2 | 8,90 | 5,40 | 0,045 | 0,09 | 0,014 |
| 6 | 34,8 | 10,0 | 2,24 | 25,4 | 24,1 | 5,00 | 3,83 | 7,30 | 0,05 | 0,07 | 0,615 |
| 7 | 26,4 | 8,0 | 3,22 | 29,5 | 29,2 | 4,90 | 3,80 | 5,66 | 0,04 | 0,06 | 0,268 |
| 8 | 24,3 | 9,0 | 2,80 | 29,0 | 28,0 | 5,70 | 3,80 | 6,70 | 0,048 | 0,12 | 0,0686 |
| 9 | 34,5 | 14,0 | 2,98 | 21,06 | 20,5 | 5,70 | 3,80 | 4,79 | 0,03 | 0,09 | 0,030 |
| 10 | 500,0 | 10,0 | 0,30 | 2,00 | 1,90 | 0,60 | 0,40 | 7,00 | 0,05 | 0,14 | 0,010 |

DIAGRAMA DO SISTEMA
NEW ENGLAND
COMPLETO

**PROGRAMA ANAREDE
RESULTADO DO FLUXO DE CARGA
SISTEMA NEW ENGLAND COMPLETO**

**PROGRAMA ANAREDE
RESULTADO DO FLUXO DE CARGA
SISTEMA NEW ENGLAND REDUZIDO**

PROGRAMA PACDYN
ARQUIVO DE PARÂMETROS DE GERADORES
E REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO
SISTEMA NEW ENGLAND

PROGRAMA PACDYN
ARQUIVO DE PARÂMETROS DE GERADORES
E REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO
SISTEMA NEW ENGLAND REDUZIDO

PROGRAMA MATLAB

PROGRAMA: completo_15full.m

ARQUIVO DE GERAÇÃO DE GRÁFICOS
PRELIMINARES

PROGRAMA MATLAB

PROGRAMA: main_neweng_mod3_15f.m

ARQUIVO DE GERAÇÃO DE GRÁFICOS
DOS RESULTADOS FINAIS e AJUSTE DE
MÍNIMOS QUADRADOS

PROGRAMA MATLAB

PROGRAMA: myfun_mod3_f.m

ARQUIVO DE GERAÇÃO DE GRÁFICOS
DOS RESULTADOS FINAIS e AJUSTE DE
MÍNIMOS QUADRADOS